

Aus der
Klinik für Kleintiere
der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

**Biomechanik der kaninen Lendenwirbelsäule nach der Durchführung
multipler Partieller Lateraler Korpektomien**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doctor medicinae veterinariae (Dr. med. vet.)
durch die Veterinärmedizinische Fakultät
der Universität Leipzig

eingereicht von
Lisa Franziska Becker
aus Altena

Leipzig, 2023

Mit Genehmigung der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Dekan: Prof. Dr. Dr. Thomas Vahlenkamp

Betreuer: Prof. Dr. Thomas Flegel

Gutachter: Prof. Dr. Thomas Flegel, Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät
der Universität Leipzig

Prof. Dr. Frank Steffen, Abteilung Neurologie/Neurochirurgie, Vetsuisse
Fakultät der Universität Zürich, Schweiz

Tag der Verteidigung: 24.10.2023

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Literaturübersicht.....	2
2.1	Bandscheibenvorfälle in der Tiermedizin.....	2
2.2	Die Bandscheibe	3
2.2.1	Anulus fibrosus	3
2.2.2	Nucleus pulposus.....	4
2.2.3	Endplatten	4
2.3	Diskopathie.....	4
2.3.1	Ein Überblick.....	4
2.3.2	Hansen Typ I Diskopathie – Extrusion des Nucleus pulposus	5
2.3.3	Hansen Typ II Diskopathie – Protrusion des Anulus fibrosus	6
2.3.4	Akute, nicht kompressive Nucleus pulposus Extrusion.....	6
2.3.5	Akute, kompressive Hydrated Nucleus pulposus Extrusion.....	6
2.3.6	Schmorl Knoten	7
2.4	Operationsmethoden an der Brust- und Lendenwirbelsäule des Hundes.....	7
2.4.1	Hemilaminektomie	7
2.4.2	Mini-Hemilaminektomie und Pedikelektomie	8
2.4.3	Foraminotomie.....	8
2.4.4	Dorsale Laminektomie.....	8
2.4.5	Partielle Laterale Korpektomie.....	9
2.4.5.1	Operationstechnik und Slot-Morphometrie bei der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie.....	9
2.4.5.2	Ziele und Risiken der Partiellen Lateralen Korpektomie	11
2.4.5.3	Prognostische Faktoren und Outcome nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie.....	13
2.5	Biomechanik der Wirbelsäule nach chirurgischen Eingriffen.....	15
2.5.1	Ventral Slot.....	16
2.5.2	Hemilaminektomie	19

2.5.3	Mini-Hemilaminektomie und Pedikelektomie	21
2.5.4	Dorsale Laminektomie.....	22
2.5.5	Partielle Laterale Korpektomie.....	23
3.	Tiere, Material und Methoden	27
3.1	Arbeitshypothese	27
3.2	Patientengut.....	27
3.3	Präparation der Lendenwirbelsäulen.....	28
3.4	Einbettung der präparierten Lendenwirbelsäulen.....	29
3.5	Biomechanische Messung	32
3.5.1	Der Wirbelsäulenprüfstand	32
3.5.2	Nicht destruktive Tests.....	33
3.5.2.1	Testreihe 1: Biomechanische Messungen an den nativen Wirbelsäulensegmenten (ohne gefräste Partielle Laterale Korpektomie).....	34
3.5.2.1.1	Extension und Flexion	34
3.5.2.1.2	Links- und rechtslaterale Biegung	34
3.5.2.1.3	Torsion nach links und rechts	35
3.5.2.2	Testreihe 2: Biomechanische Messungen an den operierten Wirbelsäulensegmenten mit einer Partiellen Lateralen Korpektomie zwischen L2 und L3 von rechts.....	35
3.5.2.3	Testreihe 3: Biomechanische Messungen an den operierten Wirbelsäulensegmenten mit zwei Partiellen Lateralen Korpektomien zwischen L2 und L3 sowie L3 und L4 von rechts	36
3.5.3	Destruktive Tests - Versagenstests.....	37
3.6	Postoperative Computertomographie	37
3.7	Statistische Auswertung.....	37
4.	Ergebnisse	38
4.1	Nicht destruktive Tests.....	38
4.1.1	Gesamt-Range of Motion	38
4.1.2	Gegenüberstellung der Teil-Ranges of Motion: Extension vs. Flexion, linkslaterale Biegung vs. rechtslaterale Biegung und Torsion nach links vs. Torsion nach rechts.....	47

4.2	Einfluss der biomechanischen Testung auf die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente	51
4.3	Destruktive Tests - Versagenstest	52
5.	Diskussion.....	53
5.1	Hauptaussagen.....	53
5.1.1	Nicht destruktive Tests.....	53
5.1.1.1	Gesamt-Range of Motion	53
5.1.1.2	Teil-Ranges of Motion	55
5.1.2	Destruktive Tests - Versagenstests.....	56
5.2	Biomechanik der kaninen Lendenwirbelsäule nach Partiellen Lateralen Korpektomien – Ein Studienvergleich.....	57
5.3	Limitationen der Studie	61
5.4	Spinale Instabilität	65
5.5	Klinische Relevanz der Studienergebnisse und Schlussfolgerungen.....	69
6.	Zusammenfassung.....	71
7.	Summary	73
8.	Literaturverzeichnis.....	75
9.	Abbildungsverzeichnis.....	90
10.	Tabellenverzeichnis	93
11.	Finanzielle Förderung und Veröffentlichung der Studienergebnisse.....	94
12.	Danksagung	95

Abkürzungsverzeichnis

ANNPE	Akute, nicht kompressive Nucleus pulposus Extrusion
bzw.	beziehungsweise
C	Celsius, Halswirbel
cm	Zentimeter
Co.	Compagnie
CT	Computertomograph, Computertomographie
Dipl.-Ing.	Diplom-Ingenieur
Dr. med. vet	Doctor medicinae veterinariae
Dr. rer. med.	Doctor rerum medicarum
ECVN	European College of Veterinary Neurology
ESVN	European Society of Veterinary Neurology
et al.	et alia
etc.	et cetera
e.V.	eingetragener Verein
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Hz	Hertz
inkl.	inklusive
kg	Kilogramm
kVp	Spitzenkilovoltspannung
L	Lendenwirbel
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
M.	Musculus
mAs	Milliamperesekunden
M. Eng.	Master of Engineering
mm	Millimeter
Mm.	Musculi
n	Größe der Stichprobe
Nm	Newtonmeter
Nr.	Nummer
N.V.	Naamloze Vennootschap, Aktiengesellschaft
PLC	Partielle Laterale Korpektomie
Proc.	Processus
RoM	Range of Motion

SD Standardabweichung
Th Brustwirbel
u.a. unter anderem
USA United States of America
v.a. vor allem
vs. versus
WSS Wirbelsäulensegment, Wirbelsäulensegmente
ZESBO Zentrum zur Erforschung der Stütz- und Bewegungsorgane

1. Einleitung

Häufig werden in tierärztlichen Praxen und Kliniken Hunde wegen Lähmungserscheinungen infolge von Bandscheibenvorfällen vorgestellt. Besteht Bedarf an einer chirurgischen Versorgung, so hat der Neurochirurg je nach Lokalisation und Typ des Bandscheibenvorfalles unterschiedliche Operationsmethoden zur Auswahl. Eine neuere Operationsmethode zur Versorgung thorakolumbalen Bandscheibenvorfällen ist die Partielle Laterale Korpektomie. Sie ermöglicht eine Dekompression des Rückenmarks von ventral und findet ihren Einsatz bei chronischen Bandscheibenvorfällen.

Biomechanische Studien haben gezeigt, dass bereits eine Partielle Laterale Korpektomie zu einer Reduktion der Stabilität der kaninen Wirbelsäule führt. Bisher wurde deswegen, von der Durchführung multipler Partieller Lateraler Korpektomien abgeraten, bevor nicht weitere Studien die biomechanischen Konsequenzen der Partiellen Lateralen Korpektomie auf die kanine Wirbelsäule besser abschätzen lassen.

Diese Arbeit widmet sich der Biomechanik der kaninen Lendenwirbelsäule nach der Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien.

2. Literaturübersicht

2.1 Bandscheibenvorfälle in der Tiermedizin

Man geht davon aus, dass 2,3 % (PRIESTER 1976) bis 3,5 % (BERGKNUT et al. 2012) aller Patienten in Zusammenhang mit Bandscheibenerkrankungen in tierärztlichen Praxen und Kliniken vorgestellt werden. Körpermorphometrie, Nutzung des Hundes (z.B. Schutzdienst, Führdienst etc.), spinale Biomechanik und genetische Komponenten sind dabei Faktoren, die prädisponierend hinsichtlich einer Bandscheibendegeneration wirken können (HANSEN 1952, LEVINE et al. 2006, BRAUND et al. 1977, BRAY und BURBIDGE 1998a, BALL et al. 1982). Dackel, Miniaturpudel, Pekingesen, Cocker Spaniel, Shih Tzus, Lhasa apsos und Beagle sind von Bandscheibenvorfällen häufig betroffene kleine Hunderassen (GRIFFIN et al. 2009, PRIESTER 1976, FERREIRA et al. 2002, MAYHEW et al. 2004). Besonders häufig betroffene große Hunderassen sind Basset, Deutscher Schäferhund und Labrador Retriever (MAYHEW et al. 2004, CUDIA und DUVAL 1997). Die aus Bandscheibenvorfällen resultierenden Symptome sind sehr vielfältig. So treten sowohl Schmerzepisoden als auch Lähmungserscheinungen unterschiedlicher Schweregrade auf. Wie schwer die Symptome ausfallen und als wie gut oder schlecht die Prognose einzuschätzen ist, hängt dabei u.a. von der Menge an vorgefallenem Bandscheibenmaterial, der Schwere der Kontusion des Rückenmarks, von der Dauer der Myelokompression (GRIFFIN et al. 2009, COATES 2000) sowie vom Typ des Bandscheibenvorfalles ab.

Bandscheibenvorfälle können konservativ-medizinisch oder chirurgisch therapiert werden (LEVINE et al. 2007b, RISIO et al. 2002, GUO et al. 2020, BRISSON 2010, LEVINE et al. 2007a, JEFFERY et al. 2013). Die konservative Therapie besteht in der Regel aus dem kombinierten Einsatz von Ruhighaltung und Physiotherapie sowie bei Bedarf aus der Anwendung schmerzlindernder, entzündungshemmender und muskelrelaxierender Medikamente (COATES 2000, LEVINE et al. 2007b, DEWEY 2020b). Sie findet meist Anwendung bei noch gehfähigen Patienten mit akut aufgetretenen Symptomen (LEVINE et al. 2007b, COATES 2000). LEVINE et al. (2007) konnten in ihrer Studie zum Erfolg der konservativen Therapie thorakolumbalen Bandscheibenvorfälle bei 54,4 % der behandelten Patienten eine signifikante Verbesserung des neurologischen Zustandes ohne Rezidiv feststellen (LEVINE et al. 2007b). CRAWFORD und DE DECKER (2017) forschten speziell zum Therapieerfolg bei Patienten mit thorakolumbalen Bandscheibenprotrusionen. In ihrer Studienpopulation (n = 84) konnte bei 29,6 % der Patienten ein Therapieerfolg durch eine konservative Therapie mit einer mittleren Überlebenszeit von 330 Tagen festgestellt werden (CRAWFORD und DECKER 2017). Sind Patienten nicht mehr gehfähig, zeigen rezidivierende oder sich progressiv verschlechternde Symptome oder der neurologische Zustand verbessert sich unter konservativer Therapie nicht, so ist meist eine chirurgische Intervention in Hinblick auf die Heilungschancen die vielversprechendste Therapieoption (COATES 2000, RISIO et al. 2002, EARLY et al. 2013, ELLIOTT et al. 2020, LANGERHUUS und MILES 2017,

INGRAM et al. 2013). Postoperativ kann bei 86 % bis 96 % der nicht mehr gehfähigen Patienten mit einer Verbesserung des neurologischen Zustandes bis hin zur Wiedererlangung der selbstständigen Gehfähigkeit gerechnet werden (DAVIS und BROWN 2002, FERREIRA et al. 2002, RUDDLE et al. 2006). Bei thorakolumbalen Bandscheibenprotrusionen im Speziellen ist das postoperative Outcome, definiert als klinische Verbesserung des neurologischen Zustandes für einen Zeitraum von länger als 12 Monaten, signifikant besser als das Outcome bei konservativ behandelten Patienten (CRAWFORD und DECKER 2017). Ein Therapieerfolg nach der chirurgischen Versorgung bei einer mittleren Überlebenszeit von 630 Tagen konnte in diesem Zusammenhang bei 71,1 % der Patienten festgestellt werden (CRAWFORD und DECKER 2017).

2.2 Die Bandscheibe

Vom zweiten Halswirbel bis hin zum Kreuzbein und auch im Bereich der Schwanzwirbelsäule stellen die Bandscheiben eine Stabilität und Flexibilität garantierende Verbindung zwischen jeweils zwei benachbarten Wirbelkörpern dar (HANSEN 1952, BRAY und BURBIDGE 1998b, COATES 2000) und machen so bei Hunden 17,4 % der Länge der gesamten Wirbelsäule aus (HANSEN 1952). Jede Bandscheibe besteht aus drei Anteilen: Dem Anulus fibrosus, dem Nucleus pulposus und den Endplatten der jeweils benachbarten Wirbelkörper (BRAY und BURBIDGE 1998b, BESALTI et al. 2006, COATES 2000, SMOLDERS und FORTERRE 2015). Entlang der gesamten Wirbelsäule werden die Bandscheiben dorsal durch das Ligamentum longitudinale dorsale begrenzt (COATES 2000). Von der mittleren Brustwirbelsäule an und nach kaudal verlaufend stellt das Ligamentum longitudinale ventrale die ventrale Begrenzung der Bandscheiben dar (COATES 2000). Dorsal der Bandscheiben und Wirbelkörper verläuft das Rückenmark innerhalb des knöchernen Wirbelkanals.

2.2.1 Anulus fibrosus

Der Anulus fibrosus grenzt als fibröser Ring den Nucleus pulposus nach außen hin ab (GRIFFIN et al. 2009, DECKER und FENN 2018, BERGKNUT et al. 2013). Er besteht aus einem Netzwerk konzentrisch angeordneter Kollagenfaserschichten (Kollagenfasern des Typs I), welche fibröse Lamellen ausbilden (DECKER und FENN 2018) und ist in seinem ventralen Anteil zwei- bis dreimal stärker ausgeprägt als in seinem dorsalen Anteil (HANSEN 1952, SMOLDERS und FORTERRE 2015). Mithilfe dieser Lamellen steht der Anulus fibrosus mit den benachbarten Endplatten und den dazugehörigen Wirbeln in straffer Verbindung (GRIFFIN et al. 2009, INOUE 1981, HANSEN 1952). Der innerste Anteil des Anulus fibrosus, auch Transitionszone genannt (HANSEN 1952, BERGKNUT et al. 2013), ist besonders kartilaginös und stellt die Verbindung zum Inneren der Bandscheibe, dem Nucleus pulposus, her (DECKER und FENN 2018, HANSEN 1952, BERGKNUT et al. 2013). Die Hauptfunktion des Anulus fibrosus besteht in der Kompensation von auf die Bandscheibe einwirkenden Zugkräften (SMOLDERS und FORTERRE 2015).

2.2.2 Nucleus pulposus

Der Nucleus pulposus hat in physiologischem Zustand eine mukoide, durchscheinende und gelatinöse Struktur (DECKER und FENN 2018). Er ist oval geformt, kommt innerhalb der Gesamtheit der Bandscheibe zwischen mittlerem und dorsalem Drittel zu liegen und ist somit leicht exzentrisch innerhalb der Bandscheibe angeordnet (HANSEN 1952). Der Nucleus pulposus enthält eine extrazelluläre Matrix aus Proteoglykanen und Wasser (HANSEN 1952, GRIFFIN et al. 2009), in die ein Netzwerk aus kollagenen Fasern (Kollagenfasern des Typ II) eingewoben ist (HANSEN 1952, BRAY und BURBIDGE 1998b, GHOSH et al. 1976). An die Proteoglykane sind Hyaluronsäure-Moleküle aggregiert, sodass insgesamt große und negativ geladene Komplexe innerhalb des Nucleus pulposus entstehen (BERGKNUT et al. 2013). Diese lassen einen starken osmotischen Gradienten entstehen, der Wasser in den Nucleus pulposus hinein diffundieren lässt (BERGKNUT et al. 2013). Wegen des hohen Flüssigkeitsgehalts innerhalb des Nucleus pulposus sowie seiner straffen Begrenzung durch Anulus fibrosus und die Endplatten der benachbarten Wirbelkörper, steht der Nucleus pulposus permanent unter einem hohen Druck (HANSEN 1952, GHOSH et al. 1977b, GHOSH et al. 1977a). Dadurch wird es möglich, dass die Bandscheibe als Ganzes gewissermaßen als Stoßdämpfer während des Bewegungsablaufs fungiert, um kompressiven Kräften entgegenzuwirken (INOUE 1981, SMOLDERS und FORTERRE 2015). Mit fortschreitendem Alter verringert sich der Proteoglykan-Gehalt der Bandscheibe, sodass auch die Wasser-Bindungsfähigkeit des Nucleus pulposus (GHOSH et al. 1976, GHOSH et al. 1977b, GHOSH et al. 1977a) und damit seine Pufferkapazität sinkt.

2.2.3 Endplatten

Die Endplatten sind das Bindeglied zwischen Bandscheibe und Wirbelkörper und grenzen die Bandscheibe zudem nach kranial und kaudal ab (KING und SMITH 1955, DECKER und FENN 2018, SMOLDERS und FORTERRE 2015). Histologisch gesehen bestehen die Endplatten aus hyalinem Knorpel (HANSEN 1952). Ihre besondere Bedeutung besteht in der nutritiven Versorgung der Bandscheibe (BERGKNUT et al. 2013). Kleinere Moleküle, wie z.B. Sauerstoff und Glucose, können durch Diffusion und Osmose durch die Endplatten hindurchtreten, um die Bandscheibe mit Nährstoffen zu versorgen (HOLM et al. 1981, BERGKNUT et al. 2013).

2.3 Diskopathie

2.3.1 Ein Überblick

Die Degeneration von Bandscheiben ist ein komplexer und multifaktoriell bedingter Prozess, in dessen Verlauf es zu einer veränderten Zusammensetzung von Zellen und extrazellulärer Matrix innerhalb jeden Bandscheibenanteils kommt (BERGKNUT et al. 2013). Obwohl die Bandscheibendegeneration häufig ein Zufallsbefund ohne klinische Relevanz ist (HANSEN 1952, BERGKNUT et al. 2013), vermag es

die degenerierte Bandscheibe weniger gut, kompressiven oder tordierenden Kräften zu widerstehen, so dass der Weg hin zur Extrusion oder Protrusion bereitet ist (HANSEN 1952, BERGKNUT et al. 2013, MAYHEW et al. 2004, SMOLDERS und FORTERRE 2015). Die Degeneration einer Bandscheibe führt zudem zu Veränderungen der diskogenen viskoelastischen Eigenschaften, so dass Anulus fibrosus, Facettengelenke und andere passiv Stabilität gebende Strukturen wie Bänder und Gelenkkapseln der Facettengelenke unter erhöhter Beanspruchung stehen und schließlich ebenfalls degenerieren (HEDIGER et al. 2009). Instabilitäten des jeweils betroffenen Segments können die Folge sein (HEDIGER et al. 2009).

Obwohl der Vorfall einer Bandscheibe häufig das Resultat einer Bandscheibendegeneration ist, kann es auch infolge extremer Beanspruchung oder infolge eines Traumas zum Vorfall von Bandscheiben kommen (SMOLDERS und FORTERRE 2015). Da der Anulus fibrosus in seinem dorsalen Anteil dünner ist als in seinem ventralen Anteil und sich der Nucleus pulposus leicht exzentrisch innerhalb der Bandscheibe befindet, besteht eine Prädisposition zum Vorfall der Bandscheibe dorsal in Richtung des Wirbelkanals (DECKER und FENN 2018, KING und SMITH 1955, HANSEN 1952). Treten dann tatsächlich Bandscheibenvorfälle auf, so führen sie, je nach vorliegendem Typ, entweder akut oder chronisch zu einer Kompression des Myelons (GRIFFIN et al. 2009). Neben der kompressiven Komponente sind jedoch auch Kontusionen des Rückenmarks, meningeale Irritationen oder Einengungen der Nervenwurzeln als Folge möglich (LEVINE et al. 2007b). Die Entstehung verschiedenster neurologischer Symptome in unterschiedlichen Schweregraden ist die Folge (COATES 2000).

Erstmalig wurden Bandscheibenvorfälle 1952 entsprechend ihrer Pathogenese in zwei Gruppen eingeteilt (HANSEN 1952). Fortan wurde die Hansen Typ I Diskopathie, oder auch Nucleus pulposus Extrusion, von der Hansen Typ II Diskopathie, oder auch Anulus fibrosus Protrusion, unterschieden (HANSEN 1952). Im Laufe der darauffolgenden Jahre konnten noch weitere Formen des Bandscheibenvorfalles identifiziert werden.

2.3.2 Hansen Typ I Diskopathie – Extrusion des Nucleus pulposus

Als Nucleus pulposus Extrusion wird ein Bandscheibenvorfall bezeichnet, wenn er infolge einer vollständigen Ruptur des Anulus fibrosus entsteht und mit einem Vorfall des degenerierten Nucleus pulposus in den Wirbelkanal einhergeht (HANSEN 1952). Eine Bandscheibenextrusion steht mit der chondroiden Metaplasie der Bandscheibe in Verbindung und tritt akut auf (HANSEN 1952). Das vorgefallene Bandscheibenmaterial verteilt sich in der Regel ventrolateral innerhalb des Wirbelkanals (HANSEN 1952, BESALTI et al. 2006) und führt häufig zu einer lateralisierten Myelokompression. Im Rahmen der Extrusion des Nucleus pulposus kommt es in der Regel auch zu Konkussionen oder zu

Kontusionen des Rückenmarks, wenn infolge der Verletzung des Venensinus epidurale Einblutungen entstehen (GRIFFIN et al. 2009).

2.3.3 Hansen Typ II Diskopathie – Protrusion des Anulus fibrosus

Auch der Protrusion des Anulus fibrosus geht eine Degeneration der Bandscheibe voraus (HANSEN 1952). Diese entsteht infolge einer fibroiden Metaplasie der betroffenen Bandscheibe (HANSEN 1952). Rupturiert der innere Anteil des Anulus fibrosus, so kann ein Teil des Nucleus pulposus in den Anulus fibrosus vorfallen, so dass dieser hypertrophiert (HANSEN 1952). Die daraus resultierende Protrusion der Bandscheibe führt zu einer chronischen Myelokompression von ventral und tritt am häufigsten bei älteren Hunden großer Rassen auf (HANSEN 1952, GRIFFIN et al. 2009).

2.3.4 Akute, nicht kompressive Nucleus pulposus Extrusion

Eine akute, nicht kompressive Nucleus pulposus Extrusion, auch ANNPE, Typ III Diskopathie, traumatische Bandscheibenextrusion, Bandscheibenexplosion oder High-velocity low-volume Bandscheibenextrusion genannt (FENN und OLBY 2020), führt infolge einer plötzlichen Extrusion des nicht degenerierten Nucleus pulposus zu einer Rückenmarkskontusion (RISIO et al. 2009, FENN et al. 2016, DECKER und FENN 2018). Dabei kommt es zu keiner signifikanten Myelokompression (FENN et al. 2016, RISIO et al. 2009, DECKER und FENN 2018), da das vorfallende Bandscheibenmaterial bei dieser Art des Bandscheibenvorfalles gut hydriert ist und somit in der Regel schnell resorbiert oder innerhalb des Wirbelkanals verteilt werden kann (RISIO 2015, MANUNTA et al. 2015, DECKER und FENN 2018). Der klinische Verlauf ist perakut und steht häufig in Zusammenhang mit zuvor erfolgter starker physischer Belastung oder einem Wirbelsäulentrauma (RISIO et al. 2009, FENN et al. 2016, TAYLOR-BROWN und DECKER 2017, DECKER und FENN 2018). Durch dabei entstandene kleine Risse innerhalb des Anulus fibrosus wird eine Extrusion des Nucleus pulposus nach dorsal in den Wirbelkanal ermöglicht (DECKER und FENN 2018, RISIO 2015). Am häufigsten tritt diese Diskopathie-Form bei mittelalten Hunden großer Rassen auf (FENN et al. 2016). Border Collies und Windhunde scheinen dabei überrepräsentiert zu sein (FENN et al. 2016). Obwohl Patienten in Zusammenhang mit dieser Erkrankung bisher ausschließlich konservativ behandelt werden können, ist die Prognose bei einem positiven Outcome von 66,7 % bis 100 % als günstig zu bezeichnen (RISIO et al. 2009, MCKEE et al. 2010, FENN et al. 2016, CHANG et al. 2007, DECKER und FENN 2018).

2.3.5 Akute, kompressive Hydrated Nucleus pulposus Extrusion

Auch bei einer akuten, kompressiven Hydrated Nucleus pulposus Extrusion, oder Bandscheibenzyste (FENN und OLBY 2020), kommt es akut zu einem Vorfall des gut hydrierten Nucleus pulposus (BELTRAN et al. 2012, KONAR et al. 2008, DECKER und FENN 2018). Im Unterschied zur akuten, nicht

kompressiven Nucleus pulposus Extrusion wird hierbei jedoch das Rückenmark durch vorgefallenes Bandscheibenmaterial komprimiert (BELTRAN et al. 2012). Die Pathophysiologie dieser Bandscheibenerkrankung ist aktuell noch weitestgehend unbekannt (DECKER und FENN 2018, DOLERA et al. 2015). Es wird jedoch angenommen, dass das Bandscheibenmaterial durch kleine Fissuren innerhalb des Anulus fibrosus in den Wirbelkanal vorfällt (DOLERA et al. 2015, DECKER und FENN 2018). Besonders gehäuft tritt diese Art von Bandscheibenvorfällen im Bereich der Halswirbelsäule auf (DECKER und FENN 2018, BELTRAN et al. 2012). Es besteht eine gute Prognose, unabhängig von chirurgischer oder konservativer Behandlung (BELTRAN et al. 2012, MANUNTA et al. 2015, KONAR et al. 2008, KAMISHINA et al. 2010).

2.3.6 Schmorl Knoten

Bei einem Schmorl Knoten kommt es zu einer Herniation der Bandscheibe in benachbarte Wirbelkörper durch die Endplatte des betroffenen Wirbels hindurch (RESNICK und NIWAYAMA 1978, BALTZER et al. 2012). Schmorl Knoten sind häufig radiologische Zufallsbefunde (TAKAHASHI et al. 1995). Sie können jedoch auch mit Symptomen wie spinale Dolenz oder Schmerzen bei der Palpation der Wirbelsäule vergesellschaftet sein (GASCHEN et al. 1995, TAKAHASHI et al. 1995, BALTZER et al. 2012). Abhängig von der Lokalisation der Bruchpforte, an der das Bandscheibenmaterial in den Wirbelkörper vorfällt, unterscheidet man zentralen und retromarginalen Schmorl Knoten von einander (RESNICK und NIWAYAMA 1978, GASCHEN et al. 1995).

2.4 Operationsmethoden an der Brust- und Lendenwirbelsäule des Hundes

Ziel eines neurochirurgischen Eingriffs an der Wirbelsäule zur Behandlung eines Bandscheibenvorfalles ist eine bestmögliche Dekompression des Myelons bei gleichzeitig größtmöglicher Schonung des Rückenmarks vor iatrogenen Schädigung im Rahmen intra- und postoperativer Komplikationen (SANTIFORT 2020, COATES 2000). Um dieses Ziel zu erreichen, kann der Neurochirurg je nach Lokalisation und Typ des Bandscheibenvorfalles aus verschiedenen Operationsmethoden wählen. Fallspezifisch kann es auch notwendig sein, verschiedene Operationsmethoden miteinander zu kombinieren (SANTIFORT 2020, MEDL et al. 2017).

2.4.1 Hemilaminektomie

Bei der Hemilaminektomie handelt es sich um eine der zwei am häufigsten eingesetzten Operationsmethoden zur chirurgischen Dekompression des Myelons im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäule (HUSKA et al. 2014a). Sie kommt besonders bei akuten, lateralisierten Bandscheibenvorfällen des Hansen Typ I zum Einsatz (BRAY und BURBIDGE 1998b, BESALTI et al. 2006). Nach Anlegen des Weichteilzugangs wird durch die einseitige Entfernung des Facettengelenks sowie

von Anteilen der Lamina und des Pedikels eine Dekompression und Darstellung des Rückenmarks von lateral ermöglicht (YOVICH et al. 1994, HUSKA et al. 2014a).

2.4.2 Mini-Hemilaminektomie und Pedikelektomie

Auch die Mini-Hemilaminektomie gehört zu den zwei dekomprimierenden Operationsmethoden, die am häufigsten Anwendung in der Neurochirurgie der Brust- und Lendenwirbelsäule finden (HUSKA et al. 2014a). Sie wurde erstmalig von BRAUND et al. (1976) beschrieben (BRAUND et al. 1976). Im Unterschied zur Hemilaminektomie werden bei dieser Operationsmethode Facettengelenk sowie Lamina belassen (JEFFERY 1988, MCCARTNEY 1997, BRAUND et al. 1976). Lediglich im Bereich der Pedikel und des Neuroforamens zweier benachbarter Wirbel wird mithilfe einer Fräse Knochen entfernt, um von lateral Einsicht in den ventralen Wirbelkanal zu erhalten und vorgefallenes Bandscheibenmaterial entfernen zu können (JEFFERY 1988, MCCARTNEY 1997). In ihrer Studie von 2017 konnten SVENSSON et al. eine signifikant bessere Dekompression des Myelons durch diese Operationsmethode als nach der Durchführung einer Hemilaminektomie feststellen (SVENSSON et al. 2017).

Bei der Pedikelektomie wird, im Gegensatz zur Mini-Hemilaminektomie, lediglich der pedikuläre Knochen eines Wirbels entfernt. Die Neuroforamen bleiben somit einseitig intakt (MCCARTNEY 1997).

2.4.3 Foraminotomie

Die Foraminotomie wurde speziell zur Dekompression nervaler Strukturen innerhalb des Neuroforamens entwickelt (GÖDDE und STEFFEN 2007). Dazu wird nach der Anlegung eines dorsalen Zugangs zur Wirbelsäule eine Fräsöffnung angelegt, deren Abmessungen vom dorsalen Anteil des Transversalfortsatzes bis hin zur Basis des kranialen Gelenkfortsatzes sowie vom kaudodorsalen Ursprung des Querfortsatzes bis hin zur Austrittszone des Neuroforamens reicht (GÖDDE und STEFFEN 2007). Das Neuroforamen wird somit in alle Richtungen vergrößert. Als vollständig gilt die Dekompression bei dieser Operationstechnik, wenn die jeweilige Nervenwurzel frei innerhalb des Neuroforamens zu liegen kommt und sie für wenige Millimeter in laterale und kraniale Richtung bewegt werden kann (GÖDDE und STEFFEN 2007).

2.4.4 Dorsale Laminektomie

Bei der dorsalen Laminektomie wird der entsprechende Dornfortsatz nach der Entfernung muskulärer Ansätze mittels Rongeur oder Knochenzange abgesetzt (DEWEY 2020a, DEWEY 2019). Danach wird eine Fräsöffnung gesetzt, deren Länge der gesamten Länge des Wirbelkörpers entspricht (DEWEY 2020a). Lateral reicht die Fräsöffnung beidseitig bis an die Processus articulares des Wirbels heran (DEWEY 2020a).

2.4.5 Partielle Laterale Korpektomie

Die Partielle Laterale Korpektomie wurde als Operationsmethode erstmals im Jahre 2004 durch MOISSONNIER et al. (MOISSONNIER et al. 2004) beschrieben. Ihren Einsatz findet diese Methode seither vorwiegend bei der chirurgischen Versorgung chronischer Bandscheibenvorfälle des Hansen Typ I oder II, denen eine Myelokompression durch meist sehr derbes Bandscheibenmaterial von ventral oder ventral mit geringgradiger links- oder rechtslateraler Seitenbetonung gemein ist (MOISSONNIER et al. 2004). Am häufigsten sind die Zwischenwirbelspalten Th13-L1 (27,5 - 29,2 %), Th12-Th13 (23,2 %) und L1-L2 (21,9 %) von Bandscheibenvorfällen betroffen, die einer chirurgischen Versorgung durch eine Partielle Laterale Korpektomie bedürfen (SALGER et al. 2014, FLEGEL et al. 2011, FERRAND et al. 2015). Das mittlere Alter der durch Partielle Laterale Korpektomien versorgten Patienten liegt bei acht Jahren (FLEGEL et al. 2011, FERRAND et al. 2015). In verschiedenen Studien sind Dackel (33 % bis 37,5 % der Patienten) und Deutsche Schäferhunde (12,5 % bis 21,5 % der Patienten) die am häufigsten neurochirurgisch durch eine Partielle Laterale Korpektomie versorgten Patienten (FLEGEL et al. 2011, SALGER et al. 2014, FERRAND et al. 2015).

2.4.5.1 Operationstechnik und Slot-Morphometrie bei der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie

Die Partielle Laterale Korpektomie wird definiert als lateraler Zugang zum Wirbelkanal durch jeweils zwei Epiphysen und angrenzende Anteile der Wirbelkörper benachbarter Wirbel sowie durch die dazwischenliegende Bandscheibe (MOISSONNIER et al. 2004). Die Orientierungspunkte zur Anlegung der Fräsöffnung im Knochen sind nach der Weichteilpräparation in kraniokaudaler Richtung das kaudale Viertel des kranialen Wirbelkörpers sowie das kraniale Viertel des kaudalen Wirbelkörpers (MOISSONNIER et al. 2004). Die dorsale Begrenzung der Fräsöffnung wird durch den Wirbelkanal selbst gebildet (MOISSONNIER et al. 2004). Die ventrale Begrenzung ist die Hälfte der Wirbelkörperhöhe (MOISSONNIER et al. 2004). Die Tiefe der Fräsöffnung sollte die Hälfte bis zwei Drittel der Breite des Wirbelkörpers einnehmen (MOISSONNIER et al. 2004). Sind die knöchernen Begrenzungen des Slots nach der Weichteilpräparation dargestellt, kann mit dem Fräsen des Slots unter kontinuierlicher Spülung begonnen werden. Während die kraniale und kaudale Länge des Slots sowie die Slotthöhe keinen Einfluss auf den Grad der Dekompression des Myelons zu haben scheinen, ist die Slottiefe in diesem Zusammenhang ein Faktor größter Bedeutung (FLEGEL et al. 2011). So empfehlen FLEGEL et al. (2011), sich an einer Tiefe der Fräsöffnung von zwei Dritteln der Wirbelkörperbreite zu orientieren (FLEGEL et al. 2011), um eine adäquate Dekompression des Myelons zu erreichen. Dafür sollte die entsprechende Slottiefe präoperativ in computer- oder kernspintomographischen Bildern bestimmt und intraoperativ während des Fräsens regelmäßig überprüft werden (FLEGEL et al. 2011). Auf diese

Weise kann ein Über- oder Unterschätzen der Slottiefe durch den Neurochirurgen verhindert werden (FLEGEL et al. 2011). In zwei Studien, in denen postoperativ die Dimensionen der Partiellen Lateralen Korpektomien evaluiert wurden, konnten mittlere Slottiefen von 64,1 % bis 64,8 % der Wirbelkörperbreite gemessen werden (SALGER et al. 2014, FLEGEL et al. 2011). Ist der knöcherner Slot angelegt, so muss das Ligamentum longitudinale dorsale durch die Fräsöffnung hindurch durchtrennt werden, um den Wirbelkanal zufriedenstellend einsehen und das Rückenmark dekomprimieren zu können. Nach der Eröffnung des Wirbelkanals und der Entfernung des das Rückenmark komprimierenden, degenerierten Bandscheibenmaterials beurteilt der Neurochirurg intraoperativ anhand instrumenteller Palpation entlang des Wirbelkanalbodens sowie durch visuelle Beurteilung der Positionierung des Rückenmarks innerhalb des Wirbelkanals den Dekompressionsgrad des Rückenmarks (FERRAND et al. 2015, FLEGEL et al. 2011). Eine akkurate Beurteilung der infolge der chirurgischen Intervention erzielten Dekompression des Rückenmarks kann jedoch nur anhand einer postoperativen Computer- oder Kernspintomographie erfolgen (FERRAND et al. 2015).

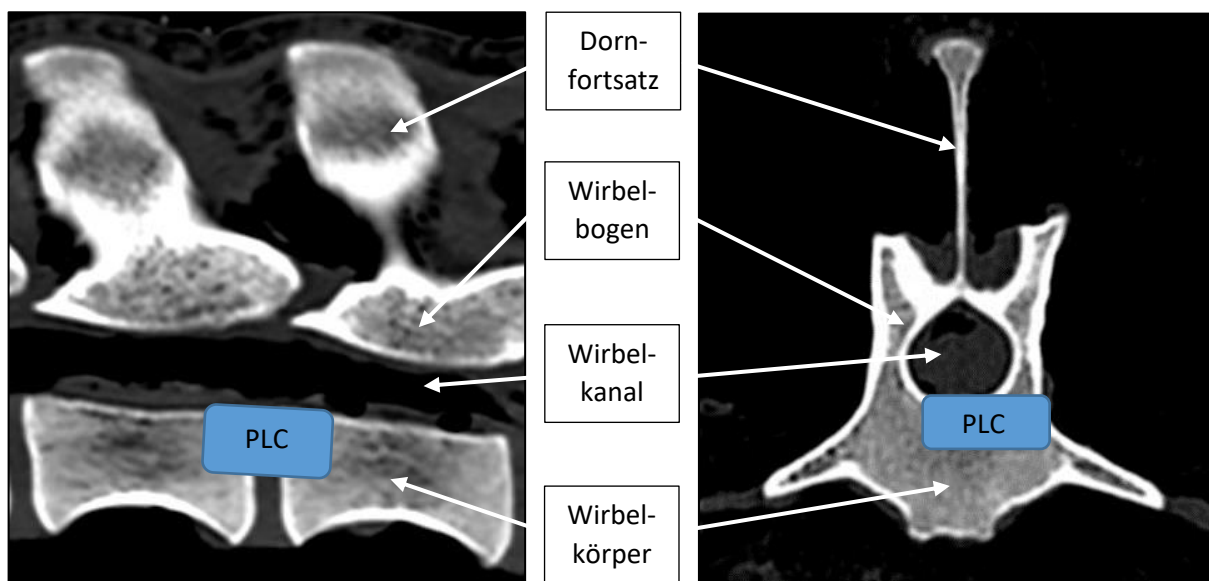


Abbildung 1: Illustration der dorsoventralen und kraniokaudalen Abmessungen einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) anhand einer Computertomographie des dritten und vierten Lendenwirbels in sagittaler Schnittebene

Abbildung 2: Illustration der dorsoventralen und laterolateralen Abmessungen einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) anhand einer Computertomographie des dritten Lendenwirbels in transversaler Schnittebene

Im Rahmen der Forderung nach einer postoperativen Reduktion der Morbidität bei mindestens gleich gutem postoperativen Outcome wird auch eine endoskopisch assistierte, minimal-invasive

Durchführung der Partiellen Lateralen Korpektomie diskutiert (CAROZZO et al. 2011). In der Kadaverstudie von CAROZZO et al. (2011) konnte gezeigt werden, dass aufgrund der guten intraoperativen Sichtverhältnisse durch die Nutzung einer endoskopischen Assistenz das Risiko iatrogener Gefäß- oder Nervenwurzel-Schäden reduziert werden konnte (CAROZZO et al. 2011). Auch das Weichteiltrauma fiel deutlich geringer aus als im Rahmen des klassischen Weichteilzugangs einer Partiellen Lateralen Korpektomie, da die Hautinzision kleiner gewählt und die Präparation entlang der Muskulatur stumpf erfolgen konnte (CAROZZO et al. 2011). Zudem folgerten die Autoren, dass aufgrund der geringeren Weichteilmanipulation die Stabilität der Wirbelsäule infolge der Operation weniger in Mitleidenschaft gezogen würde (CAROZZO et al. 2011). Ein Fallbericht aus dem Jahr 2019 beschreibt auch die positive klinische Anwendung der minimalinvasiven Dekompression eines lumbalen Bandscheibenvorfalles (GUEVAR und OLBY 2019). Die Protrusion der Bandscheibe zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel wurde als Auslöser der gehfähigen Paraparese, der Ataxie der Hintergliedmaßen, der spinalen Dolenz, Kyphose und der propriozeptiven Defizite der Hintergliedmaßen des Patienten identifiziert und durch eine Foraminotomie und Partielle Laterale Korpektomie mikrochirurgisch versorgt (GUEVAR und OLBY 2019). Trotz Identifikation residualen Bandscheibenmaterials innerhalb des zuvor operierten Wirbelsäulenbereichs in einer Kontrollkernspintomographie sieben Wochen postoperativ normalisierte sich der neurologische Zustand des Patienten innerhalb von sechs Wochen vollständig (GUEVAR und OLBY 2019). In den klinisch-praktischen Alltag hat diese minimalinvasive Operationsmethode bisher jedoch noch keinen Einzug gehalten.

2.4.5.2 Ziele und Risiken der Partiellen Lateralen Korpektomie

Ziel der Partiellen Lateralen Korpektomie ist es, einen ventralen Zugang zum Wirbelkanal zu kreieren und das Rückenmark dadurch zu dekomprimieren (FLEGEL et al. 2011). Vorteil dieser Herangehensweise ist das Erreichen einer adäquaten ventralen Dekompression des Myelons bei gleichzeitig bestmöglicher Schonung des Rückenmarks vor iatrogener Schädigung während des chirurgischen Eingriffs (MOISSONNIER et al. 2004, FLEGEL et al. 2011). Sowohl die intensive intraoperative Manipulation als auch die unvollständige Dekompression des Rückenmarks könnte zu einer postoperativen Verschlechterung des neurologischen Zustandes des Patienten führen oder eine Verbesserung des neurologischen Zustandes postoperativ verhindern (MOISSONNIER et al. 2004, SALGER et al. 2014). Besteht eine Myelokompression durch degeneriertes Bandscheibenmaterial bereits chronisch (länger als drei Wochen), kann es zu Verklebungen zwischen vorgefallenem Bandscheibenmaterial und der Dura mater, dem Ligamentum longitudinale dorsale oder dem vertebralen Venensinus kommen (FERRAND et al. 2015). Das intraoperative Ziel, eine möglichst

vollständige Dekompression des Rückenmarks zu erreichen, ist besonders in diesen Fällen eng mit einer intensiveren Manipulation des Rückenmarks verbunden (SALGER et al. 2014). Unter Umständen folgt dieser Manipulation eine temporäre Verschlechterung des neurologischen Zustandes der Patienten unmittelbar postoperativ (SALGER et al. 2014). In der Studie von SALGER et al. (2014) zeigten 18,7 % (n = 12) der Patienten am ersten Tag nach chirurgischer Versorgung eines Bandscheibenvorfalles durch eine Partielle Laterale Korpektomie eine temporäre Verschlechterung im Vergleich zum präoperativen neurologischen Zustand. Über einen Zeitraum von vier Wochen reduzierte sich die Anzahl der Patienten mit einer postoperativen Verschlechterung ihres neurologischen Zustandes auf 3,8 % (n = 2).

Durch die Lokalisation des Slots genau auf Höhe der Bandscheibe wird diese während der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie ohne zusätzlichen chirurgischen Aufwand zeitgleich fenestriert (MOISSONNIER et al. 2004). Das Risiko für ein erneutes Vorfällen degenerierten Bandscheibenmaterials an dem bereits durch eine Partielle Laterale Korpektomie operierten Zwischenwirbelspalt kann somit minimiert werden (FLEGEL et al. 2011). Dennoch zeigten in der Studie von FERRAND et al. (2015) 23,3 % (n = 25) der Studienpatienten postoperativ rekurrende neurologische Defizite, die zu 6,5 % (n = 7) auf den erneuten Vorfall von Bandscheibenmaterial an der zuvor mittels Partieller Lateralen Korpektomie operierten Lokalisation zurückzuführen waren (FERRAND et al. 2015). Die Autoren sahen hier jedoch eher eine inadäquate Dekompression während der ersten Operation als ursächlich an (FERRAND et al. 2015). Eine ungenügende Dekompression des Myelons auf Höhe des Slots konnte in der Studie von FLEGEL et al. (2011) bei 9 % (n = 5) der Studienpatienten in der postoperativ durchgeführten Computertomographie festgestellt werden. Bei insgesamt 19 % (n=10) der Hunde dieser Studie wurde der Slot unmittelbar nach Evaluierung postoperativ entstandener computertomographischer Bilder chirurgisch revidiert. Die kompressive Komponente ging dabei entweder auf eine Restkompression durch degeneriertes Bandscheibenmaterial oder auf die postoperative Formation eines Hämatoms zurück (FLEGEL et al. 2011).

Besonders bei großen Hunden ist es herausfordernd, während der Schaffung des Weichteilzugangs die paraspinale Muskulatur derart ventral zu retrahieren, dass ein Fräsen parallel zum Boden des Wirbelkanals möglich wird (JEFFERY et al. 2018). Aufgrund der eingeschränkten Sicht in den Wirbelkanal während der Operation, ist die Verletzung der vertebralen Venensinus während des FräSENS des Slots eine der häufigsten Komplikationen (SALGER et al. 2014, FLEGEL et al. 2011). Blutungen aus dem Venensinus treten bei insgesamt 24,3 % bis 25 % aller Operationen auf (SALGER et al. 2014, FERRAND et al. 2015), führen aber in der Regel zu keinem lebensbedrohlichen Blutverlust

(JEFFERY et al. 2018). In Zusammenhang mit intraoperativen Verletzungen des vertebrale Venensinus wurde jedoch das Risiko der Entstehung von Luft-Emboli beschrieben (MORTERA-BALSA et al. 2017). Um postoperativ die Formation von myelokompressiv wirkenden Hämatomen zu verhindern, erscheint eine intraoperative Hämostase als besonders wichtig (FLEGEL et al. 2011). Besonders während des Fräsens kurz vor Durchbruch in den Wirbelkanal, während der Entfernung des Ligamentum longitudinale dorsale oder der Entfernung vorgefallenen Bandscheibenmaterials aus dem Wirbelkanal droht nicht nur die Gefahr von Verletzungen der vertebrale Venensinus, sondern es besteht auch die Gefahr von Lacerationen der Dura mater, von Verletzungen spinaler Nerven (SALGER et al. 2014) oder des Rückenmarks selbst (FLEGEL et al. 2011). Bei insgesamt 8,3 % aller Operationen aus der von SALGER et al. (2014) veröffentlichten Studie wurde eine Nervenwurzel verletzt. Auch in der Studie von FERRAND et al. (2015) traten in 5,6 % der Operationen Nervenwurzelschäden auf. Da jedoch die Entfernung des Ligamentum longitudinale dorsale und auch die Entfernung vorgefallenen Bandscheibenmaterials aus dem Wirbelkanal für den Operationserfolg unerlässlich scheint, raten die Autoren um FLEGEL et al. (2011) zur Fortführung der Operation bis das Myelon frei innerhalb des gesamten Slots sichtbar und kein Widerstand bei Palpation innerhalb des Wirbelkanals mehr nachvollziehbar ist (FLEGEL et al. 2011). Finden Partielle Laterale Korpektomien im Bereich der Brustwirbelsäule statt, so besteht die Möglichkeit einer Verletzung der ventral der Brustwirbel gelegenen Pleura costalis. In der Folge können Patienten einen Pneumothorax entwickeln (FERRAND et al. 2015).

2.4.5.3 Prognostische Faktoren und Outcome nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie

Liegt bei Hansen-Typ-I- oder Hansen-Typ-II-Diskopathien eine ventrale Myelokompression mit chronischer Vorgeschichte vor, so werden beide Diskopathie-Typen in der Regel durch eine Partielle Laterale Korpektomie chirurgisch versorgt. Überwiegend findet die Partielle Laterale Korpektomie ihren Einsatz jedoch in der Dekompression von Hansen-Typ-II-Diskopathien. Einige Autoren stellten einen prognostischen Unterschied in Bezug auf das postoperative Outcome zwischen den beiden Diskopathie-Typen fest. Patienten mit eher akutem Auftreten der Symptome zeigten postoperativ eine schnellere Regression der Symptome als Patienten mit chronischem Krankheitsgeschehen (SALGER et al. 2014). Eine mögliche Ursache sehen die Autoren in unterschiedlichen Pathomechanismen. Während bei einer chronischen Protrusion der Bandscheibe das Myelon langsam komprimiert wird und Ischämien sowie Axondegeneration folgen, gehen akut auftretende Bandscheibenvorfälle häufiger mit Kontusionen des Rückenmarks einher (FERRAND et al. 2015). Bezogen auf den neurologischen Zustand der Patienten zeigten SALGER et al. (2014), dass ein signifikanter

Zusammenhang zwischen prä- und postoperativem neurologischen Zustand existiert. Initial nicht gehfähige Hunde verbesserten ihren postoperativen Zustand mit höherer Wahrscheinlichkeit, als initial gehfähige Hunde. Dennoch wurde in dieser Studie bei insgesamt 64,2 % der Hunde innerhalb von vier Wochen nach der Operation ein verbesserter neurologischer Zustand festgestellt. Innerhalb eines Zeitraums von 6 Monaten verbesserte sich der neurologische Zustand sogar bei insgesamt 93,3 % der in die Studie eingeschlossenen Patienten (SALGER et al. 2014). Auch FERRAND et al. (2015) stellten Ähnliches fest. Der präoperative Grad neurologischer Defizite hing auch in dieser Studie signifikant mit dem postoperativen Outcome zusammen. Postoperativ zeigten mehr Hunde eine Verbesserung ihres neurologischen Zustandes, die zuvor nicht gehfähig gewesen waren als Hunde, bei denen die Gehfähigkeit präoperativ noch vorhanden war (FERRAND et al. 2015). Während einer Kontrolluntersuchung nach mindestens sechs Monaten zeigten sich 91,4 % der Hunde gehfähig und 74,3 % der Hunde von besserem neurologischen Zustand als präoperativ (FERRAND et al. 2015). Eine postoperative Verschlechterung des neurologischen Zustandes, die noch mindestens sechs Monate nach der Operation Fortbestand hatte, stellte sich hingegen bei 2,8 % der mittels Partieller Lateraler Korpektomie operierten Patienten ein (FERRAND et al. 2015).

In der 2014 von SALGER et al. veröffentlichten Studie wurde das postoperative Ergebnis von insgesamt 72 Patienten evaluiert, die aufgrund einer Myelokompression von ventral eine Partielle Laterale Korpektomie erfahren hatten. Eingeschlossen wurden hier sowohl Patienten mit Hansen-Typ-I- als auch mit Hansen-Typ-II-Diskopathie. Als bedeutend in Hinblick auf die postoperative Verbesserung des neurologischen Zustandes sahen die Autoren hier eine möglichst vollständige Dekompression des Myelons an. Kritisch wurde jedoch auch diskutiert, dass bisher noch nicht vollumfassend beantwortet sei, wie viel Restkompression postoperativ tolerabel sei und ab wann eine chirurgische Revision zu erfolgen habe (SALGER et al. 2014). In der postoperativ durchgeführten Computertomographie konnte das Myelon bei über 61 % der betroffenen Zwischenwirbelspalten als vollständig und bei über 35 % der betroffenen Zwischenwirbelspalten als gut dekomprimiert bezeichnet werden (SALGER et al. 2014). Die Autoren um FLEGEL et al. (2011) bezeichneten eine Partielle Laterale Korpektomie immer dann als erfolgreich, wenn die Restkompression an der chirurgisch versorgten Lokalisation in einer postoperativ durchgeführten Myelo-Computertomographie unter 15 % betrug. Dieser Zustand wurde in dieser Studie bei 90 % der Patienten erreicht (FLEGEL et al. 2011). Ob eine Dekompression als erfolgreich eingestuft werden kann, scheint von verschiedenen Faktoren abzuhängen. Vor allem der Lokalisation des Bandscheibenvorfalles scheint eine größere Bedeutung zuzukommen. Während im Bereich der Lendenwirbelsäule (L1 bis L5) in 100 % der Fälle eine gute oder sogar vollständige Dekompression des Myelons durch eine Partielle Laterale Korpektomie erreicht werden kann, liegt die

Wahrscheinlichkeit einer guten oder vollständigen Dekompression im Bereich der Brustwirbelsäule (Th11 bis L1) nur bei 80,6 % (FLEGEL et al. 2011). Als Ursache hierfür nennen die Autoren die Interferenz der Rippen mit dem lateralen Zugang zur Brustwirbelsäule (FLEGEL et al. 2011). Verhindert die kranial des betroffenen Zwischenwirbelspaltes gelegene Rippe ein horizontales Fräsen des Slots, so muss die Exartikulation oder Resektion der Rippe in Betracht gezogen werden (FLEGEL et al. 2011). Das horizontale Anlegen des Operationsslots parallel zum Wirbelkanalboden stellt für den Neurochirurgen stets eine Herausforderung dar, da eine intraoperative Orientierung allein anhand des Operationssitus nur schwer realisierbar ist (FLEGEL et al. 2011). Häufig weicht der Slot deswegen nach ventral ab (FLEGEL et al. 2011). Obwohl bisher keine Korrelation zwischen Winkelung des Slots und Dekompression des Rückenmarks festgestellt werden konnte, erhöht eine größere Deviation von der Horizontalen des Wirbelkanalbodens dennoch das Risiko für eine schlechtere Dekompression (FLEGEL et al. 2011). Um möglichst horizontal Fräsen zu können, empfiehlt sich eine Lagerung des Patienten in Seitenlage, so dass die Ebene des Wirbelkanalbodens genau im rechten Winkel zum Operationstisch verläuft (FLEGEL et al. 2011).

2.5 Biomechanik der Wirbelsäule nach chirurgischen Eingriffen

Werden während chirurgischer Eingriffe an der Wirbelsäule aktiv oder passiv Stabilität gebende Strukturen teilweise oder vollständig reseziert, so geht dies mit einer Verminderung der Wirbelsäulenstabilität einher. Innerhalb eines Patienten treten einzelne Bandscheibenvorfälle häufiger auf als multiple Bandscheibenvorfälle (GUO et al. 2020). Dennoch ist es möglich, dass neurologische Defizite infolge multipler Bandscheibenvorfälle mit ähnlichem Grad an signifikanter Myelokompression auftreten (GUO et al. 2020, AIKAWA et al. 2012b, FLEGEL et al. 2016, AIKAWA et al. 2012a). In diesen Fällen empfehlen einige Autoren, in Abhängigkeit von der jeweils anzuwendenden Operationsmethode, alle herniierten Bandscheiben chirurgisch zu versorgen, um eine adäquate Dekompression des Myelons zu erreichen (GUO et al. 2020, FAUBER et al. 2006). Auch die breitflächige, diffuse Verteilung herniierten Bandscheibenmaterials innerhalb des Wirbelkanals (v.a. bei Hansen Typ I Bandscheibenvorfällen) kann es notwendig machen, mehrere Zwischenwirbelbereiche chirurgisch anzugehen. Nicht immer treten multiple Bandscheibenvorfälle auch zeitgleich auf. So besteht die Möglichkeit, dass sich nach chirurgischer Versorgung eines Bandscheibenvorfalles einige Zeit später weitere Bandscheibenvorfälle manifestieren, die ebenfalls einer chirurgischen Versorgung bedürfen (AIKAWA et al. 2012b, DHUPA et al. 1999). Berücksichtigung bei der chirurgischen Dekompression multipler Bandscheibenvorfälle sollte finden, dass sich die die Wirbelsäule destabilisierenden Effekte mehrerer Operationen an der Wirbelsäule addieren (FAUBER et al. 2006). Diese Reduktion der Stabilität führt nicht zwangsläufig zu einer klinisch relevanten

Wirbelsäuleninstabilität, kann jedoch, je nach Ausprägungsgrad, durchaus den neurologischen Zustand des betroffenen Patienten beeinträchtigen. Symptome wie spinale Schmerzen, Gangstörungen, propriozeptive Defizite oder Reflexdefizite können die Folge dessen sein (LEMARIÉ et al. 2000). Eine spinale Instabilität zu diagnostizieren ist häufig schwierig; besonders in Fällen, in denen als einziges Symptom die postoperative Verbesserung des neurologischen Zustands ausbleibt (LEMARIÉ et al. 2000). In diesen Fällen kann es sein, dass spinale Instabilitäten sogar nur als Zufallsbefunde während Röntgenuntersuchungen aus anderen Indikationen heraus detektiert werden (LEMARIÉ et al. 2000) (z.B. Detektion von Wirbelsäulenluxationen während des Thoraxröntgens im Rahmen der diagnostischen Aufarbeitung einer Aspirationspneumonie). Einige Autoren vermuten deswegen, dass spinale Instabilitäten infolge chirurgischer Wirbelsäuleneingriffe unterdiagnostiziert sein könnten (LEMARIÉ et al. 2000). Der Verdacht auf spinale Instabilitäten ist leichter zu stellen, wenn sich nach initialer Verbesserung des neurologischen Zustandes nach einer Operation der neurologische Zustand plötzlich wieder verschlechtert (LEMARIÉ et al. 2000). Zu spinalen Instabilitäten kann es postoperativ jederzeit spontan, aber auch infolge traumatischer Insulte kommen. Häufig scheinen sie in der ersten Woche nach der Operation aufzutreten (LEMARIÉ et al. 2000). Besonders in Zusammenhang mit einem zusätzlichen Trauma des zuvor chirurgisch versorgen Wirbelsäulenbereichs können Instabilitäten jedoch zeitlich auch deutlich später auftreten (LEMARIÉ et al. 2000).

Sicher definierte Grenzen zwischen postoperativer Destabilisierung der Wirbelsäule und spinaler Instabilität sind bisher nicht eindeutig festgelegt worden. Wenn es darum geht, zu beurteilen, ob Wirbelsäulenoperationen zu spinalen Instabilitäten führen, schon bevor klinisch neurologische Defizite am Patienten in Erscheinung treten, so sind biomechanische Untersuchungen im Rahmen von Kadaverstudien erste Schritte auf dem Weg zum Verständnis der postoperativen Veränderung des biomechanischen Verhaltens der Wirbelsäulen. Um jedoch signifikante Veränderungen der Wirbelsäulenstabilität abschließend beurteilen zu können, sind in vitro Studien allein inadäquat (FAUBER et al. 2006). Die Interpretation biomechanischer Untersuchungen in vitro unter Berücksichtigung klinischer Fallberichte und Verlaufsstudien ergänzen sich zu einem Gesamtbild, vor dessen Hintergrund die Durchführbarkeit bestimmter Operationstechniken oder Kombinationen von Operationstechniken in Hinblick auf ein für den Patienten gutes postoperatives Ergebnis beurteilt werden sollte.

2.5.1 Ventral Slot

Die am häufigsten durchgeführte Standardoperationsmethode im Bereich der Halswirbelsäule ist der Ventral Slot, der seine Anwendung in der chirurgischen Dekompression des Rückenmarks von ventral findet (YANG et al. 2016, FAUBER et al. 2006, CHAMBERS et al. 1982, GILPIN 1976, SEIM 1982, SWAIM

1974, LEMARIÉ et al. 2000). Im Rahmen dieser Operationstechnik, die wie die Partielle Laterale Korpektomie ebenfalls eine Art der partiellen Korpektomie darstellt, werden Anteile benachbarter Wirbelkörper, ventrale und dorsale Anteile des Anulus fibrosus, Anteile des Nucleus pulposus und Teile des Ligamentum longitudinale ventrale und dorsale entfernt, wodurch es unter anderem postoperativ zu spinalen Instabilitäten und Subluxationen kommen kann (YANG et al. 2016, FITCH et al. 2000, LEMARIÉ et al. 2000, MACY et al. 1999). Durch biomechanische Kadaverstudien konnte dargestellt werden, dass sich die Range of Motion infolge eines Ventral Slots während Extension und Flexion und auch während lateraler Biegung deutlich vergrößert (FAUBER et al. 2006, KOEHLER et al. 2005, ADAMO et al. 2007, YANG et al. 2016). Im Vergleich des konventionellen Ventral Slots mit einer modifizierten Variante dieser Operationsmethode (Slanted Ventral Slot) konnte festgestellt werden, dass die biomechanische Destabilisierung der Wirbelsäule nicht signifikant geringer ausfällt, wenn Anteile des ventralen Anulus fibrosus oder des Ligamentum longitudinale ventrale geschont werden (YANG et al. 2016). Allein die chirurgische Beeinträchtigung des Nucleus pulposus und Ligamentum longitudinale dorsale verursacht postoperativ in vitro eine deutliche Zunahme der Range of Motion in dorsaler und ventraler Biegung der Wirbelsäule (YANG et al. 2016). Trotzdem merkten die Autoren an, dass es aus klinischer Sicht hinsichtlich des Heilungsprozesses günstiger sein könnte, möglichst wenig Bandscheibenmaterial zu entfernen (YANG et al. 2016). Ab einer Breite der Fräsöffnung, die 33 % der Wirbelkörperbreite entspricht, konnte in Kadaverstudien an Wirbelsäulensegmenten des fünften und sechsten Halswirbels signifikante Zunahmen der Range of Motion während Extension und Flexion im Vergleich zu nativen Wirbelsäulensegmenten festgestellt werden (MACY et al. 1999). Obwohl einige Autoren während ihrer Untersuchungen der biomechanischen Auswirkungen des Ventral Slots auf die Wirbelsäule feststellen konnten, dass eine Breite der Fräsöffnung zwischen 33 % und 50 % der Wirbelkörperbreite keinen signifikanten Einfluss auf die Range of Motion in ventraler, dorsaler oder lateraler Biegung hat (FAUBER et al. 2006), konnten andere Autoren zeigen, dass in sieben von acht Fällen mit vertebraler Subluxation nach Durchführung eines Ventral Slots die Breite der Fräsöffnung mindestens 50 % der Wirbelkörperbreite betrug (LEMARIÉ et al. 2000). Die maximale Breite der Fräsöffnung von bis zu 50 % der mittleren Wirbelkörperbreite wird in der Literatur als klinisch akzeptabel angesehen (FAUBER et al. 2006). Fazit dieser Ergebnisse ist, dass eine größere Breite der Fräsöffnung postoperative Instabilitäten begünstigt (FAUBER et al. 2006). Eine Studie aus dem Jahr 2000 beschäftigte sich retrospektiv mit dem Auftreten zervikaler Luxationen infolge der Durchführung eines Ventral Slots (LEMARIÉ et al. 2000). Von insgesamt 113 Patienten, die in einem Zeitraum von zwölf Jahren einen Ventral Slot erhielten, erlitten neun Hunde eine Subluxation der Halswirbelsäule (LEMARIÉ et al. 2000). Die Zeitspanne, in der diese Luxationen auftraten, erstreckte sich von einem Tag bis zu 80 Tagen nach der Operation, bei einem Median von sieben Tagen (LEMARIÉ et al. 2000). Auch

in dieser Studie zeigte sich bei einem Großteil der betroffenen Patienten (sieben von acht Fällen), dass die Breite des Ventral Slots mehr als 50 % der Wirbelkörperbreite betrug (LEMARIÉ et al. 2000). Dementsprechend scheint auch diese Studie einen Zusammenhang zwischen Slotbreite und Entwicklung spinaler Luxationen herstellen zu können. Bei sieben der wegen einer Instabilität auffälligen Hunde wurde eine chirurgische Stabilisierung durchgeführt, die stets mit einer klinischen Verbesserung und Rückerlangung der Funktionalität einherging (LEMARIÉ et al. 2000).

Auch wenn bereits die Durchführung eines Ventral Slots zu einer signifikanten Zunahme der Range of Motion führt und anzunehmen ist, dass multiple Ventral Slots die Stabilität der Halswirbelsäule zusätzlich beeinträchtigen, so werden dennoch im klinischen Alltag multiple Ventral Slots durchgeführt (ROSSMEISL et al. 2013, GUO et al. 2020, MERBL et al. 2017). In der Studie von GUO et al. (2020) wurden 185 initial nicht gehfähige Patienten untersucht, die infolge eines Bandscheibenvorfalls eine Dekompression des Rückenmarks durch einen oder mehrere Ventral Slots erhielten. Von den 185 Patienten bekamen 123 Patienten einen einzelnen Ventral Slot und 62 Hunde multiple Ventral Slots. Im Vergleich der Patienten mit einem oder mehreren Ventral Slots konnte festgestellt werden, dass Patienten beider Gruppen gleich schnell gehfähig waren und auch mit gleicher Wahrscheinlichkeit die Gehfähigkeit zurückerlangten. Postoperativ erreichten 95,9 % der Patienten mit einem Ventral Slot und 96,8 % der Patienten mit multiplen Ventral Slots ihre Gehfähigkeit zurück (GUO et al. 2020). Die klinische Prognose dafür, auch nach Durchführung multipler Ventral Slots eine funktionelle Wiederherstellung des neurologischen Zustandes zu erreichen, wurde als günstig bezeichnet (GUO et al. 2020). Diese positiven Studienergebnisse veranlassen die Autoren dazu, sowohl die Durchführung eines einzelnen, als auch die Durchführung multipler Ventral Slots als sichere und effektive Operationsmethode einzuordnen, um das postoperative Ziel einer funktionellen Wiederherstellung des neurologischen Zustandes des Patienten wiederzuerlangen (GUO et al. 2020).

Entlang der Halswirbelsäule scheinen deutliche biomechanische Unterschiede zwischen ihren kranialen und kaudalen Anteilen zu bestehen (FITCH et al. 2000), sodass intervertebrale Luxationen im Bereich der kaudalen Halswirbelsäule häufiger aufzutreten scheinen als im Bereich der kranialen Halswirbelsäule (SEIM 1982, SMITH et al. 1997, FITCH et al. 2000) und Hunde mit Bandscheibenvorfall im Bereich der kaudalen Halswirbelsäule häufiger einen schlechteren perioperativen neurologischen Zustand zeigen. In der Studie von FITCH et al. 2000 wurden retrospektiv die klinischen postoperativen Veränderungen des neurologischen Zustandes von 112 Hunden evaluiert. Patienten, die im Bereich der kranialen Halswirbelsäule allein einen Ventral Slot erhalten hatten, zeigten zu 90 % eine Verbesserung in mindestens drei der vier in dieser Studie beurteilten klinischen Parameter (Gehfähigkeit, Dolenz, klinische Verbesserung des neurologischen Zustandes entsprechend der Zeit,

Langzeitverbesserung) (FITCH et al. 2000). Im Vergleich dazu waren Patienten mit Bandscheibenvorfällen im Bereich der kaudalen Halswirbelsäule in allen untersuchten Parametern signifikant schwerer betroffen (FITCH et al. 2000). Insgesamt erhielten 64 Patienten einen Ventral Slot im Bereich der kaudalen Halswirbelsäule (C4-C7) (FITCH et al. 2000). Von diesen Patienten erhielten 15 eine Distraction und Stabilisierung des zuvor durch einen Ventral Slot operierten Wirbelsäulensegments und 49 Patienten nicht (FITCH et al. 2000). Deutlich zeigte sich, dass eine Distraction und Stabilisierung kaudaler Halswirbelsäulenläsionen im Vergleich zu nicht stabilisierten Patienten zu einem signifikant besseren Ergebnis des neurologischen Zustandes der Patienten führte (FITCH et al. 2000). Bei den fünf Patienten, die infolge ihres Ventral Slots eine Luxation entwickelten, konnte festgestellt werden, dass die Luxation stets im Bereich der kaudalen Halswirbelsäule auftrat und sich klinische Verbesserungen infolge der chirurgischen Stabilisierung einstellten (FITCH et al. 2000). So schlussfolgerten die Autoren, dass Bandscheibenvorfälle im Bereich der kaudalen Halswirbelsäule sehr gut und sogar besser auf die Durchführung eines Ventral Slots mit anschließender Distraction und Stabilisierung des chirurgisch versorgten Zwischenwirbelspaltes ansprechen, als bei alleiniger Durchführung eines Ventral Slots (FITCH et al. 2000). Wird von Beginn der Durchführung eines Ventral Slots an eine Stabilisierung des entsprechenden Wirbelsäulensegments eingeplant, so kann die Ostektomie insgesamt großzügiger durchgeführt werden (FITCH et al. 2000). Eine bessere intraoperative Darstellung des Rückenmarks wird so möglich (FITCH et al. 2000), ohne dass postoperativ wegen der größeren knöchernen Defekte Instabilitäten riskiert werden müssten.

2.5.2 Hemilaminektomie

Auch die Hemilaminektomie findet als Standardoperationsmethode im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäulenchirurgie häufig ihren Einsatz an multiplen Lokalisationen innerhalb eines Patienten (AIKAWA et al. 2012b, AIKAWA et al. 2012a, MILLER und MARCHEVSKY 2017, NAKAMOTO et al. 2021, HIRANO et al. 2020). Im Bereich der Halswirbelsäule wird diese Operationsmethode ebenfalls eingesetzt (TAYLOR-BROWN et al. 2015), gilt hier jedoch auch wegen des komplexen und invasiven Weichteilzugangs als chirurgisch herausfordernd. Einzelne Hemilaminektomien scheinen dabei unabhängig von der Bewegungsrichtung keine signifikante Destabilisierung der Wirbelsäule hervorzurufen (VICENTE et al. 2013, CORSE et al. 2003, SHIRES et al. 1991, SMITH und WALTER 1988, SCHULZ et al. 1996). In der Kadaverstudie von CORSE et al. (2003) wurden die biomechanischen Eigenschaften während Extension und Flexion von dreißig kaninen Wirbelsäulensegmenten auch nach der Durchführung multipler Hemilaminektomien untersucht (CORSE et al. 2003). Festgestellt werden konnte, dass sich die Range of Motion im Vergleich nativer Wirbelsäulensegmente mit Wirbelsäulensegmenten mit ein, zwei oder drei Hemilaminektomien an unmittelbar benachbarten

Zwischenwirbelspalten nicht signifikant unterscheidet und die Wirbelsäulenstabilität durch das Einfräsen von Hemilaminektomien somit nicht signifikant gemindert wird (CORSE et al. 2003). Ausdehnungen multipler Hemilaminektomien über vier, fünf und sechs Wirbel wurden bereits in vivo durchgeführt, ohne dass klinisch relevante negative Konsequenzen im Sinne einer verminderten spinalen Stabilität für die betroffenen Patienten auftraten (CORSE et al. 2003, SWAIM 1977, GAGE 1975, MILLER und MARCHEVSKY 2017, VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012). Noch umfangreichere Hemilaminektomien werden gelegentlich im Rahmen lebensrettender Maßnahmen bei unter Myelomalazie leidenden Patienten eingesetzt. Die Eröffnung des Wirbelkanals durch extensive Hemilaminektomien ermöglicht hierbei die Durchführung einer Durotomie zur Druckentlastung des gesamten Myelons in dem von der Malazie betroffenen Bereich. In zwei Studien aus dem Jahr 2020 wurden zu diesem Zwecke ipsilateral zwischen fünf und siebzehn Hemilaminektomien pro Patient durchgeführt (HIRANO et al. 2020, NAKAMOTO et al. 2021). Die Autoren selbst sehen das Ziel derartig extensiver Hemilaminektomien jedoch im Aufhalten der Progression der Myelomalazie und nicht in der Regression bestehender Lähmungserscheinungen (HIRANO et al. 2020). Obwohl keinerlei chirurgische Stabilisierung der betroffenen Wirbelsäulen erfolgte, zeigten sich bei HIRANO et al. (2020) in Kontrolluntersuchungen jeweils zwei und acht Wochen postoperativ bei keinem Patienten spinale Luxationen oder Subluxationen (HIRANO et al. 2020). Dies kann sicherlich als Hinweis für den nur geringen destabilisierenden Effekt dieser Operationsmethode gewertet werden. Es ist jedoch zu bedenken, dass keiner der untersuchten Patienten eine Verbesserung der Lähmungserscheinungen der Hintergliedmaßen zeigte (HIRANO et al. 2020). Die Ursachen der ausbleibenden neurologischen Verbesserung bleiben ungeklärt. Möglicherweise liegt ein irreversibler Untergang des Nervengewebes zugrunde. Dass spinale Instabilitäten eine Regression der neurologischen Befunde verhindern, kann jedoch ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

In einer Studie an 662 chondrodystrophen Hunden konnte bei insgesamt drei Hunden nach der Durchführung von Hemilaminektomien in Zusammenspiel mit prophylaktischen Bandscheibenfenestrationsen spinale Instabilitäten festgestellt werden, die sich in Luxationen und Subluxationen äußerten (AIKAWA et al. 2012b). Dass die Durchführung einer Hemilaminektomie einen destabilisierenden Effekt auf die Wirbelsäule haben kann, erscheint somit trotz vieler anderer positiver Studienergebnisse möglich und wurde auch in der Kadaverstudie von HILL et al. (2000) nachgewiesen (HILL et al. 2000). Der Effekt einer einzelnen Hemilaminektomie auf ein Wirbelsäulensegment in Kombination mit anderen Operationsmethoden wurde auch in den Studien von VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) und VICENTE et al. (2013) untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Hemilaminektomie in Kombination mit anderen Operationstechniken an demselben

Zwischenwirbelspalt die Range of Motion signifikant vergrößert und sich damit destabilisierend auf die Wirbelsäule auswirkt (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012, VICENTE et al. 2013).

Auch bei der biomechanischen Untersuchung der Wirbelsäulenstabilität nach Durchführung von Hemilaminektomien werden Kadaverstudien als gute Grundlage angesehen, um den Grad postoperativ entstehender chirurgischer Destabilisierung der Wirbelsäule abschätzen zu können (CORSE et al. 2003). Solche Studienergebnisse in Kombination mit der Auswertung klinischer Erfahrungen bilden die Grundlage fundierter chirurgischer Entscheidungen (CORSE et al. 2003).

2.5.3 Mini-Hemilaminektomie und Pedikelektomie

Bei einer Mini-Hemilaminektomie werden die Pedikel zweier benachbarter Wirbel ventral des sie verbindenden Facettengelenks entfernt (LUBBE et al. 1994, ELLIOTT et al. 2020). Da weder Facettengelenke, noch Bandscheibe innerhalb des betroffenen Zwischenwirbelspalts im Rahmen dieser Operationsmethode oder im Rahmen einer Pedikelektomie reseziert oder teilreseziert werden, ist der Effekt dieser Operationsmethoden auf die spinale Stabilität nur marginal (HILL et al. 2000). HILL et al. (2000) konnten zwar einen destabilisierenden Effekt der Pedikelektomie nachweisen, dieser fiel jedoch geringer aus als derjenige nach Durchführung einer Hemilaminektomie (HILL et al. 2000). Die Autoren schlussfolgerten daraus, dass auch das Risiko postoperativer Wirbelsäuleninstabilitäten geringer ausfallen müsse als nach der Durchführung einer Hemilaminektomie (HILL et al. 2000). Andere Autoren sahen infolge einer Mini-Hemilaminektomie gar keine signifikante Beeinflussung der spinalen Stabilität (JEFFERY 1988, ARTHURS 2009). Auch bei VICENTE et al. (2013) zeigte sich die spinale Stabilität nach Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie durch die zusätzliche Durchführung einer Mini-Hemilaminektomie an demselben Zwischenwirbelbereich nicht zusätzlich beeinträchtigt (VICENTE et al. 2013). Das Risiko, dass postoperativ spinale Instabilitäten auftreten, kann mithilfe perkutaner Endoskopie zusätzlich verringert werden, da hier auch der Weichteilzugang mit relativ geringem Substanzverlust generiert werden kann. Muskuläre Strukturen und Bandstrukturen werden dadurch bestmöglich geschont und die postoperative spinale Stabilität somit möglichst wenig beeinträchtigt (MOON et al. 2017, CAROZZO et al. 2011).

Multiple Mini-Hemilaminektomien werden im klinischen Alltag regelmäßig mit gutem Operationserfolg und ohne Hinweise auf postoperative spinale Instabilitäten durchgeführt (ELLIOTT et al. 2020, HUSKA et al. 2014b). Im Rahmen bilateral durchgeführter und durch Pedikelektomien erweiterter Mini-Hemilaminektomien konnte jedoch eine spinale Instabilität mit resultierender Verschlechterung des neurologischen Zustandes in einem Fallbericht detektiert werden (ARTHURS 2009). Die Instabilität äußerte sich radiologisch in einer Subluxation des zuvor chirurgisch versorgten

Brustwirbelsäulenabschnittes (ARTHURS 2009). Nach einer chirurgischen Fixation der subluxierten Brustwirbelsäule, verbesserte sich der neurologische Zustand des Patienten (ARTHURS 2009).

2.5.4 Dorsale Laminektomie

Bei einer Dorsalen Laminektomie wird ein dorsaler oder dorsolateraler Zugang zum Wirbelkanal kreiert. Dies wird ermöglicht durch einen extensiven bilateralen Weichteilzugang von dorsal (FORTERRE et al. 2007). Bekannt ist, dass diese Operationsmethode durch die Resektion des Dornfortsatzes inklusive der daran inserierenden interspinalen und supraspinalen Bänder (Ligg. interspinalia, Ligg. flava, Lig. supraspinale) zu einer größeren spinalen Instabilität führt als die Hemilaminektomie (SMITH und WALTER 1988, MCKEE 1992, FORTERRE et al. 2007). Um den destabilisierenden Effekt einer Dorsalen Laminektomie zu minimieren, gibt es Bestrebungen, durch Osteotomie des Dornfortsatzes an seiner Basis einen nur unilateralen Zugang zur Wirbelsäule zu generieren und dadurch Ligamentum supraspinale und Ligamenta interspinalia sowie einseitig auch die paraspinale Muskulatur zu erhalten (FORTERRE et al. 2007).

Besonders im Bereich des lumbosakralen Übergangs wird diese Operationsmethode häufig mit einer partiellen Diskektomie kombiniert, um den unter einer Lumbosakralen Stenose leidenden Patienten eine Linderung ihrer Symptome verschaffen zu können. Die Kombination von Dorsaler Laminektomie und partieller Diskektomie führte in einer Kadaverstudie nachweislich zu einer Vergrößerung der Range of Motion um 7,4 % während Flexion und Extension (EARLY et al. 2013). Auch andere Studien konnten einen signifikanten destabilisierenden Effekt dieser Operationen in Kombination nachweisen (SMOLDERS et al. 2012b, SMOLDERS et al. 2012a). In einem Fallbericht aus dem Jahr 2002 resultierte die Durchführung einer Dorsalen Laminektomie zwischen dem sechsten Lenden- und dem zweiten Kreuzbeinwirbel mit partieller dorsaler Anulektomie zwischen dem sechsten und siebten Lenden- und dem siebten Lenden- und ersten Kreuzbeinwirbel zwei Wochen postoperativ in einer beidseitigen Fraktur der Facettengelenke des lumbosakralen Übergangs sowie einer Fraktur des rechten Pedikels des siebten Lendenwirbels und in einem ausgedehnten subkutanen Hämatom (MOENS und RUNYON 2002). Nach chirurgischer Stabilisierung zeigten sich die neurologischen Symptome (Dolenz, Ataxie der Hintergliedmaßen und Anzeichen einer Radikulitis) regressiv (MOENS und RUNYON 2002).

In einer Kadaverstudie aus dem Jahr 1988 wurde an fünf Lendenwirbelsäulensegmenten der alleinige Effekt einer Dorsalen Laminektomie auf die spinalen biomechanischen Eigenschaften während Extension und Flexion untersucht (SMITH und WALTER 1988). Festgestellt werden konnte auch hier, dass die Wirbelsäulenstabilität infolge einer Dorsalen Laminektomie signifikant abnimmt (SMITH und WALTER 1988). Die Range of Motion nahm nach der Durchführung einer Dorsalen Laminektomie um 48,9 % zu (SMITH und WALTER 1988). Die Autoren betonten, dass viele Patienten dieser

Operationsmethode zur Behandlung von Bandscheibenvorfällen unterzogen werden, ohne dass offensichtliche Anzeichen spinaler Luxationen auftreten (SMITH und WALTER 1988). Dennoch ziehen sie die Durchführung einer weniger invasiven und damit mechanisch überlegenen Hemilaminektomie mit besserem intraoperativen Erhalt der strukturellen und mechanischen Integrität der Lendenwirbelsäule der Durchführung einer Dorsalen Laminektomie zur chirurgischen Dekompression des Myelons vor (SMITH und WALTER 1988). Obwohl die meisten Studien die Dorsale Laminektomie als potentiell destabilisierend für die Wirbelsäule einschätzen, gibt es auch eine Studie, die keine signifikante Zunahme spinaler Instabilität durch die Dorsale Laminektomie während Extension und Flexion feststellen konnte (MEIJ et al. 2007).

Die Dorsale Laminektomie findet ihren Einsatz auch an der Halswirbelsäule. Hier wird sie v.a. zur chirurgischen Dekompression des Rückenmarks im Rahmen chirurgischer Interventionen bei Patienten mit Kaudaler Zervikaler Spondylomyelopathie eingesetzt. Die Durchführung einzelner, aber auch multipler Dorsaler Laminektomien ist dabei beschrieben (RISIO et al. 2002). Obwohl der Langzeit-Operationserfolg häufig mit guten Prognosen verbunden wird (LIPSITZ et al. 2001, RISIO et al. 2002), konnten die Autoren in einer Studie aus dem Jahr 2002 eine hohe postoperative Morbidität von 70 % feststellen (RISIO et al. 2002). Mögliche Ursachen sehen die Autoren in Reperfusionsschäden infolge der Dekompression des zuvor chronisch von dorsal komprimierten Rückenmarks (RISIO et al. 2002, RUSBRIDGE et al. 1998), möglichem Weichteiltrauma inklusive der muskulären Dissektion (RISIO et al. 2002, VANGUNDY 1988), spinalen Instabilitäten infolge der zugrundeliegenden Erkrankung oder infolge des chirurgischen Eingriffs an (RISIO et al. 2002). Aufgrund des überwiegend sehr guten Operationserfolges sehen die Autoren die Dorsale Laminektomie im Bereich der Halswirbelsäule jedoch als effektive Behandlungsmethode Kaudaler Zervikaler Spondylomyelopathien an – auch bei Einsatz an multiplen Lokalisationen (RISIO et al. 2002).

2.5.5 Partielle Laterale Korpektomie

Im Jahr 2010 führten VIZCAÍNO REVÉS et al. eine Studie zur Biomechanik der kaninen Lendenwirbelsäule durch (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012). Ziel der Untersuchungen war es u.a., den biomechanischen Effekt einer Partiellen Lateralen Korpektomie sowie den biomechanischen Effekt einer Hemilaminektomie an derselben Stelle auf die Range of Motion zwischen dem ersten und zweiten Lendenwirbel abschätzen zu können. Dazu wurden bei insgesamt zehn Hundekadavern die Wirbelsegmente Th13 bis L3 unter Entfernung des paraspinalen Muskelgewebes präpariert und anschließend so in Polymethylmethacrylat eingebettet, dass lediglich eine Bewegung zwischen dem ersten und zweiten Lendenwirbel möglich war. Mithilfe eines eigens hergestellten „6 degrees of freedom spinal loading simulators“ sowie eines Kamerasystems wurde die Range of Motion bei

Flexion, Extension, lateraler Biegung und axialer Rotation an der nativen Lendenwirbelsäule bestimmt. Danach erfolgten gleichsinnige Messungen sowohl nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie als auch nach der zusätzlichen Durchführung einer Hemilaminektomie im selben Zwischenwirbelbereich und von derselben Seite aus. Nach der Datenanalyse zeigte sich, dass sich die Range of Motion zwischen dem ersten und zweiten Lendenwirbel bei Flexion, Extension sowie links- und rechtslateraler Biegung signifikant vergrößerte, nachdem eine Partielle Laterale Korpektomie durchgeführt wurde. Der Mittelwert der Range of Motion während Extension und Flexion vergrößerte sich von $8,4^\circ$ (SD $2,4^\circ$) in nativem Zustand auf $11,1^\circ$ (SD $3,0^\circ$) und während lateraler Biegung von $18,5^\circ$ (SD $5,0^\circ$) in nativem Zustand auf $24,4^\circ$ (SD $7,7^\circ$). Die insgesamt kleinsten Ranges of Motion wurden während Torsion gemessen. In nativem Zustand der Wirbelsäulensegmente wurden Mittelwerte von $1,5^\circ$ (SD $0,5^\circ$) gemessen. Eine nicht signifikante Zunahme der Range of Motion auf $2,1^\circ$ (SD $0,6^\circ$) stellte sich nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie ein. Aufgrund dieser Ergebnisse sowie wegen bis dato fehlender weiterer Studien zu biomechanischen Konsequenzen nach der Durchführung Partieller Lateralen Korpektomien, rieten die Autoren von der Durchführung multipler Partieller Lateralen Korpektomien ab (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012).

Auch VICENTE et al. (2013) stellten nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie zwischen dem ersten und zweiten Lendenwirbel eine Verminderung der spinalen Stabilität im Vergleich zum selben, jedoch nativen Wirbelsäulensegment fest (VICENTE et al. 2013). In dieser Studie wurden bei insgesamt sechs Hunden unter Schonung der Zwischenwirbelgelenke und –bänder der erste und zweite Lendenwirbel von der paraspinalen Muskulatur separiert. Anschließend wurde die Range of Motion bei allen sechs Präparaten mithilfe einer servohydraulischen Testvorrichtung bei Flexion, Extension sowie lateraler Biegung gemessen. Diesen Messungen wurden diejenigen Messdaten gegenübergestellt, die während der Testung an denselben Präparaten nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie festgestellt worden waren. Als besonders hervorstechend beschreiben die Autoren hier die Zunahme der Range of Motion bei lateraler Biegung nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie. Sie vergrößerte sich von $16,4^\circ$ (SD $1,2^\circ$) signifikant auf $18,7^\circ$ (SD $0,9^\circ$) nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie.

Die beiden zuvor genannten Studien (VICENTE et al. 2013, VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012) zeigen deutlich, dass in vitro die chirurgische Versorgung von Patienten mit Bandscheibenvorfällen mittels Partieller Lateralen Korpektomie mit einer Verminderung der spinalen Stabilität der Lendenwirbelsäule einhergeht. Doch wie verhält sich die Stabilität der Wirbelsäule nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie in vivo? FERRAND et al. (2015) konnten in ihrer Studie bei 1,8 % (n = 2) der insgesamt 107 eingeschlossenen Patienten, die mittels Partieller Lateralen Korpektomie chirurgisch

versorgt wurden, klinisch eine Instabilität feststellen. Von diesen erhielt ein Patient eine Partielle Laterale Korpektomie sowie eine Hemilaminektomie an demselben Zwischenwirbelbereich und ein Patient eine Partielle Laterale Korpektomie allein (FERRAND et al. 2015). Die Instabilität äußerte sich in einer radiologisch feststellbaren Subluxation des betroffenen Wirbelsäulensegmentes sowie klinisch in einer Ataxie der Hintergliedmaßen (FERRAND et al. 2015). FLEGEL et al. (2011) vermuteten in Hinblick auf die Wirbelsäulenstabilität einen kritischen Punkt in der Beziehung zwischen Slottiefe und Breite des Wirbelkörpers. In ihrer Studie wurden bei 27 % der in der Studie analysierten Partiellen Lateralen Korpektomien Slottiefen von über 70 % der Wirbelkörperbreite, bei einem Patienten sogar eine Slottiefe von 89 %, gemessen (FLEGEL et al. 2011). Weder intra- noch postoperativ konnten bei diesen Patienten Hinweise auf eine spinale Instabilität festgestellt werden (FLEGEL et al. 2011). Die Autoren rieten dennoch dazu, die Slottiefe nicht größer als 75 % der Wirbelbreite anzulegen (FLEGEL et al. 2011). Dass nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie der Anteil der von einer spinalen Instabilität betroffenen Patienten mit 0,9 % (n = 107) (FERRAND et al. 2015) eher gering ausfällt, steht wahrscheinlich mit den zusätzlich stabilisierenden Strukturen der Lendenwirbelsäule in vivo, wie z.B. der paraspinalen Muskulatur, in Verbindung (PANJABI 1992a, PANJABI 1992b).

Gelegentlich werden Patienten mit Paresen oder Plegien in Kliniken und Praxen vorgestellt, deren Lähmungsursache multiple chronische Bandscheibenvorfälle sind (FLEGEL et al. 2016, BESALTI et al. 2006, CRAWFORD und DECKER 2017). Auch eine Progression bereits bestehender Symptome kann auf die Entstehung von Diskusprotrusionen an benachbarten Zwischenwirbelspalten zurückzuführen sein (CRAWFORD und DECKER 2017). Um auch hier eine bestmögliche chirurgische Dekompression bei gleichzeitig größtmöglicher Schonung des Myelons erreichen zu können, erscheint die Durchführung multipler Partieller Lateralen Korpektomien als sinnvoll und notwendig. So zeigten FLEGEL et al. (2016), dass bei insgesamt 17 Hunden multiple Partielle Laterale Korpektomien erfolgreich durchgeführt werden konnten (FLEGEL et al. 2016). Dabei wurden bei 14 der 17 Patienten jeweils zwei, bei zwei Patienten jeweils drei und bei einem Patienten vier Partielle Laterale Korpektomien an direkt benachbarten Wirbeln durchgeführt. Bei einer Kontrolluntersuchung, die jeweils vier Wochen postoperativ erfolgte, zeigte sich bei 35,3 % der Patienten ein unveränderter und bei 64,7 % der Patienten ein verbesserter neurologischer Zustand. Auch FLEGEL et al. (2011) konnten nach der Durchführung multipler Partieller Lateralen Korpektomien keine Anzeichen einer spinalen Instabilität feststellen (FLEGEL et al. 2011). Trotz der eher positiven Studienergebnisse hinsichtlich der Durchführung multipler Partieller Lateralen Korpektomien, konnten die Bedenken bezüglich der biomechanischen Instabilität der Lendenwirbelsäule nach der Durchführung multipler Partieller Lateralen Korpektomien bisher nicht restlos ausgeräumt werden.

Ziel dieser Studie ist es, die biomechanischen Konsequenzen einer und einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie auf die kanine Lendenwirbelsäule abschätzen zu können.

3. Tiere, Material und Methoden

3.1 Arbeitshypothese

Jedes Wirbelsäulensegment setzt einer passiven Biegung während der biomechanischen Testung und Auslenkung in verschiedene Richtungen einen bestimmten, wirbelsäulensegmentspezifischen Widerstand entgegen. Zwischen der Ruheposition eines Wirbelsäulensegmentes und der Position des Wirbelsäulensegments bei maximaler Biegung in eine bestimmte Richtung entsteht ein messbarer Winkel, die Range of Motion. Aufgrund der anzunehmenden Schwächung des Widerstandes des Wirbelsäulensegmentes nach Einfräsen einer Partiellen Lateralen Korpektomie sollte die zu messende Range of Motion während Biegung in verschiedene Richtungen im Vergleich zur Range of Motion desselben, aber nativen Wirbelsäulensegments größer werden. Je mehr Partielle Laterale Korpektomien in das Wirbelsäulensegment eingefräst werden, desto größer sollte auch die zu messende Range of Motion werden. Wir postulieren, dass die Vergrößerung der Range of Motion durch eine Verminderung der Stabilität der Wirbelsäulensegmente verursacht wird.

3.2 Patientengut

Es wurden biomechanische Tests an Lendenwirbelsäulensegmenten von insgesamt elf Hundekadavern durchgeführt, die im Bereich L2-L3 und L3-L4 keinerlei pathologische Veränderungen mit Auswirkungen auf die biomechanischen Eigenschaften der Lendenwirbelsäulen aufwiesen. Als weitere Einschlusskriterien wurde eine Körpermasse der Hundekadaver zwischen 20,0 und 35,0 kg und ein Alter zum Zeitpunkt des Todes zwischen einem und zwölf Jahren gewählt. Die Euthanasie oder das Versterben der Hunde durfte nicht mit einer Erkrankung der Wirbelsäule in Verbindung stehen.

Von insgesamt achtzehn untersuchten Hundekadavern erfüllten elf Kadaver die geforderten Einschlusskriterien. Die Hunde waren Patienten der Klinik für Kleintiere der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig, An den Tierkliniken 23, 04103 Leipzig (Studienpatienten 1,2,3,4,5,6,7,9,10 und 11) oder Patienten der Kleintierpraxis an der Lutherkirche, Straße des Friedens 86, 09212 Limbach-Oberfrohna (Studienpatient 8) gewesen. Von den jeweiligen Besitzern wurden die Tierkörper nach der Euthanasie oder dem Versterben der Klinik für Kleintiere der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig überlassen.

Um die Wirbelsäulensegmente hinsichtlich degenerativer Veränderungen untersuchen zu können, wurde bei allen Hundekadavern vor der biomechanischen Testung ihrer Lendenwirbelsäule eine Computertomographie durchgeführt. Für die Computertomographie wurde der IQon Spectral CT (Koninklijke Philips N.V., Amsterdam, Niederlande) in der Klinik für Kleintiere der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig genutzt. Jede Computertomographie erfolgte in helikaler Akquisition mit einer Schichtdicke von 0,8 mm bei einer Überlappung von 0,4 mm. Je nach

Größe der Patienten wurde eine Strahlendosis von 120 kVp und 150 bis 250 mAs verwendet. Beurteilt wurden die entstandenen Bilder in sagittalen und auch transversalen Schnittebenen in Knochen- und Weichteilrekonstruktion durch zwei Untersucher im Consensus.

Die in die Studie eingeschlossenen Hunde gehörten den Rassen Labrador Retriever (n = 4), Berner Sennenhund (n = 1), Bullterrier (n = 1), Mittelschnauzer (n = 1), Deutscher Schäferhund (n = 1), Australian Shepherd (n = 1), Basset Griffon (n = 1) und Deutsch Langhaar (n = 1) an. Sieben Hunde waren weiblich, davon drei kastriert. Vier Hunde waren männlich, davon alle unkastriert. Die Tiere waren zum Zeitpunkt des Todes zwischen einem und zwölf Jahren alt, bei einem mittleren Alter von 6,3 Jahren. Die mittlere Körpermasse der Tiere betrug 27,1 kg (Spanne: 21,0 – 33,0 kg).

Ausgeschlossen wurden Patienten, die innerhalb der Wirbelsegmente L2-L4 offene Wachstumsfugen, degenerative Veränderungen (Spondylosen, Spondylarthrosen, Diskusprotrusionen oder -extrusionen, Mineralisationen der Bandscheiben), Frakturen oder Luxationsfrakturen, Wirbelfehlbildungen (Keilwirbel, Schmetterlingswirbel), Wirbelumbildungen (Diskospondylitis) oder neoplastische Veränderungen aufwiesen oder die Forderungen bezüglich des Gewichts und des Alters über- oder unterschritten. Aus ethischer Sicht wurde die Durchführung dieser Studie von der Ethikkommission der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig überprüft (EK 11/2021) und mit Zustimmung beurteilt.

3.3 Präparation der Lendenwirbelsäulen

Innerhalb von 48 Stunden nach Euthanasie oder Versterben der Hunde wurden die für die Studie benötigten Wirbelsäulensegmente (L1-L5) dem Tierkörper entnommen. Dazu wurde mithilfe eines Skalpell Nr. 21 ein Hautschnitt auf Höhe des elften Brust- bis zum ersten Sakralwirbel entlang der Medianen gesetzt. An den kranialen und kaudalen Enden der Schnittlinie wurden jeweils links- und rechtslateral Entlastungsschnitte durch Haut-, Unterhaut- und Muskelgewebe hindurch ausgeführt. Es folgte die Präparation entlang der Medianen durch das Unterhautfettgewebe nach ventral bis zum Erreichen der Dornfortsätze der Lendenwirbel. Die Fascia thoracolumbalis (Rückenlendenbinde) wurde vom 13. Brust- bis zum sechsten Lendenwirbel unmittelbar links- und rechtslateral der Dornfortsätze von kranial nach kaudal durchtrennt. Danach wurden jeweils beidseits Muskulatur (M. longissimus lumborum, Mm. multifidi und M. spinalis et semispinalis thoracis et cervicis) und Periost stumpf mithilfe eines Raspatoriums von den Dornfortsätzen und Wirbelbögen des ersten bis fünften Lendenwirbels abgetrennt. Ebenfalls unter Zuhilfenahme eines Raspatoriums wurde die Muskulatur des M. longissimus dorsi über die Facettengelenke L1-L2 bis L5-L6 gehebelt. Die sehnigen muskulären Ansätze an den Facettengelenken wurden danach mithilfe einer Metzenbaumschere durchtrennt. Im Anschluss daran wurden die Neuroforamina und Querfortsätze des ersten bis fünften Lendenwirbels

stumpf mithilfe eines Raspatoriums dargestellt. Segmentale Nerven und Blutgefäße wurden durch einen Scherenschlag möglichst nah am Knochen der Wirbelsäule abgesetzt. Mithilfe eines Skalpell Nr. 11 wurden die Ligamenta interspinalia, Ligamenta intertransversaria und Ligamenta flava sowie die Facettengelenke im Bereich Th13-L1 und L5-L6 durchtrennt. Danach wurde das Wirbelsäulensegment L1-L5 an seinem kranialen Ende von Hand aus dem Kadaver herausgehoben und die von ventral an der Lendenwirbelsäule ansetzende Psoasmuskulatur unter Zuhilfenahme eines Skalpell Nr. 21 und einer Metzenbaumschere abgesetzt. Abschließend wurden an dem aus dem Situs herausgelösten Wirbelsäulensegment die Querfortsätze von ventral und ventrale Anteile der Wirbelkörper mithilfe eines Raspatoriums und einer Metzenbaumschere von den muskulären Ansätzen befreit.

Jedes der elf präparierten Wirbelsäulensegmente bestand aus den Lendenwirbeln eins bis fünf und enthielt makroskopisch unversehrte Bandscheiben (L1-L2 bis L4-L5), Ligg. intertransversaria, Ligg. interspinalia, Ligg. longitudinale ventrale und dorsale, Ligg. flava sowie Facettengelenke (L1-L2 bis L4-L5) inkl. der Gelenkkapseln. Nach der Präparation wurde jedes entnommene Wirbelsäulensegment in ein mit physiologischer Kochsalzlösung getränktes Baumwolltuch eingewickelt und bis 48 Stunden vor der biomechanischen Testung innerhalb eines Gefrierschranks bei -18°C auf einer waagerechten, festen Unterlage liegend eingefroren.

3.4 Einbettung der präparierten Lendenwirbelsäulen

Die präparierten Wirbelsäulensegmente wurden 48 Stunden vor Beginn der biomechanischen Testungen aufgetaut. Dazu wurden sie aus dem Gefrierschrank in einen Kühlraum verbracht und dort innerhalb von 24 Stunden von -18°C auf eine Temperatur von 7°C erwärmt. Innerhalb der darauffolgenden 24 Stunden wurden die Wirbelsäulensegmente außerhalb des Kühlraums auf Raumtemperatur temperiert. Nach dem Auftauprozess wurde mithilfe eines Akkubohrers jeweils eine 5 cm lange, metallene Holzschraube der Stärke 3,5 mm in transversaler Richtung durch die kraniale Hälfte des Wirbelkörpers L1 und die kaudale Hälfte des Wirbelkörpers L5 gebohrt. Die kranialen (L1 und kraniale Hälfte von L2) und kaudalen (L5 und

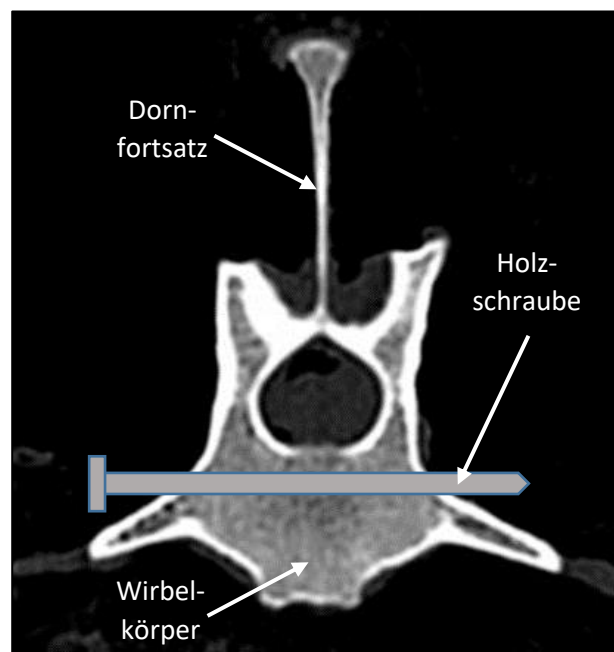


Abbildung 3: Illustration zur Positionierung einer Holzschraube durch die Wirbelkörper des ersten und fünften Lendenwirbels anhand einer Computertomographie in transversaler Schnittebene

kaudale Hälfte von L4) Anteile der Wirbelsäulensegmente wurden danach in Aceton getaucht. Sowohl das Einbringen der Holzschrauben als auch das Eintauchen der Wirbelsäulensegmentenden in Aceton diente der Vorbereitung der Wirbelsäulensegmente auf die feste Einbettung mit Gießharz in 5 cm hohe Einbettwannen, die aus 15 cm durchmessenden Aluminiumrundstangen (Gemmel Metalle, Hans-Erich Gemmel & Co. GmbH, Berlin, Deutschland) gefräst wurden.

Unter Zuhilfenahme eines metallenen Dreifußes wurden die Wirbelsäulensegmente jeweils an ihren kranialen Enden fixiert und zunächst freischwebend innerhalb der ersten Einbettwannen ausgerichtet. Die Ausrichtung der Wirbelsäulensegmente erfolgte dabei unter Anwendung eines gedachten, auf die Einbettwanne projizierten Ziffernblattes, bei dem zwölf Uhr in Richtung des Dreifußes zeigte. Die Dornfortsätze eines jeden Wirbelsäulensegmentes sollten während der Ausrichtung auf zwölf Uhr, die Querfortsätze auf vier und acht Uhr und die Wirbelkanalböden auf einer gedachten Verbindungslinie zwischen drei und neun Uhr zu liegen kommen. In jede Einbettwanne wurden nach der Ausrichtung der

Wirbelsäulensegmente jeweils vier M6-Schrauben soweit eingedreht, dass diese ca. 5 mm weit in das Lumen der Einbettwannen hineinragten. Sie sollten später die ausgehärtete Einbettmasse sicher innerhalb der Einbettwannen verankerten.

Zum Schutz des Präparators wurde das zähfließende Gießharz aus Isocyanat (Rencast® FC 52/53 Isocyanat, Huntsman Corporation, Salt Lake City, USA), Polyol (Rencast® FC 52 Polyol, Huntsman Corporation, Salt Lake City, USA) und einem Aluminiumhydroxid enthaltenden Füllmaterial (DT 082-1



Abbildung 4: Ausrichtung eines Wirbelsäulensegments innerhalb der Einbettwanne zur nachfolgenden Einbettung des kaudalen Wirbelsäulensegmentanteils in Gießharz - Aufsicht



Abbildung 5: Ausrichtung eines Wirbelsäulensegments innerhalb der Einbettwanne zur nachfolgenden Einbettung des kaudalen Wirbelsäulensegmentanteils in Gießharz - Seitliche Ansicht

Füller, Gößl & Pfaff GmbH, Karlskron, Deutschland) unter dem Normalabzug 1200 (WRT Laborbau GmbH, Stadtlohn, Deutschland) in einem Verhältnis von 1:1:2 Masseanteilen hergestellt. Danach wurde so viel Gießharz als Einbettmasse in die erste Einbettwanne eingefüllt, dass jeweils der gesamte fünfte Lendenwirbel und die kaudale Hälfte des vierten Lendenwirbels vollständig bedeckt waren. Das ausgerichtete Wirbelsäulensegment und die Einbettwanne wurden danach über 30 Minuten nicht mehr bewegt und unter dem Normalabzug

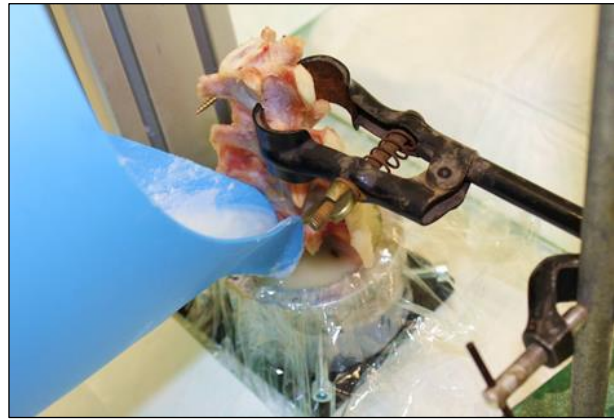


Abbildung 6: Eingießen des Gießharzes in die Einbettwanne zur Fixierung eines ausgerichteten Wirbelsäulensegments an seinem kaudalen Ende

1200 (WRT Laborbau GmbH, Stadtlohn, Deutschland) bis zur Aushärtung des Gießharzes stehen gelassen. Nach den ersten fünf Minuten der Aushärtungszeit wurden die vier M6-Schrauben jeweils um zwei Umdrehungen tiefer in den Metallring eingedreht, um das Gießharz zusätzlich zu verdichten. Nach der Aushärtezeit bestand eine feste Verbindung zwischen kaudalem Ende des Wirbelsäulensegments, Gießharz und Einbettwanne.

In einem zweiten Einbettungsschritt wurde auch das kraniale Ende (L1 und kraniale Hälfte des L2) des Wirbelsäulensegments fest in eine weitere Einbettwanne analog zu den zuvor beschriebenen Schritten in Kunstharz eingebettet. Nach Abschluss der Einbettung wurde das jeweilige Wirbelsäulensegment aus dem Abzug entnommen und bis zur biomechanischen Testung in einem mit



Abbildung 7: Vollständig eingebettetes Wirbelsäulensegment – Seitliche Ansicht

physiologischer Kochsalzlösung getränktem Baumwolltuch aufbewahrt. Durch eine derartige Einbettung der Wirbelsäulensegmente wurde für die biomechanischen Testungen eine stabile Verbindung zwischen Wirbelsäulenprüfstand und zu testendem Wirbelsäulensegment hergestellt.

3.5 Biomechanische Messung

3.5.1 Der Wirbelsäulenprüfstand

Zur biomechanischen Testung der kaninen Wirbelsäulensegmente wurde der in der Veröffentlichung von SCHLEIFENBAUM et al. (2021) beschriebene Wirbelsäulenprüfstand (SCHLEIFENBAUM et al. 2021) durch M. Eng. Elena Riemer, Dipl.-Ing. Robin Heilmann und Dr. rer. med. Stefan Schleifenbaum, Mitarbeiter des Zentrums zur Erforschung der Stütz- und Bewegungsorgane (ZESBO) des Universitätsklinikums Leipzig, entsprechend der Anforderungen dieser Studie modifiziert.

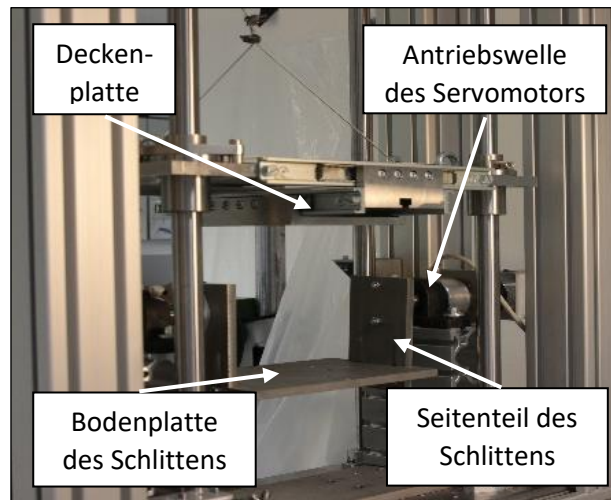


Abbildung 8: Wirbelsäulenprüfstand

Die eingebetteten Wirbelsäulensegmente wurden mithilfe der Einbettwannen vertikal in die Testvorrichtung eingespannt. Dabei wurde das kaudale Ende des Wirbelsäulensegments mit der Bodenplatte eines in zwei Richtungen beweglichen Schlittens verbunden. Das kraniale Ende des Wirbelsäulensegments wurde mit der unbeweglichen Deckenplatte des Teststandes verschraubt. Mithilfe eines Servomotors (BMH0703T01A2A, Schneider Electric GmbH, Rueil-Malmaison, Frankreich) sowie eines Getriebes (GBX060008K, Schneider Electric GmbH, Rueil-Malmaison, Frankreich) konnte der bewegliche Schlitten und der daran festgeschraubte kaudale Anteil des Wirbelsäulensegments mit einer Frequenz von 0,5 Hz und mit einem voreingestellten Drehmoment von 2 Nm in jeweils zwei entgegengesetzte Richtungen bewegt werden. Mithilfe eines in den Wirbelsäulenprüfstand integrierten Winkelmessers wurde während jeder Bewegung die jeweilige Range of Motion gemessen. Vor Start jedes biomechanischen Tests wurde darauf geachtet, dass sich die Wirbelsäulen stets in der gleichen Ausgangsposition befanden. Dazu wurde eine elektrische Wasserwaage genutzt, mit deren Hilfe der bewegliche Schlitten horizontal und parallel zur unbeweglichen Deckenplatte des Prüfstandes ausgerichtet wurde.



Abbildung 9: Ausrichtung eines eingebetteten Wirbelsäulensegments innerhalb des Wirbelsäulenprüfstandes entsprechend der Ausgangsposition

3.5.2 Nicht destruktive Tests

Zehn Wirbelsäulensegmente wurden jeweils in nativem Zustand, nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie von rechts zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel und nach der Durchführung einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie von rechts zwischen dem dritten und vierten Lendenwirbel biomechanisch getestet. Alle Wirbelsäulensegmente durchliefen dabei unter Anlegung eines Drehmoments von 2 Nm folgende Tests:

1. Testreihe 1: Native Wirbelsäulensegmente (ohne gefräste Partielle Laterale Korpektomie)
 - 1.1. Zehn Bewegungszyklen Extension und Flexion
 - 1.2. Zehn Bewegungszyklen links- und rechtslaterale Biegung
 - 1.3. Zehn Bewegungszyklen Torsion nach links und rechts
2. Testreihe 2: Operierte Wirbelsäulensegmente mit einer Partiellen Lateralen Korpektomie zwischen L2 und L3 von rechts
 - 2.1. Zehn Bewegungszyklen Extension und Flexion
 - 2.2. Zehn Bewegungszyklen links- und rechtslaterale Biegung
 - 2.3. Zehn Bewegungszyklen Torsion nach links und rechts
3. Testreihe 3: Operierte Wirbelsäulensegmente mit zwei Partiellen Lateralen Korpektomien zwischen L2 und L3 sowie L3 und L4 von rechts
 - 3.1. Zehn Bewegungszyklen Extension und Flexion
 - 3.2. Zehn Bewegungszyklen links- und rechtslaterale Biegung
 - 3.3. Zehn Bewegungszyklen Torsion nach links und rechts

Als ein Bewegungszyklus wurde die Bewegung des Wirbelsäulensegments zwischen zwei maximalen Winkeln innerhalb einer Bewegungsrichtung, also maximale Extension und maximale Flexion, maximale linkslaterale und maximale rechtslaterale Biegung sowie maximale Torsion nach links und maximale Torsion nach rechts, definiert. Insgesamt durchlief jedes Wirbelsäulensegment somit pro Testreihe dreißig Bewegungszyklen. Um jeweils eine Partielle Laterale Korpektomie in das zu testende Wirbelsäulensegment einfräsen zu können, wurde es aus dem Wirbelsäulenprüfstand entfernt und nach Vollendung der Fräsarbeiten wieder in den Wirbelsäulenprüfstand eingeschraubt, um mit der biomechanischen Testung fortfahren zu können.

Zusätzlich zu den zehn getesteten Wirbelsäulensegmenten, die jeweils zwei Partielle Laterale Korpektomien erhielten, durchlief ein weiteres Wirbelsäulensegment, das Wirbelsäulensegment 9, ebenfalls alle drei Testreihen. Bei diesem Wirbelsäulensegment wurden jedoch keinerlei Partielle Laterale Korpektomien vorgenommen. Die während der biomechanischen Testung des Wirbelsäulensegments 9 gemessenen Winkel wurden nicht für die spätere Datenanalyse verwendet.

Sie sollten lediglich der Abschätzung des Effekts der biomechanischen Testung selbst auf die Wirbelsäulensegmente dienen. Nach Beendigung der drei Testreihen befand sich das Wirbelsäulensegment 9 somit noch immer in nativem Zustand.

3.5.2.1 Testreihe 1: Biomechanische Messungen an den nativen Wirbelsäulensegmenten (ohne gefräste Partielle Laterale Korpektomie)

Die biomechanischen Tests wurden zunächst an den elf nativen Wirbelsäulensegmenten durchgeführt.

3.5.2.1.1 Extension und Flexion

Zur Testung der Extension und Flexion wurde das jeweilige Wirbelsäulensegment so innerhalb des Wirbelsäulenprüfstandes ausgerichtet, dass die gedachte Mediane des Wirbelsäulensegments (sagittale Schnittebene durch das Wirbelsäulensegment) senkrecht zur Bezugsebene ausgerichtet war. Als Bezugsebene definiert wurde dabei diejenige senkrechte Ebene zwischen Decken- und Bodenplatte des Schlittens, die längs durch die Antriebswellenachse verläuft. So in den

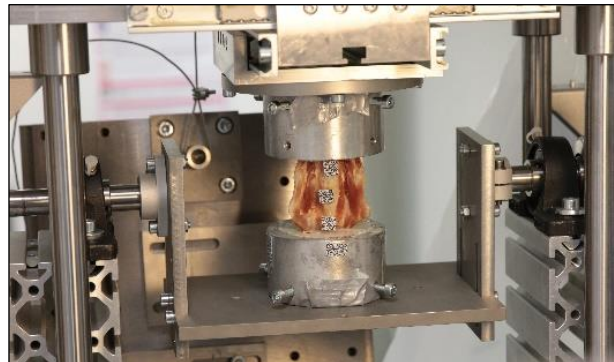


Abbildung 10: Wirbelsäulensegment eingespannt in Wirbelsäulenprüfstand zur Testung der Extension und Flexion, Ansicht des Wirbelsäulensegments von ventral

Wirbelsäulenprüfstand eingespannt, wurden nun pro Wirbelsäulensegment zehn Bewegungszyklen mit einer Frequenz von 0,5 Hz und einem Drehmoment von 2 Nm durchlaufen.

3.5.2.1.2 Links- und rechtslaterale Biegung

Zur Testung der links- und rechtslateralen Biegung musste das eingebettete Wirbelsäulensegment innerhalb des Wirbelsäulenprüfstandes um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden. Die gedachte Mediane des Wirbelsäulensegments verlief somit parallel zur Bezugsebene. Der neuen Ausrichtung des Wirbelsäulensegments folgten erneut zehn Bewegungszyklen mit einer Frequenz von 0,5 Hz und einem Drehmoment von 2 Nm.

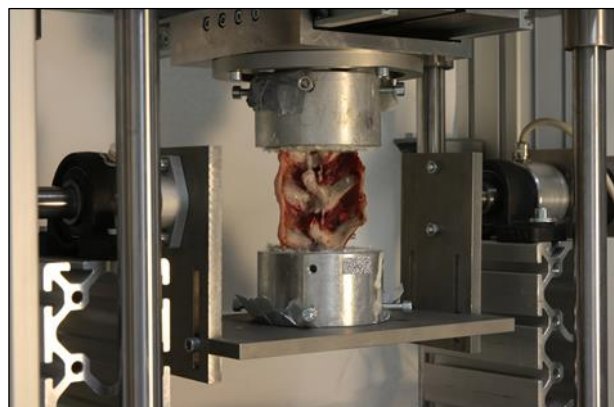


Abbildung 11: Wirbelsäulensegment eingespannt in Wirbelsäulenprüfstand zur Testung der links- und rechtslateralen Biegung, Ansicht des Wirbelsäulensegments von rechtslateral

3.5.2.1.3 Torsion nach links und rechts

Zur Testung der Torsion nach links und rechts musste der für die Messung der Range of Motion während Extension und Flexion sowie laterale Biegung genutzte bewegliche Schlitten durch einen Teller ersetzt werden, der eine rotierende Bewegung zuließ. Als Torsion nach rechts galt es, wenn sich der Teller unter Ansicht von oben im Uhrzeigersinn drehte und als Torsion nach links galt es, wenn sich der Teller unter Ansicht von oben entgegen des Uhrzeigersinns drehte.

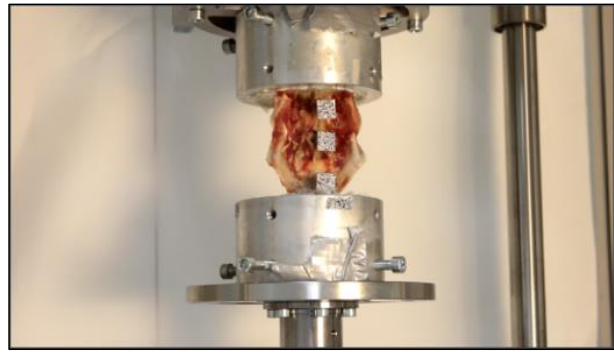


Abbildung 12: Wirbelsäulensegment eingespannt in Wirbelsäulenprüfstand zur Testung der Torsion nach links und rechts, Ansicht des Wirbelsäulensegments von ventral

Ausgerichtet wurde das Wirbelsäulensegment innerhalb des Wirbelsäulenprüfstandes entsprechend der Ausrichtung zur Testung der Extension und Flexion. Wieder folgten der neuen Ausrichtung des Wirbelsäulensegments zehn Bewegungszyklen mit einer Frequenz von 0,5 Hz und einem Drehmoment von 2 Nm.

3.5.2.2 Testreihe 2: Biomechanische Messungen an den operierten Wirbelsäulensegmenten mit einer Partiellen Lateralen Korpektomie zwischen L2 und L3 von rechts

Nach der biomechanischen Testung der nativen Wirbelsäulensegmente wurden diese jeweils aus dem Wirbelsäulenprüfstand herausgenommen, um, mit Ausnahme des Wirbelsäulensegments 9, eine Partielle Laterale Korpektomie zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel einzufräsen. Gefräst wurde stets von der rechten Seite aus mithilfe der Fräse Midas Rex Legend Electric System (Medtronic GmbH, Meerbusch, Deutschland) und einem Rosenkopfböhrer der Größe 5 mm. Kraniokaudale, dorsoventrale und laterolaterale Ausdehnung der jeweiligen

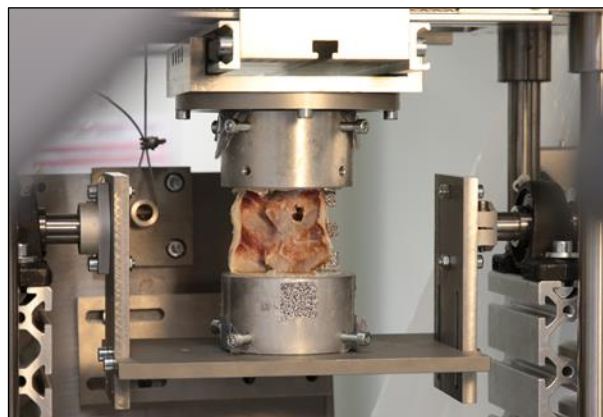


Abbildung 13: Wirbelsäulensegment nach dem Fräsen einer Partiellen Lateralen Korpektomie von rechts zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel und nach erneutem Einspannen in den Wirbelsäulenprüfstand

Fräsöffnung wurden zuvor spezifisch für jedes einzelne Wirbelsäulensegment anhand seiner Computertomographie bestimmt. Als Richtwerte dienten dazu die von MOISSONNIER et al. (2004) etablierten Ausmaße der Partiellen Lateralen Korpektomie: Die kraniale Begrenzung der Fräsöffnung

wird als das kaudale Viertel der Wirbelkörperlänge des kranial gelegenen Wirbels und die kaudale Begrenzung der Fräsöffnung als das kraniale Viertel der Wirbelkörperlänge des kaudal gelegenen Wirbels definiert. Die ventrale Begrenzung der Fräsöffnung orientiert sich an der halben Wirbelkörperhöhe und die Tiefe der Fräsöffnung an der Hälfte bis zu zwei Dritteln der Wirbelkörperbreite (MOISSONNIER et al. 2004).

Nach dem Einfräsen der ersten Partiellen Lateralen Korpektomie wurden die jeweiligen Wirbelsäulensegmente wieder in den Wirbelsäulenprüfstand eingeschraubt und analog zur biomechanischen Testung der nativen Wirbelsäulensegmente in den drei Bewegungsrichtungen (Extension und Flexion, links- und rechtslaterale Biegung, Torsion nach links und rechts) in jeweils zehn Bewegungszyklen mit einem Drehmoment von 2 Nm und mit einer Frequenz von 0,5 Hz getestet. Die jeweilige Range of Motion wurde wie bereits während der Testreihe 1 über den in den Prüfstand integrierten Winkelmesser ermittelt.

3.5.2.3 Testreihe 3: Biomechanische Messungen an den operierten Wirbelsäulensegmenten mit zwei Partiellen Lateralen Korpektomien zwischen L2 und L3 sowie L3 und L4 von rechts

Nach Beendigung der zweiten Testreihe wurde in die Wirbelsäulensegmente eine zweite Partielle Laterale Korpektomie eingefräst; mit Ausnahme des Wirbelsäulensegments 9. Dazu wurde das jeweils zu testende Wirbelsäulensegment erneut aus dem Wirbelsäulenprüfstand herausgenommen und für den Fortgang der biomechanischen Testung wieder in den Prüfstand eingeschraubt. Auch hierbei wurden die zu erreichenden Ausdehnungen der Fräsöffnungen zuvor anhand der Computertomographie für jedes

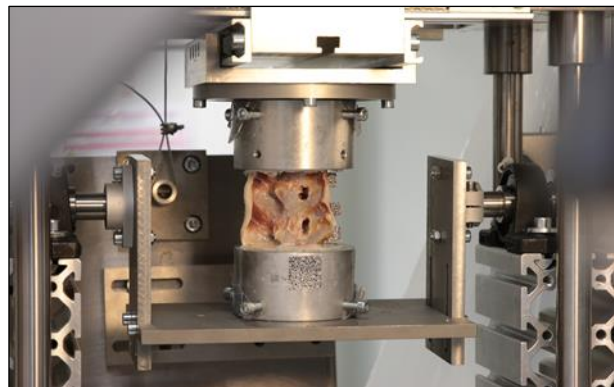


Abbildung 14: Wirbelsäulensegment nach dem Fräsen einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie von rechts zwischen dem dritten und vierten Lendenwirbel und nach erneutem Einspannen in den Wirbelsäulenprüfstand

Wirbelsäulensegment spezifisch ermittelt. Lokalisation für die zweite Partielle Laterale Korpektomie war der Zwischenwirbelspalt L3-L4 von der rechten Seite ausgehend. Der Fräsung folgte die dritte Testreihe.

3.5.3 Destruktive Tests - Versagenstests

Nach der Durchführung der biomechanischen Tests zur Quantifizierung der Range of Motion an den elf Wirbelsäulensegmenten wurden die Wirbelsäulensegmente 9 und 11 jeweils einem Versagenstest unterzogen. Wirbelsäulensegment 11 wurde dabei durch das Zufallsprinzip unter allen Wirbelsäulensegmenten ausgewählt, die zwei Partielle Laterale Korpektomien erhalten hatten. Wirbelsäulensegment 9 wurde ausgewählt, da dieses die drei Testreihen in nativem Zustand durchlaufen hatte. Die zwei ausgewählten Wirbelsäulensegmente wurden ausschließlich in links- und rechtslateraler Biegung in verschiedenen Belastungsstufen getestet. Die Belastungsstufen wurden von einem Ausgangswert von 3 Nm ausgehend sukzessive um jeweils 1 Nm gesteigert. Pro Belastungsstufe wurden die Wirbelsäulensegmente stets während zehn Bewegungszyklen getestet. Der Versagenstest galt als beendet, sobald das Wirbelsäulensegment makroskopisch sichtbar zerbarst oder die maximale Testkapazität des Wirbelsäulenprüfstandes von 25 Nm erreicht war.

3.6 Postoperative Computertomographie

Nach Durchführung aller biomechanischen Untersuchungen wurden alle Wirbelsäulensegmente erneut einer Computertomographie unterzogen. Anhand dieser Computertomographien wurde untersucht, ob die biomechanischen Tests selbst zu Gewebeschäden, wie Frakturen oder Rupturen von Bandscheiben oder Bandstrukturen, führten, die die Messergebnisse hätten beeinflussen können. Verglichen wurden die postoperativ entstandenen Computertomographien mit denjenigen Computertomographien, die zum Ein- bzw. Ausschluss der Wirbelsäulensegmente in die Studie genutzt worden waren. Für die Computertomographie wurde der IQon Spectral CT (Koninklijke Philips N.V., Amsterdam, Niederlande) in der Klinik für Kleintiere der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig verwendet. Die Computertomographie erfolgte in helikaler Akquisition mit einer Schichtdicke von 0,9 mm bei einer Überlappung von 0,45 mm. Je nach Größe der Patienten wurde eine Strahlendosis von 120 bis 140 kV und 100 mAs verwendet. Beurteilt wurden die entstandenen Bilder in sagittalen und auch transversalen Schnittebenen in Knochen- und Weichteilrekonstruktion durch zwei Untersucher im Consensus.

3.7 Statistische Auswertung

Die während der biomechanischen Testung entstandenen Messdaten wurden mithilfe des Programms Excel für Mac Version 16.47 (21031401) (Microsoft Corporation, Redmond, USA) aggregiert und die Zunahme der Range of Motion in absoluten und prozentualen Angaben dargestellt.

Die weitere statistische Auswertung erfolgte unter Nutzung des Programms SPSS Statistics 27 (IBM Corporation, Armonk, USA). Als Globaltest zur Überprüfung auf Gleichheit der gepaarten

Stichproben wurde der Friedman-Test genutzt, für dessen Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ gewählt wurde. Nach dem Abschlusstestprinzip wurden paarweise Kontraste gepaarter Stichproben mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests dargestellt. Auch für den Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wurde stets ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ gewählt.

4. Ergebnisse

4.1 Nicht destruktive Tests

Durch den in den Wirbelsäulenprüfstand integrierten Winkelmesser konnten für jeden Bewegungszyklus jeweils ein minimaler und ein maximaler Winkel zur Bezugsebene sowie der daraus resultierende Gesamtwinkel, die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente, ermittelt werden. Da jede Messung stets auf Höhe der Bezugsebene startete und nicht an einem Punkt der Maximalauslenkung, lief der erste Bewegungszyklus nicht vollständig ab. Somit wurde dieser auch nicht zur weiteren statistischen Auswertung herangezogen.

Während der ersten Bewegungen postmortalen Muskelgewebes bei der Durchführung biomechanischer Tests, der Präkonditionierung, richteten sich die Muskelfasern nach und nach parallel zueinander in die Richtung der Bewegung aus. Das viskoelastische Verhalten des Gewebes wird dadurch minimiert, so dass reproduzierbare Messergebnisse entstehen (WILKE et al. 1998). Der Gewebepräkonditionierung dienten die Bewegungszyklen eins bis fünf. Die aus diesen Bewegungszyklen entstandenen Messdaten wurden nicht in die Datenanalyse aufgenommen. Da sich in dieser Studie für die Bewegungszyklen sechs bis zehn gleichmäßige Ranges of Motion ableiten ließen, wurden aus ihnen Mittelwerte der Range of Motion für jedes Wirbelsäulensegment (Wirbelsäulensegment 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 10 und 11) in jeder Bewegungsrichtung und während aller drei Testreihen (nativ, eine Partielle Laterale Korpektomie und zwei Partielle Laterale Korpektomien) errechnet.

4.1.1 Gesamt-Range of Motion

Im Rahmen des durchgeführten Friedman-Tests wurde die Nullhypothese überprüft, dass nach dem Einfräsen der zwei Partiellen Lateralen Korpektomien innerhalb derselben Bewegungsrichtung kein signifikanter Unterschied im Vergleich der Mittelwerte der Range of Motion zwischen den verschiedenen Testreihen besteht. Für die Bewegungsrichtungen Extension und Flexion sowie links- und rechtslaterale Biegung konnte eine asymptotische Signifikanz von jeweils $< 0,001$ ermittelt und damit für diese Bewegungsrichtungen ein signifikanter Unterschied der Range of Motion zwischen den verschiedenen Testreihen festgestellt werden.

Bei der Bewegungsrichtung Torsion nach links und rechts ergab der Friedman-Test eine asymptotische Signifikanz von 0,5, so dass hier kein signifikanter Unterschied der Range of Motion zwischen den drei Testreihen dargestellt werden konnte. Aufgrund dessen wurde die Bewegungsrichtung Torsion nach links und rechts für die weitere statistische Auswertung mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests nicht mehr berücksichtigt.

Bewegungsrichtung	Asymptotische Signifikanz
Extension und Flexion	< 0,001
Links- und rechtslaterale Biegung	< 0,001
Torsion nach links und rechts	0,5

Tabelle 1: Ergebnisse des Friedman-Tests zur Darstellung signifikanter Unterschiede der Range of Motion zwischen den drei Testreihen (native Wirbelsäulensegmente, Wirbelsäulensegmente nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) und nach zwei PLC) innerhalb der drei Bewegungsrichtungen Extension und Flexion, links- und rechtslaterale Biegung sowie Torsion nach links und rechts bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten

Für die Bewegungsrichtungen Extension und Flexion sowie links- und rechtslaterale Biegung wurde jeweils nach dem Abschluss-Test-Prinzip ein Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zum paarweisen Vergleich der Range of Motion zwischen den drei verschiedenen Testreihen innerhalb einer Bewegungsrichtung durchgeführt. Sowohl bei Extension und Flexion, als auch bei links- und rechtslateraler Biegung zeigten sich in allen paarweisen Vergleichen signifikante Unterschiede in Bezug auf die Range of Motion zwischen den verschiedenen Testreihen.

Vergleich zwischen	Asymptotische Signifikanz während Extension und Flexion	Asymptotische Signifikanz während links- und rechtslateraler Biegung
Nativ und 1 PLC	0,009	0,007
Nativ und 2 PLC	0,005	0,005
1 PLC und 2 PLC	0,037	0,007

Tabelle 2: Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zum paarweisen Vergleich der Range of Motion zwischen den verschiedenen Testreihen (native Wirbelsäulensegmente, Wirbelsäulensegmente nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) und nach zwei PLC) während Extension und Flexion sowie links- und rechtslateraler Biegung bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten

Bei der Bewegungsrichtung Extension und Flexion wurden Mittelwerte der Range of Motion von $12,7^\circ$ (SD $3,1^\circ$) in nativem Zustand, $15,1^\circ$ (SD $1,6^\circ$) nach einer und $16,1^\circ$ (SD $2,6^\circ$) nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien gemessen. Werden diese Werte prozentual dargestellt und wird für jedes Wirbelsäulensegment 100 % als Range of Motion in nativem Zustand definiert und anschließend ein prozentualer Mittelwert für die zehn getesteten Wirbelsäulensegmente gebildet, so zeigt sich nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie für die Zunahme der Range of Motion ein Mittelwert von 122,6 %. Nach der Durchführung einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie vergrößert sich der Mittelwert der Range of Motion im Vergleich zum nativ getesteten Wirbelsäulensegment auf 130,4 %. Die Range of Motion zwischen nativem Zustand der Wirbelsäulensegmente und Zustand nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie nimmt also um 22,6 % zu. Dies entspricht einem Mittelwert der Zunahme der Range of Motion um $2,4^\circ$ (SD $1,6^\circ$). Zwischen nativem Zustand und Zustand der Wirbelsäulensegmente nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien vergrößert sich die Range of Motion um einen Mittelwert von 30,4 %, in absoluten Zahlen ausgedrückt, um einen Mittelwert von $3,4^\circ$ (SD $1,9^\circ$). Bezogen auf die Range of Motion in nativem Zustand vergrößert sich die Range of Motion zwischen dem Zustand nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie und Zustand nach einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie um 7,8 %, also $1,1^\circ$ (SD $1,7^\circ$).

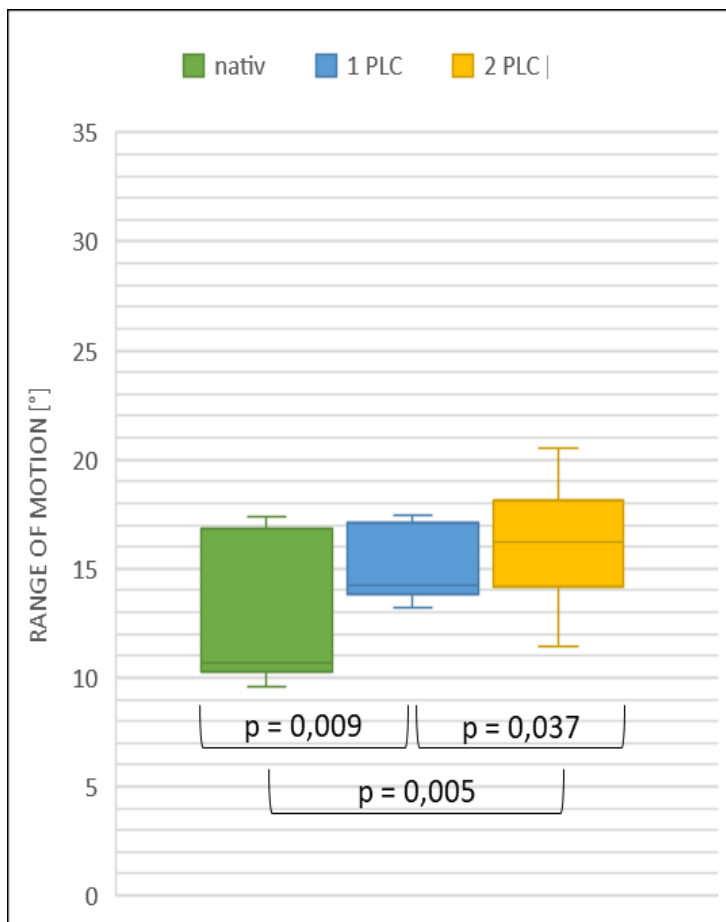


Abbildung 15: Vergleich der Range of Motion (RoM) der Wirbelsäulensegmente (WSS) in nativem Zustand mit der RoM der WSS nach der Durchführung einer und einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während Extension und Flexion bei $n = 10$ WSS. Die Boxen repräsentieren den Interquartilsabstand (Bereich der gemessenen mittleren 50 % der RoM). Der Strich innerhalb jeder Box gibt den jeweiligen Median aller erhobenen RoM innerhalb einer Testreihe an. Die Whiskers repräsentieren alle Werte, die kleiner als das erste (unterer Whisker) und größer als das dritte (oberer Whisker) Quartil sind. Die Klammern unterhalb der Boxplots zeigen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Testreihen an.

Während links- und rechtslateraler Biegung konnten Mittelwerte der Range of Motion von 25,8° (SD 3,0°) in nativem Zustand, 28,1° (SD 3,2°) nach der Durchführung einer und 29,6° (SD 3,4°) nach der Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien gemessen werden. Prozentual ausgedrückt ergibt sich somit ein Mittelwert des Zuwachses der Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie auf 109,2 %. Im Vergleich zu den nativ getesteten Wirbelsäulensegmenten vergrößert sich die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien auf 115,2 %. Die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente in nativem Zustand bei links- und rechtslateraler Biegung vergrößerte sich im Verhältnis zur Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie also um einen Mittelwert von 9,2 %, bzw. 2,3° (SD 1,9°). Zwischen nativem Zustand der Wirbelsäulensegmente und Zustand nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien vergrößerte sich die Range of Motion um einen Mittelwert von 15,2 %, in absoluten Zahlen ausgedrückt, um einen Mittelwert von 3,8° (SD 2,5°). Bezogen auf die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente in nativem Zustand vergrößert sich die Range of Motion zwischen Zustand der Wirbelsäulensegmente nach einer und Zustand nach einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie um 6,1 %. Dies entspricht 1,5° (SD 1,5°).

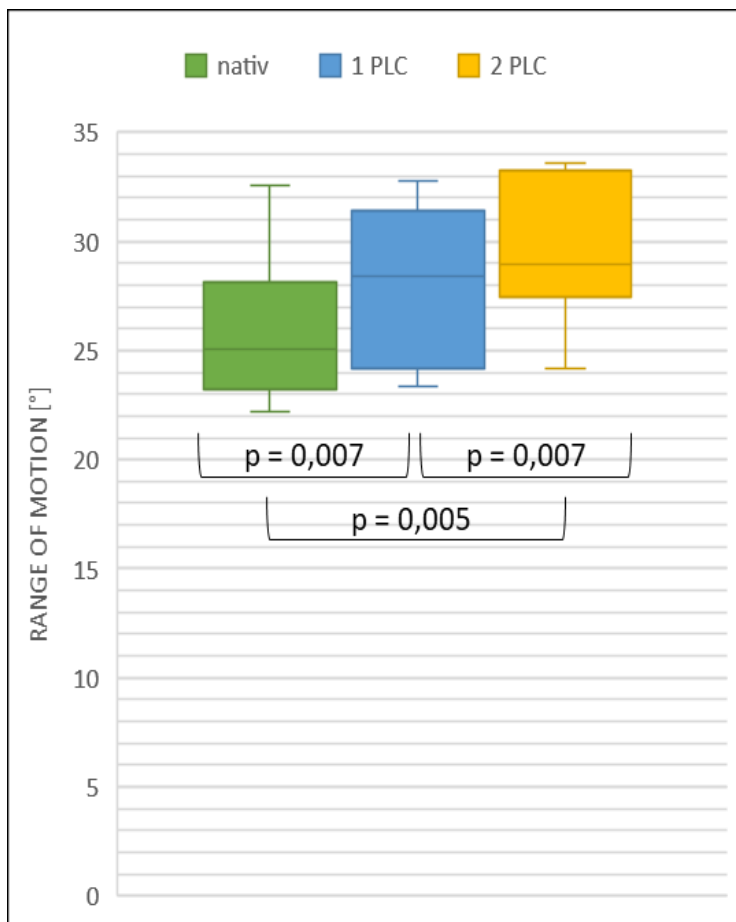


Abbildung 16: Vergleich der Range of Motion (RoM) der Wirbelsäulensegmente (WSS) in nativem Zustand mit der RoM der WSS nach der Durchführung einer und einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während links- und rechtslateraler Biegung bei n = 10 WSS. Die Boxen repräsentieren den Interquartilsabstand (Bereich der gemessenen mittleren 50 % der RoM). Der Strich innerhalb jeder Box gibt den jeweiligen Median aller erhobenen RoM innerhalb einer Testreihe an. Die Whiskers repräsentieren alle Werte, die kleiner als das erste (unterer Whisker) und größer als das dritte (oberer Whisker) Quartil sind. Die Klammern unterhalb der Boxplots zeigen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Testreihen an.

Zwischen Range of Motion der Wirbelsäulensegmente bei Torsion nach links und rechts in nativem Zustand und Zustand nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie liegt ein Mittelwertzuwachs von 2,0 %, bzw. 0,01° (SD 0,5°). Im Vergleich der Range of Motion zwischen nativem Zustand und Zustand nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien nimmt der Mittelwert um 5,5 % zu. Dies entspricht 0,2° (SD 0,7°). Bezogen auf die Range of Motion in nativem Zustand vergrößert sich die Range of Motion zwischen dem Zustand nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie und Zustand nach einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie um 3,5 %, bzw. 0,1° (SD 0,6°). Diese genannten Unterschiede zwischen den drei Testreihen während Torsion nach links und rechts sind nicht signifikant.

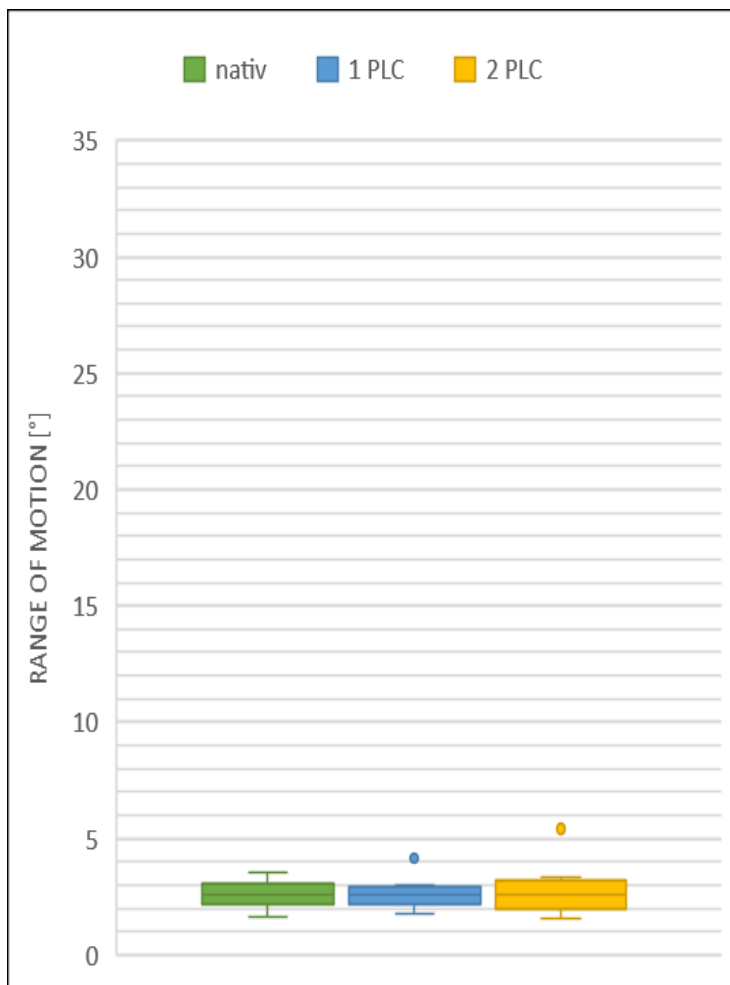


Abbildung 17: Vergleich der RoM der WSS in nativem Zustand mit der RoM der WSS nach der Durchführung einer und einer zweiten PLC während Torsion nach links und rechts bei n = 10 WSS. Die Boxen repräsentieren den Interquartilsabstand (Bereich der gemessenen mittleren 50 % der RoM). Der Strich innerhalb jeder Box gibt den jeweiligen Median aller erhobenen RoM innerhalb einer Testreihe an. Die Whiskers repräsentieren alle Werte, die kleiner als das erste (unterer Whisker) und größer als das dritte (oberer Whisker) Quartil sind, gleichzeitig aber weniger als das Eineinhalbfache des Interquartilsabstandes vom ersten oder dritten Quartil entfernt sind. Ausreißerwerte sind als Punkte markiert und liegen weiter als das Eineinhalbfache des Interquartilsabstandes von der Box entfernt.

Bewegungsrichtung	Extension und Flexion					
Wirbelsäulensegment	Range of Motion nativ		Range of Motion nach einer PLC		Range of Motion nach zwei PLC	
	[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]
1	10,3	100,0	14,1	136,3	17,3	166,9
2	10,4	100,0	14,3	137,9	14,6	141,1
3	10,3	100,0	13,9	135,2	11,5	111,6
4	10,1	100,0	13,2	130,0	13,5	132,7
5	11,0	100,0	14,2	128,9	14,4	131,0
6	17,4	100,0	17,4	100,2	18,0	103,4
7	13,9	100,0	15,7	112,5	18,2	130,6
8	17,2	100,0	17,0	98,7	20,5	119,2
10	9,6	100,0	13,6	142,3	15,2	159,1
11	16,7	100,0	17,4	104,0	18,1	108,2
Gesamt-Mittelwert	12,7	100,0	15,1	122,6	16,1	130,4
Standardabweichung	3,1	0,0	1,6	16,1	2,6	19,9
Bewegungsrichtung	Links- und rechtslaterale Biegung					
Wirbelsäulensegment	Range of Motion nativ		Range of Motion nach einer PLC		Range of Motion nach zwei PLC	
	[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]
1	28,9	100,0	32,7	113,1	33,5	115,7
2	27,8	100,0	28,1	101,1	28,6	102,7
3	25,3	100,0	28,7	113,6	33,1	131,1
4	25,7	100,0	29,0	113,1	28,8	112,1
5	22,2	100,0	23,4	105,1	24,1	108,6
6	32,6	100,0	32,3	99,1	33,6	103,0
7	24,3	100,0	27,6	113,3	29,1	119,6
8	23,4	100,0	24,2	103,6	28,5	121,8
10	22,8	100,0	23,9	104,8	24,3	106,6
11	24,9	100,0	31,1	125,0	32,6	131,0
Gesamt-Mittelwert	25,8	100,0	28,1	109,2	29,6	115,2
Standardabweichung	3,0	0,0	3,2	7,4	3,4	10,0
Bewegungsrichtung	Torsion nach links und rechts					
Wirbelsäulensegment	Range of Motion nativ		Range of Motion nach einer PLC		Range of Motion nach zwei PLC	
	[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]
1	3,0	100,0	3,0	100,0	3,1	104,8
2	2,6	100,0	2,5	97,5	1,6	61,1
3	2,6	100,0	1,8	67,9	2,0	76,7
4	2,8	100,0	2,9	102,5	2,6	91,1
5	2,4	100,0	2,4	96,5	2,4	98,8
6	3,3	100,0	2,6	78,0	3,3	100,4
7	3,5	100,0	4,2	117,9	5,4	153,2
8	2,1	100,0	2,3	106,1	2,6	120,2
10	1,6	100,0	2,0	124,8	1,9	117,1
11	2,2	100,0	2,8	129,0	2,8	131,3
Gesamt-Mittelwert	2,6	100,0	2,6	102,0	2,8	105,5
Standardabweichung	0,6	0,0	1,0	18,2	1,0	25,2

Tabelle 3: Darstellung der aus den Bewegungszyklen sechs bis zehn errechneten Mittelwerte der Range of Motion absolut [°] und prozentual [%] für den nativen Zustand der Wirbelsäulensegmente (Testreihe 1) sowie für den Zustand nach einer (Testreihe 2) und einer zweiten (Testreihe 3) Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion nach links und rechts bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten

Bewegungsrichtung	Extension und Flexion					
Wirbelsäulensegment	Zuwachs RoM nativ auf 1 PLC		Zuwachs RoM nativ auf 2 PLC		Zuwachs RoM 1 PLC auf 2 PLC	
	[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]
1	3,8	36,3	6,9	66,9	3,2	30,6
2	3,9	37,9	4,3	41,1	0,3	3,2
3	3,6	35,2	1,2	11,6	- 2,4	- 23,6
4	3,0	30,0	3,3	32,7	0,3	2,8
5	3,2	28,9	3,4	31,0	0,2	2,1
6	0,0	0,2	0,6	3,4	0,6	3,2
7	1,7	12,5	4,3	30,6	2,5	18,1
8	- 0,2	- 1,3	3,3	19,2	3,5	20,6
10	4,0	42,3	5,7	59,1	1,6	16,9
11	0,7	4,0	1,4	8,2	0,7	4,2
Gesamt-Mittelwert	2,4	22,6	3,4	30,4	1,1	7,8
Standardabweichung	1,6	16,1	1,9	19,9	1,7	14,0
Bewegungsrichtung	Links- und rechtslaterale Biegung					
Wirbelsäulensegment	Zuwachs RoM nativ auf 1 PLC		Zuwachs RoM nativ auf 2 PLC		Zuwachs RoM 1 PLC auf 2 PLC	
	[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]
1	3,8	13,1	4,5	15,7	0,7	2,6
2	0,3	1,1	0,8	2,7	0,5	1,7
3	3,4	13,6	7,9	31,1	4,4	17,5
4	3,4	13,1	3,1	12,1	- 0,2	- 1,0
5	1,1	5,1	1,9	8,6	0,8	3,5
6	- 0,3	- 0,9	1,0	3,0	1,3	3,9
7	3,2	13,3	4,8	19,6	1,5	6,3
8	0,8	3,6	5,1	21,8	4,3	18,2
10	1,1	4,8	1,5	6,6	0,4	1,8
11	6,2	25,0	7,7	31,0	1,5	6,1
Gesamt-Mittelwert	2,3	9,2	3,8	15,2	1,5	6,1
Standardabweichung	1,9	7,4	2,5	10,0	1,5	6,2
Bewegungsrichtung	Torsion nach links und rechts					
Wirbelsäulensegment	Zuwachs RoM nativ auf 1 PLC		Zuwachs RoM nativ auf 2 PLC		Zuwachs RoM 1 PLC auf 2 PLC	
	[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]
1	0,0	0,0	0,1	4,8	0,1	4,8
2	- 0,1	- 2,5	- 1,0	- 38,9	- 0,9	- 36,4
3	- 0,8	- 32,1	- 0,6	- 23,3	0,2	8,8
4	0,1	2,5	- 0,3	- 8,9	- 0,3	- 11,4
5	- 0,1	- 3,5	0,0	- 1,2	0,1	2,4
6	- 0,7	- 22,0	0,0	0,4	0,7	22,5
7	0,6	17,9	1,9	53,2	1,2	35,2
8	0,1	6,1	0,4	20,2	0,3	14,1
10	0,4	24,8	0,3	17,1	- 0,1	- 7,7
11	0,6	29,0	0,7	31,3	0,1	2,3
Gesamt-Mittelwert	0,0	2,0	0,2	5,5	0,1	3,5
Standardabweichung	0,5	18,2	0,7	25,2	0,6	18,6

Tabelle 4: Darstellung der Zunahme der Range of Motion (RoM) im Vergleich zwischen den verschiedenen Testreihen (native Wirbelsäulensegmente, Wirbelsäulensegmente nach einer und nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien (PLC)) während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion nach links und rechts bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten

Wird die Zunahme der Range of Motion zwischen den verschiedenen Testreihen bei Extension und Flexion sowie links- und rechtslateraler Biegung miteinander verglichen, so wird die Tendenz ersichtlich, dass das Einfräsen der ersten Partiellen Lateralen Korpektomie eine größere Zunahme der Range of Motion verursacht, als die zusätzliche Durchführung der zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie. Diese Tendenz soll hier für jedes einzelne Wirbelsäulensegment mithilfe von Histogrammen dargestellt werden. Die Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie und Range of Motion in nativem Zustand wird als „a“ bezeichnet. Die Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung zweier Partieller Lateralen Korpektomien und Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie wird als „b“ bezeichnet.

Die Vergleiche zwischen „a“ und „b“ zeigen, dass bei einem Großteil der untersuchten Wirbelsäulensegmente während Extension und Flexion und auch während links- und rechtslateraler Biegung „a“ größer ist als „b“ (a > b bei n = 6 während Extension und Flexion und auch bei links- und rechtslateraler Biegung). Es kann also geschlussfolgert werden, dass bei diesen, insgesamt sechs Wirbelsäulensegmenten die erste Partielle Laterale Korpektomie einen größeren Effekt auf die Range of Motion hat als die zweite Partielle Laterale Korpektomie. Während Extension und Flexion war der Effekt,

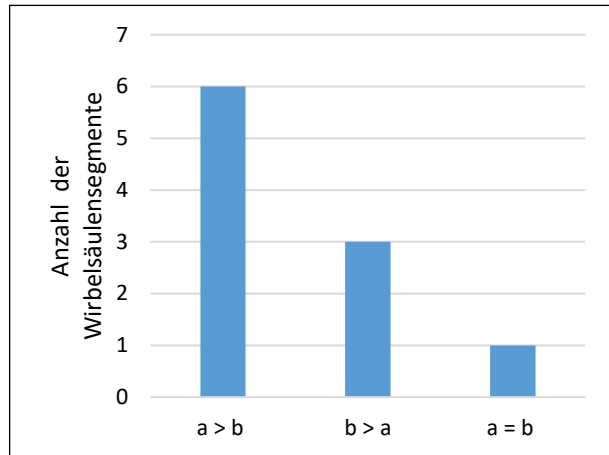


Abbildung 18: Vergleich der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie und Range of Motion in nativem Zustand (a) mit der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung zweier Partieller Lateralen Korpektomien und Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie (b) während Extension und Flexion

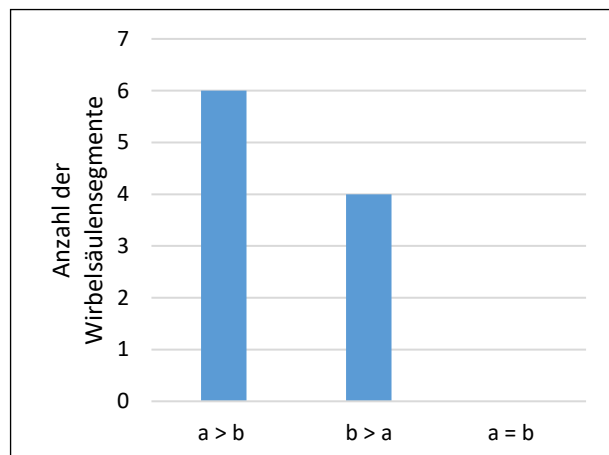


Abbildung 19: Vergleich der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie und Range of Motion in nativem Zustand (a) mit der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung zweier Partieller Lateralen Korpektomien und Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie (b) während links- und rechtslateraler Biegung

den die erste Partielle Laterale Korpektomie auf die Range of Motion verursachte, bei einem Wirbelsäulensegment gleich groß wie der Effekt der zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie.

Unter Anwendung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests wurde überprüft, ob sich die oben dargestellten Unterschiede zwischen den Differenzen auch signifikant unterscheiden. Es konnte jedoch weder für Extension und Flexion, noch für links- und rechtslaterale Biegung ein signifikanter Unterschied zwischen den Differenzen festgestellt werden.

Bewegungsrichtung	Asymptotische Signifikanz
Extension und Flexion	0,2
Links- und rechtslaterale Biegung	0,3

Tabelle 5: Vergleich der Differenzen zwischen Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie und der Range of Motion der Wirbelsäulensegmente in nativem Zustand mit der Differenz zwischen Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach der Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien und der Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zur Prüfung auf Gleichheit der Differenzen

4.1.2 Gegenüberstellung der Teil-Ranges of Motion: Extension vs. Flexion, linkslaterale Biegung vs. rechtslaterale Biegung und Torsion nach links vs. Torsion nach rechts

In der statistischen Auswertung können sowohl die Gesamt-Ranges of Motion innerhalb einer Bewegungsrichtung als auch die Teil-Ranges of Motion innerhalb der einzelnen Bewegungsrichtungen ermittelt werden, da die biomechanischen Messungen stets nach Ausrichtung der Wirbelsäulensegmente entlang der Bezugsebene erfolgten. Dadurch ist es möglich, die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente bei Extension derjenigen Range of Motion bei Flexion, die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente bei linkslateraler Biegung derjenigen Range of Motion bei rechtslateraler Biegung und die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente bei Torsion nach links derjenigen Range of Motion bei Torsion nach rechts vergleichend gegenüberzustellen.

Die paarweisen Vergleiche zwischen diesen Teil-Ranges of Motion wurden mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests durchgeführt. Signifikante Unterschiede konnten im Vergleich zwischen Extension und Flexion über alle drei Testreihen hinweg dargestellt werden. Bei der Gegenüberstellung von linkslateraler und rechtslateraler Biegung konnten nach der Durchführung einer und einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie signifikante Unterschiede zwischen den Teil-Ranges of Motion festgestellt werden.

Vergleich zwischen	Asymptotische Signifikanz in nativem Zustand	Asymptotische Signifikanz nach 1 PLC	Asymptotische Signifikanz nach 2 PLC
Extension vs. Flexion	0,022	0,022	0,017
Linkslaterale Biegung vs. rechtslaterale Biegung	0,093	0,005	0,017
Torsion nach links vs. Torsion nach rechts	0,959	0,386	0,139

Tabelle 6: Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zum paarweisen Vergleich der Teil-Ranges of Motion innerhalb derselben Bewegungsrichtung; als Signifikanzniveau wurde $p = 0,05$ gewählt

Bewegungsrichtung	Extension und Flexion					
Wirbelsäulensegment	nativ [°]		1 PLC [°]		2 PLC [°]	
	Extension	Flexion	Extension	Flexion	Extension	Flexion
1	4,5	5,9	5,3	8,8	7,1	10,1
2	2,7	7,7	2,7	11,6	3,0	11,7
3	2,2	8,1	3,1	10,8	3,8	7,7
4	2,9	7,3	4,2	9,0	4,1	9,4
5	2,9	8,1	3,4	10,8	2,9	11,5
6	8,1	9,3	8,6	8,8	6,9	11,0
7	6,2	7,7	6,0	9,7	8,8	9,3
8	8,2	9,0	8,7	8,3	11,5	9,0
10	3,4	6,1	4,1	9,5	4,2	11,1
11	9,1	7,6	8,9	8,5	9,2	8,9
Gesamt-Mittelwert [°]	5,0	7,7	5,5	9,6	6,2	10,0
Standardabweichung [°]	2,5	1,0	2,3	1,1	2,8	1,2
Bewegungsrichtung	Links- und Rechtslaterale Biegung					
Wirbelsäulensegment	nativ [°]		1 PLC [°]		2 PLC [°]	
	nach li	nach re	nach li	nach re	nach li	nach re
1	12,5	16,4	13,5	19,2	15,4	18,0
2	13,2	14,7	13,5	14,7	15,5	13,1
3	10,4	14,9	13,2	15,5	16,0	17,2
4	11,1	14,6	14,3	14,7	11,8	17,0
5	10,5	11,7	10,4	12,9	10,4	13,8
6	14,8	17,8	14,1	18,2	13,4	20,1
7	11,0	13,3	11,8	15,8	11,9	17,2
8	11,0	12,4	10,6	13,6	11,9	16,6
10	13,0	9,8	10,8	13,1	11,4	12,9
11	13,4	11,5	15,0	16,1	15,3	17,3
Gesamt-Mittelwert [°]	12,1	13,7	12,7	15,4	13,3	16,3
Standardabweichung [°]	1,4	2,3	1,6	2,0	2,0	2,2
Bewegungsrichtung	Torsion nach links und rechts					
Wirbelsäulensegment	nativ [°]		1 PLC [°]		2 PLC [°]	
	nach li	nach re	nach li	nach re	nach li	nach re
1	0,6	2,4	1,6	1,4	1,5	1,7
2	1,0	1,6	1,6	0,9	0,9	0,7
3	2,1	0,5	1,1	0,7	1,2	0,8
4	1,8	1,0	0,7	2,2	1,7	0,9
5	2,0	0,5	1,7	0,6	1,9	0,5
6	1,0	2,3	1,7	0,9	2,2	1,1
7	2,0	1,6	2,6	1,6	2,5	2,9
8	0,7	1,4	0,8	1,5	1,5	1,1
10	0,9	0,7	0,8	1,1	0,8	1,1
11	0,9	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5
Gesamt-Mittelwert [°]	1,3	1,3	1,4	1,2	1,6	1,2
Standardabweichung [°]	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,7

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Teil-Range of Motion innerhalb eines Bewegungszyklus (Extension vs. Flexion, links (li)- vs. rechtslaterale (re) Biegung, Torsion nach links (li) vs. Torsion nach rechts (re)) in absoluten Werten bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten

Bewegungsrichtung	Extension und Flexion					
Wirbelsäulensegment	nativ [%]		1 PLC [%]		2 PLC [%]	
	Extension	Flexion	Extension	Flexion	Extension	Flexion
1	100,0	100,0	119,5	149,0	159,8	172,2
2	100,0	100,0	102,2	150,2	112,2	151,0
3	100,0	100,0	143,2	133,0	172,3	95,3
4	100,0	100,0	145,6	123,8	141,6	129,2
5	100,0	100,0	116,3	133,5	100,7	141,9
6	100,0	100,0	106,1	95,0	85,7	118,8
7	100,0	100,0	96,0	126,0	142,1	121,3
8	100,0	100,0	106,1	91,9	139,9	100,3
10	100,0	100,0	119,4	155,0	121,9	179,9
11	100,0	100,0	98,0	111,0	101,3	116,3
Gesamt-Mittelwert [%]	100,0	100,0	115,2	126,8	127,7	132,6
Standardabweichung [%]	0,0	0,0	16,6	21,0	26,5	26,9
Bewegungsrichtung	Links- und Rechtslaterale Biegung					
Wirbelsäulensegment	nativ [%]		1 PLC [%]		2 PLC [%]	
	nach li	nach re	nach li	nach re	nach li	nach re
1	100,0	100,0	108,0	117,0	123,5	109,8
2	100,0	100,0	102,1	100,1	117,3	89,6
3	100,0	100,0	127,2	104,1	153,5	115,4
4	100,0	100,0	129,2	100,9	106,4	116,5
5	100,0	100,0	99,3	110,3	98,9	117,3
6	100,0	100,0	95,2	102,4	90,8	113,1
7	100,0	100,0	107,3	118,2	108,3	128,8
8	100,0	100,0	96,9	109,5	108,2	133,9
10	100,0	100,0	82,7	134,1	87,7	131,8
11	100,0	100,0	111,7	140,6	114,1	150,8
Gesamt-Mittelwert [%]	100,0	100,0	106,0	113,7	110,9	120,7
Standardabweichung [%]	0,0	0,0	13,5	13,3	17,7	15,7
Bewegungsrichtung	Torsion nach links und rechts					
Wirbelsäulensegment	nativ [%]		1 PLC [%]		2 PLC [%]	
	nach li	nach re	nach li	nach re	nach li	nach re
1	100,0	100,0	264,7	57,6	241,2	69,7
2	100,0	100,0	161,4	56,8	91,4	41,8
3	100,0	100,0	52,8	126,7	58,6	146,7
4	100,0	100,0	39,2	217,9	94,1	85,7
5	100,0	100,0	88,4	130,8	96,7	107,7
6	100,0	100,0	162,8	39,3	211,0	50,0
7	100,0	100,0	130,0	102,8	128,2	184,4
8	100,0	100,0	107,1	105,5	206,1	77,9
10	100,0	100,0	96,7	159,0	90,2	150,0
11	100,0	100,0	157,6	108,6	152,0	116,6
Gesamt-Mittelwert [%]	100,0	100,0	126,1	110,5	137,0	103,0
Standardabweichung [%]	0,0	0,0	62,0	50,4	59,4	44,2

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Teil-Ranges of Motion innerhalb eines Bewegungszyklus (Extension vs. Flexion, links (li)- vs. rechtslaterale (re) Biegung, Torsion nach links (li) vs. Torsion nach rechts (re)) in prozentualen Werten bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten

Im Vergleich der Teil-Range of Motion fällt auf, dass die Teil-Range of Motion in Richtung zur Partiellen Lateralen Korpektomie hin, also Flexion und rechtslaterale Biegung, stets größer ist als die Teil-Range of Motion in Richtung von der Partiellen Lateralen Korpektomie weg. So zeigen sich im Vergleich von Extension und Flexion in nativem Zustand Mittelwerte von $5,0^{\circ}$ (SD $2,5^{\circ}$) für Extension und von $7,7^{\circ}$ (SD $1,0^{\circ}$) für Flexion. Nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie wurden Mittelwerte der Range of Motion von $5,5^{\circ}$ (SD $2,3^{\circ}$) für Extension und $9,6^{\circ}$ (SD $1,1^{\circ}$) für Flexion gemessen. Nach der Durchführung der zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie entstanden Mittelwerte von $6,2^{\circ}$ (SD $2,8^{\circ}$) für Extension und $10,0^{\circ}$ (SD $1,2^{\circ}$) für Flexion. Dies entspricht bezogen auf die Teil-Range of Motion bei Extension in nativem Zustand einem Mittelwert der relativen Zunahme der Teil-Range of Motion bei Extension um 15,2 % nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie und um 27,8 % nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien. Bei Flexion wurden, bezogen auf die Range of Motion in nativem Zustand, Mittelwerte der relativen Zunahmen der Range of Motion von 26,8 % nach einer und 32,6 % nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien gemessen.

Bei links- und rechtslateraler Biegung zeigen sich in nativem Zustand Mittelwerte von $12,1^{\circ}$ (SD $1,4^{\circ}$) für linkslaterale Biegung und $13,7^{\circ}$ (SD $2,3^{\circ}$) für rechtslaterale Biegung. Im Vergleich von links- und rechtslateraler Biegung entstand nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie für linkslaterale Biegung ein Mittelwert von $12,7^{\circ}$ (SD $1,6^{\circ}$) und für rechtslaterale Biegung ein Mittelwert von $15,4^{\circ}$ (SD $2,0^{\circ}$). Im Vergleich von links- und rechtslateraler Biegung nach der Durchführung zweier Partieller Lateralen Korpektomien wurden Mittelwerte von $13,3^{\circ}$ (SD $2,0^{\circ}$) für links- und $16,3^{\circ}$ (SD $2,2^{\circ}$) für rechtslaterale Biegung ermittelt. Werden diese Werte in prozentualen Zahlen dargestellt, zeigt sich bei linkslateraler Biegung bezogen auf die Range of Motion in nativem Zustand ein Mittelwert der Zunahmen der Range of Motion um 6,0 % nach einer und um 10,9 % nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomie. Bei rechtslateraler Biegung zeigen sich Zunahmen der Range of Motion um 13,7 % nach einer und um 20,7 % nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien bezogen auf die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente für rechtslaterale Biegung in nativem Zustand.

4.2 Einfluss der biomechanischen Testung auf die Range of Motion der Wirbelsäulensegmente

Um eine allein durch die biomechanische Testung verursachte Beeinflussung der Range of Motion bzw. der Stabilität der Wirbelsäulensegmente ausschließen zu können, durchlief das Wirbelsäulensegment 9 alle drei Testreihen in nativem Zustand, also ohne Partielle Laterale Korpektomien erfahren zu haben. Im Vergleich der Messwerte innerhalb einer Bewegungsrichtung während der drei Testreihen wurden nur sehr geringe Abweichungen der Range of Motion festgestellt.

Bei Extension und Flexion vergrößerte sich die Range of Motion von 13,5° (SD 0,01°) während der ersten Testreihe auf 13,6° (SD 0,1°) während der zweiten und 13,9° (SD 0,1°) während der dritten Testreihe. Werden diese Werte prozentual dargestellt und wird 100 % als Range of Motion während der ersten Testreihe definiert, so zeigt sich in der zweiten Testreihe eine Vergrößerung der Range of Motion um 1 % und in der dritten Testreihe eine Vergrößerung der Range of Motion um 3,1 %.

Bei links- und rechtslateraler Biegung änderte sich die Range of Motion der ersten Testreihe von 24,1° auf 24,7° während der zweiten und auf 23,6° während der dritten Testreihe. Werden auch diese Werte prozentual dargestellt und 100 % als Range of Motion während der ersten Testreihe definiert, so zeigt sich in der zweiten Testreihe eine Vergrößerung der Range of Motion um 2,4 % und eine Verkleinerung der Range of Motion während der dritten Testreihe um 2,3 %.

Im Vergleich der Messwerte während Torsion nach links und rechts zeigen sich Ranges of Motion von 1,7° während der ersten, 1,7° während der zweiten und erneut 1,7° während der dritten Testreihe. Es werden in allen drei Testreihen während Torsion nach links und rechts also dieselben Ranges of Motion gemessen.

In postoperativ durchgeführten Computertomographien konnten für die Wirbelsäulensegmente 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 und 10 keine Hinweise auf eine durch die biomechanische Testung eingetretene Gewebeschädigung im Sinne von Frakturen oder Rupturen der Bandscheiben, Bandstrukturen oder Knochen festgestellt werden.

Bewegungsrichtung	RoM [°] (SD [°]) Testreihe 1	RoM [°] (SD [°]) Testreihe 2	RoM [°] (SD [°]) Testreihe 3
Extension und Flexion	13,5 (0,1)	13,6 (0,1)	13,9 (0,1)
Links- und rechtslaterale Biegung	24,1 (0,1)	24,7 (0)	23,6 (0,4)
Torsion nach links und rechts	1,7 (0)	1,7 (0)	1,7 (0)

Tabelle 9: Darstellung der Mittelwerte der Range of Motion (RoM) inklusive ihrer Standardabweichung (SD) des nativen Wirbelsäulensegments 9 über die drei verschiedenen Testreihen hinweg während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion

4.3 Destruktive Tests - Versagenstest

Für die Versagenstests wurden die Wirbelsäulensegmente 9 (nach Durchlaufen aller drei Testreihen noch immer in nativem Zustand) und 11 (nach Durchlaufen aller drei Testreihen und Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien) ausgewählt. In links- und rechtslateraler Biegung wurden beide Wirbelsäulensegmente einem ab 3 Nm beginnenden, sich sukzessive um 1 Nm steigenden Drehmoment während jeweils zehn Bewegungszyklen ausgesetzt.

Bis zum Erreichen der maximalen Testkapazität des Wirbelsäulenprüfstandes bei 25 Nm konnten beim nativen Wirbelsäulensegment 9 während des Versagenstests keinerlei makroskopische Gewebszerreißen festgestellt werden. Unter Anlegung eines Drehmoments von 13 Nm stellten sich bei Wirbelsäulensegment 11 makroskopisch deutlich sichtbare Gewebszerreißen im Bereich des rechten Lig. intertransversarium zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel ein.



Abbildung 20: Gewebszerreißen zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel bei Wirbelsäulensegment 11 während des Versagenstests unter lateraler Biegung nach der Anlegung eines Drehmoments von 13 Nm

5. Diskussion

5.1 Hauptaussagen

5.1.1 Nicht destruktive Tests

5.1.1.1 Gesamt-Range of Motion

Im Rahmen der in dieser Studie durchgeführten nicht-destruktiven Tests konnte nachgewiesen werden, dass die Range of Motion der kaninen Lendenwirbelsäule nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie in den Bewegungsrichtungen links- und rechtslaterale Biegung um 9,2 % und Extension und Flexion um 22,6 % signifikant zunimmt. Auch das Einfräsen einer zweiten, benachbarten Partiellen Lateralen Korpektomie führt zu einer weiteren signifikanten Zunahme der Range of Motion des jeweils untersuchten Wirbelsäulensegments; bezogen auf die Range of Motion in nativem Zustand bei links- und rechtslateraler Biegung um weitere 6,1 % und bei Extension und Flexion um weitere 7,8 %. Bei Torsion nach links und rechts hingegen wurden weder nach der Durchführung einer, noch nach der Durchführung einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie signifikante Zunahmen der Range of Motion festgestellt. Geht man davon aus, dass die Vergrößerung der Range of Motion durch eine Verminderung der Stabilität der Wirbelsäulensegmente verursacht wird, kann geschlossen werden, dass jede Partielle Laterale Korpektomie zu einer Reduktion der Stabilität des jeweiligen Wirbelsäulensegments während links- und rechtslateraler Biegung und auch während Extension und Flexion führt. Vergleicht man bei links- und rechtslateraler Biegung und auch bei Extension und Flexion die Zunahmen der Range of Motion, so scheint die Tendenz zu bestehen, dass die erste Partielle Laterale Korpektomie im Vergleich zur zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie einen größeren destabilisierenden Effekt auf das Wirbelsäulensegment hat. Erwartet worden war ursprünglich, dass, jeweils bezogen auf die Range of Motion in nativem Zustand, die Durchführung der zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie zu einer ungefähr doppelt so großen, mindestens aber gleich großen Zunahme der Range of Motion führen würde wie die Durchführung der ersten Partiellen Lateralen Korpektomie. Die Ursache des nicht linearen Zuwachses der Range of Motion liegt möglicherweise in den passiven Strukturen der Wirbelsäule, wie z.B. den Bändern (Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Lig. flavum, Lig. longitudinale dorsale, Lig. longitudinale ventrale), Bandscheiben und Kapseln der Facettengelenke, begründet. Erst an ihren Belastungsgrenzen unter Zug entwickeln diese Strukturen reaktive Kräfte, die einer Deformierung der Wirbelsäule entgegenwirken (CORSE et al. 2003, NG et al. 2003). Die Wirbelsäule ist dadurch flexibel während leichter Belastung, wird jedoch bei zunehmender Belastung auch zunehmend steifer (PANJABI 2003). Möglicherweise wird durch das Einbringen der zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie eine derart große Zunahme der Range of Motion erreicht, dass die passiven Strukturen der Wirbelsäule bereits beginnen, der

Winkeländerung des operierten Wirbelsäulensegments entgegenzuwirken. Jede weitere Partielle Laterale Korpektomie hätte möglicherweise somit bis zum vollständigen Versagen des betroffenen Wirbelsäulensegments einen immer kleiner werdenden Effekt auf die Vergrößerung der Range of Motion und damit auf die Destabilisierung des Wirbelsäulensegments. Dass der Unterschied zwischen Effekt der ersten und Effekt der zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie auf die Range of Motion jedoch nicht signifikant ist, liegt möglicherweise an der geringen Anzahl der untersuchten Wirbelsäulensegmente und der damit verbundenen, teilweise recht hohen Standardabweichung der Messergebnisse. Auch die unterschiedlichen Eigenschaften der Wirbelsäulensegmente selbst könnten hier Auswirkungen zeigen und die Feststellung signifikanter Unterschiede verhindert haben. Die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Differenzen zwischen den Ranges of Motion der einzelnen Testreihen sollte deswegen im Rahmen weiterer Studien mit einer größeren Anzahl an Wirbelsäulensegmenten erneut untersucht werden.

Die Range of Motion während lateraler Biegung ist in allen drei Testreihen, also auch bereits vor dem Einfräsen der ersten Partiellen Lateralen Korpektomie, im Vergleich zur Range of Motion der anderen zwei Bewegungsrichtungen deutlich größer. In diesem Zusammenhang ist die Anatomie der Wirbelsäule von besonderer Bedeutung und liefert mögliche Erklärungsansätze. Die Orientierung vieler Bandstrukturen innerhalb der Lendenwirbelsäule verläuft in sagittaler Ebene. So spannen sich Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Lig. longitudinale dorsale und Lig. longitudinale ventrale jeweils mit nur geringer seitlicher Ausdehnung in kraniokaudaler Richtung zwischen verschiedenen Anteilen zweier benachbarter Wirbel auf. Auf diese Art und Weise obliegt es ihnen, durch Kompensation von Zugkräften Extension und Flexion zu begrenzen und die Range of Motion in dieser Bewegungsrichtung somit zu limitieren. Bestätigung dieser Aussage kann in einer Studie von YANG et al. (2016) gefunden werden. Werden Nucleus pulposus und Ligamentum longitudinale dorsale chirurgisch beeinträchtigt, verursacht dies postoperativ in vitro eine deutliche Zunahme der Range of Motion bei dorsaler und ventraler Biegung der Wirbelsäule (YANG et al. 2016). Die laterale Biegung kann weitestgehend ohne die Einflussnahme dieser Strukturen ablaufen, so dass absolut größte Ranges of Motion bei lateraler Biegung erklärbar sind.

Unter den drei während der biomechanischen Tests untersuchten Bewegungsrichtungen ist die Torsion nach links und rechts die einzige Bewegungsrichtung, bei der durch das Einfräsen der zwei Partiellen Lateralen Korpektomien in die untersuchten Wirbelsäulensegmente während der biomechanischen Testung keine signifikante Zunahme der Range of Motion verursacht wurde. Dies entspricht den Ergebnissen der Studie von VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012), da sich hier nach Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie während Torsion ebenfalls keine signifikante

Zunahme der Range of Motion zeigte. Sicherlich wirken auch bei Torsion die passiven Strukturen der Wirbelsäule (Bänder, Bandscheiben und Gelenkkapseln) der Destabilisierung der Wirbelsäulensegmente durch eine Partielle Laterale Korpektomie entgegen (NG et al. 2003). Bedeutsamer für die Wirbelsäulenstabilität unter Torsion scheinen jedoch die Facettengelenke zu sein. Sie verhindern eine signifikante Zunahme der Range of Motion unter Torsion (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012, NG et al. 2003, ZDEBLICK et al. 1993, PANJABI 2003). Durch den kraniokaudal verlaufenden Gelenkspalt stehen sich die zwei knöchernen Anteile der Facettengelenke, der Proc. articularis cranialis und der Proc. articularis caudalis, so gegenüber, dass die Gelenkflächen unter der tordierenden Bewegung gewissermaßen auf einander gepresst werden und somit die Torsion blockieren. Eine weitere Torsion wäre so nur noch nach Fraktur eines Facettengelenkes möglich. In der Humanmedizin ist bekannt, dass die Facettengelenke in Zusammenarbeit mit der Bandscheibe desselben Segments die maximale intervertebrale Range of Motion bei Torsion auf zwei bis drei Grad [°] in jede Richtung (links und rechts) beschränken (PANJABI 2003, HUKINS et al. 2001). Möglicherweise sind es auch die Facettengelenke, die sich dafür verantwortlich zeichnen, dass die Zunahme der Range of Motion über die drei Testreihen dieser Studie hinweg bei links- und rechtslateraler Biegung (Zunahme der Range of Motion nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie um 9,2 % und nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien um 6,1 %) geringer ausfällt als bei Extension und Flexion (Zunahme der Range of Motion nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie um 22,6 % und nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien um 7,8 %). Auch FAUBER et al. (2006), die in ihrer in vitro Studie den Effekt einer Bandscheibenfenestration und den Effekt eines Ventral Slots auf die Range of Motion des Halswirbelsäulensegments C5-C6 untersuchten, sahen einen deutlichen Beitrag der Facettengelenke an der Wirbelsäulenstabilität unter lateraler Biegung und Torsion (FAUBER et al. 2006).

5.1.1.2 Teil-Ranges of Motion

Während des Vergleichs der entstandenen Teil-Ranges of Motion innerhalb der Gesamt-Range of Motion bei links- und rechtslateraler Biegung ist auffällig, dass an der nativen Wirbelsäule zunächst kein signifikanter Unterschied besteht. Nach Durchführung einer und auch nach einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie entsteht jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Seiten mit absolut größeren Teil-Ranges of Motion und größerem Zuwachs der Range of Motion zwischen den verschiedenen Testreihen nach rechts, also hin zur Seite der Partiellen Lateralen Korpektomie. Dass initial kein signifikanter Seitenunterschied zwischen links- und rechtslateraler Biegung besteht, steht höchstwahrscheinlich mit der anatomischen Symmetrie zwischen linker und rechter Seite der Wirbelsäulensegmente in Zusammenhang. Nach Einfräsen der beiden Partiellen Lateralen Korpektomien auf der rechten Seite der Wirbelsäulensegmente geht die Integrität der

betroffenen Bandscheiben verloren, so dass ihre Funktion als Kompensator kompressiver Kräfte möglicherweise seitenbetont reduziert wird. Das Resultat ist eine asymmetrische Vergrößerung der Range of Motion mit größeren Winkeln hin zur operierten, rechten Seite.

Da keine Symmetrie zwischen ventraler und dorsaler Hälfte der Wirbelsäulensegmente besteht, ist es nachvollziehbar, dass sich die Winkel bzw. Ranges of Motion zwischen Extension und Flexion an den Wirbelsäulensegmenten von Beginn der biomechanischen Testungen an signifikant von einander unterscheiden. Der kleinere absolute Winkel entfällt dabei auf die Extension (Winkel-Mittelwert Extension an Wirbelsäulensegmenten in nativem Zustand 5°; Winkel-Mittelwert Flexion an Wirbelsäulensegment in nativem Zustand 7,7°). Nach der Schwächung des Lig. longitudinale dorsale und des dorsalen Anulus fibrosus durch Einbringen der Partiellen Lateralen Korpektomien hätte eine Angleichung der beiden Teilwinkel während Extension und Flexion zustande kommen können. Doch scheinen die übrige Bandscheibe und das Lig. longitudinale ventrale die während Extension auf sie einwirkenden Drehmomente noch derart gut kompensieren zu können, dass auch nach den durchgeführten Partiellen Lateralen Korpektomien weiterhin signifikante Unterschiede zwischen Extension und Flexion bestehen bleiben und sich die Ranges of Motion nicht angleichen.

5.1.2 Destruktive Tests - Versagenstests

Die destruktiven Tests wurden für beide getesteten Wirbelsäulensegmente in links- und rechtslateraler Biegung durchgeführt, da diese die einzige Bewegungsrichtung darstellte, für die sowohl diese Studie, als auch die Studien von VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) und VICENTE et al. (2013) eine signifikante Zunahme der Range of Motion nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie bei gleichzeitig größten absoluten Zunahmen [°] der Range of Motion festgestellt werden konnte (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012, VICENTE et al. 2013). Die Versagenstests ermöglichten zusätzlich zu den durchgeführten nicht-destruktiven Tests zur Quantifizierung der Wirbelsäulenstabilität eine Einschätzung der Wirbelsäulenstärke (CORSE et al. 2003). Die Wirbelsäulenstärke zeigt an, bis zu welcher Belastung die Integrität der untersuchten Wirbelsäulensegmente erhalten bleibt. Die Belastbarkeit unterschiedlicher Strukturen hängt dabei von verschiedenen Charakteristika, wie dem Gewebe, aus dem die Struktur besteht (z.B. Knochen, Knorpel, Fettgewebe etc.), seinen mechanischen Eigenschaften, seiner Form und der Belastung selbst, ab (MYERS und WILSON 1997). Ist die Stärke eines Gewebes kleiner als die Belastung, der es ausgesetzt wird, so kommt es zu einem Versagen (MYERS und WILSON 1997). Als Versagenslast wurde in dieser Studie dasjenige Drehmoment definiert, bei dem Zusammenhangstrennungen innerhalb des Wirbelsäulensegments makroskopisch sichtbar wurden.

Auch im Rahmen dieser Versagenstests konnte die Destabilisierung der untersuchten Lendenwirbelsäulensegmente durch das Einfräsen von Partiellen Lateralen Korpektomien dargestellt

werden. War es nicht möglich, während der Versagenstests unter lateraler Biegung makroskopische Schäden am nativen Wirbelsäulensegment 9 bis zu einer Belastung mit 25 Nm festzustellen, durchriss das Wirbelsäulensegment 11 mit zwei eingefügten Partiellen Lateralen Korpektomien auf Höhe des Zwischenwirbelbereiches L2-L3 bereits unter Anlegung eines Drehmoments von 13 Nm. Die physiologische Belastung kaniner Lendenwirbelsäulen wird mit 2 Nm angenommen (SMOLDERS et al. 2012b). Um die während der Versagenstests entstandenen Ergebnisse besser einordnen zu können, eignet sich der Vergleich zu diesem, für die kanine Lendenwirbelsäule als physiologisch angesehenen Drehmoment. Die Versagenslast des Wirbelsäulensegments 11 mit zwei Partiellen Lateralen Korpektomien ist mehr als sechsmal so groß wie das als physiologisch angesehenene Drehmoment. Die minimale Versagenslast des nativen Wirbelsäulensegments 9 ist sogar mehr als zwölfmal so groß. Unter physiologischer Belastung wird die kanine Lendenwirbelsäule also höchstwahrscheinlich kaum Drehmomenten von 13 oder 25 Nm ausgesetzt werden. Sogar die biomechanischen Tests an humanen Lendenwirbelsäulen, die deutlich größer als kanine Lendenwirbelsäulen sind, werden in der Regel mit 7,5 Nm (WILKE et al. 1998) bei deutlich kleineren Drehmomenten durchgeführt als den in dieser Studie ermittelten Versagenslasten. Geschlussfolgert werden kann also, dass die kanine Lendenwirbelsäule nach Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien bei deutlich geringerer Belastung versagt als die native Lendenwirbelsäule. Die Belastungen, die dabei zum Versagen führen, sind jedoch deutlich größer als diejenigen, die der angenommenen physiologischen Belastung der kaninen Lendenwirbelsäule entsprechen. Da beide im Versagenstest geprüften Wirbelsäulensegmente, wie auch alle anderen getesteten Segmente, zuvor alle drei Testreihen mit stets der gleichen Belastung und Testhäufigkeit durchlaufen hatten, konnte eine Beeinflussung der Ergebnisse durch unterschiedliche Vorbelastungen ausgeschlossen werden. Ungewiss bleibt, bei welchem Drehmoment es zu Gewebszerreißen gekommen wäre, hätte man ein Wirbelsäulensegment mit nur einer Partiellen Lateralen Korpektomie dem Versagenstest unterzogen. Möglicherweise hätte sich, wie auch bei den nicht destruktiven Tests, ein nicht linearer Zusammenhang zwischen Anzahl der durchgeführten Partiellen Lateralen Korpektomien und der Destabilisierung bzw. Schwächung der Wirbelsäulensegmente gezeigt.

5.2 Biomechanik der kaninen Lendenwirbelsäule nach Partiellen Lateralen Korpektomien – Ein Studienvergleich

Entsprechend der Publikationen von VIZCAINO REVÉS et al. (2012) und VICENTE et al. (2013), den beiden einzigen Publikationen, die zum Vergleich der Studienergebnisse herangezogen werden können, wurden auch für diese Studie die Wirbelsäulensegmente derart präpariert, dass knöcherne, artikuläre und ligamentäre Strukturen erhalten blieben. Dies verhinderte die passive und aktive

Einflussnahme der Muskulatur auf die Testergebnisse (CORSE et al. 2003) und ermöglicht einen Vergleich der biomechanischen Eigenschaften der präparierten Wirbelsäulensegmente zwischen den drei Studien. Alle drei Studien kommen trotz eines stets unterschiedlichen Studiendesigns zu dem Schluss, dass sich während lateraler Biegung die Range of Motion signifikant vergrößert, wenn eine Partielle Laterale Korpektomie in das zu untersuchende Wirbelsäulensegment eingefräst wird. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der hier vorgelegten Studie sahen VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) auch die Range of Motion unter Extension und Flexion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie signifikant vergrößert und die axiale Rotation bzw. Torsion durch das Einfräsen einer Partiellen Lateralen Korpektomie in ihrer Range of Motion nicht signifikant beeinflusst.

Studie	Becker et al. (n = 10)		VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) (n = 10)		VICENTE et al. (2013) (n = 6)	
	nativ [°] (SD [°])	1 PLC [°] (SD [°])	nativ [°] (SD [°])	1 PLC [°] (SD [°])	nativ [°] (SD [°])	1 PLC [°] (SD [°])
Extension und Flexion	12,7 (3,1)	15,1 (1,6)	8,4 (2,4)	11,1 (3,0)	7,3 (1,0)	8,4 (1,3)
Links- und Rechtslaterale Biegung	25,8 (3)	28,1 (3,2)	18,5 (5,0)	24,4 (7,7)	16,4 (1,2)	18,7 (0,9)
Torsion nach links und rechts	2,6 (0,6)	2,6 (1)	1,5 (0,5)	2,1 (0,6)	-	-

Tabelle 10: Vergleich der in dieser Studie und den Studien von VIZCAÍNO REVÉS et al (2012) und VICENTE et al. (2013) gemessenen Ranges of Motion der Lendenwirbelsäulensegmente von Hundekadavern in nativem Zustand und im Zustand nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion nach links und rechts. Fett gedruckt sind diejenigen Messergebnisse, bei denen signifikante Zunahmen der Range of Motion zwischen nativem Zustand und Zustand nach einer PLC festgestellt wurden

Auffällig ist, dass alle gemessenen Ranges of Motion in allen getesteten Bewegungsrichtungen in der hier vorgelegten Studie größer ausfallen als in den zwei zuvor genannten Studien. Ursachen dessen sind unter Umständen in den jeweils etwas unterschiedlichen Testaufbauten und -abläufen zu finden. So wurden die Wirbelsäulensegmente in dieser Studie pro Testreihe und pro Zustand des jeweiligen Segments (nativ, nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie und nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien) in jeweils zehn Testzyklen untersucht, während der zwei Vergleichsstudien jedoch nur während vier (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012) oder fünf (VICENTE et al. 2013) Testzyklen. Auch die Präkonditionierung der Wirbelsäulensegmente wurde auf unterschiedliche Weisen vorgenommen. In der hier durchgeführten Studie wurden für jeden Messvorgang in jeder Bewegungsrichtung und in

jeder Testreihe die Bewegungszyklen eins bis fünf zur Präkonditionierung des Gewebes genutzt, da sich nach Durchsicht der Messergebnisse erst ab Bewegungszyklus 6 homogene Ranges of Motion, die zur statistischen Auswertung genutzt werden sollten, ableiten ließen. Die ersten fünf Bewegungszyklen flossen somit nicht in die statistische Auswertung mit ein. Als Präkonditionierung der zu testenden Wirbelsäulensegmente in den Studien von VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) und VICENTE et al. (2013) galten lediglich die ersten beiden (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012) bzw. der erste (VICENTE et al. 2013) Bewegungszyklus. Möglicherweise könnten die Wirbelsäulensegmente in den zwei vorgenannten Studien durch die geringere Anzahl an Bewegungszyklen zur Präkonditionierung des Gewebes steifer gewesen sein und dadurch in den Untersuchungen geringere Ranges of Motion produziert haben. Auch unter genauerer Betrachtung der in die einzelnen Studien eingeschlossenen Kadaver bestehen Unterschiede. Während in dieser Studie Kadaver von Hunden eingeschlossen wurden, die zum Zeitpunkt des Ablebens zwischen einem und zwölf Jahren alt waren, waren die Hunde in den Studien von VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) und VICENTE et al. (2013) zum Zeitpunkt ihres Todes zwischen vier und sieben bzw. zwei und fünf Jahren alt. Hinsichtlich der Körpermasse der eingeschlossenen Hundekadaver sind ebenfalls Unterschiede ersichtlich. In dieser Studie wurden Hunde mit einer Körpermasse zwischen 21 und 33 kg eingeschlossen. Bei VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) wogen die Hundekadaver zwischen 25 und 38 kg und bei VICENTE et al. (2013) zwischen 29,2 und 34,5 kg. Im Vergleich mit den zwei vorgenannten Studien ist die Altersspanne der Patienten aus dieser Studie deutlich größer und in Hinblick auf die Körpermassen der untersuchten Tierkadaver besteht zwischen den drei Studien ebenfalls eine deutliche Heterogenität. Sicherlich könnten sich auch diese Parameter auf die Messergebnisse auswirken und zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Hauptverantwortlich für die deutlichen Unterschiede der Ranges of Motion ist jedoch höchstwahrscheinlich die unterschiedliche Anzahl an getesteten Zwischenwirbelspalten. Da die Wirbelsäulensegmente in unserer Studie so eingebettet wurden, dass zwei Bandscheiben frei beweglich waren, ist die entstehende Gesamt-Range of Motion unweigerlich größer als die Range of Motion, die bei VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) und VICENTE et al. (2013) während der Testung nur eines Zwischenwirbelbereichs entsteht. Nur durch die biomechanische Testung mehrerer Zwischenwirbelspalten ist es jedoch möglich, auch komplexere biomechanische Auswirkungen nach der Durchführung multipler Partieller Lateraler Korpektomien auf multisegmentale Wirbelsäulenabschnitte und ihre stabilitätgebenden Strukturen (z.B. Ligamentum longitudinale dorsale und ventrale) abzuschätzen (CORSE et al. 2003, WHITE und PANJABI 1990). Da die beiden genannten Vergleichsstudien lediglich den Einfluss einer Partiellen Lateralen Korpektomie auf die Stabilität der Lendenwirbelsäule untersuchten, konnten sie nur über die Auswirkung zweier Partieller Lateraler Korpektomien auf die Range of Motion und die Wirbelsäulenstabilität spekulieren.

Mechanische bzw. physikalische Eigenschaften der Wirbelsäule, wie z.B. die Range of Motion, können mithilfe von Last-Verformungskurven dargestellt werden (SMIT et al. 2011, PANJABI 2003). Sie zeigen u.a. auf, bei welcher, an das zu testende Wirbelsäulensegment angelegten Last bzw. bei welchem Drehmoment welche Verformung bzw. welcher Ablenkwinkel der Range of Motion entsteht. Wie VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) in einer Vorstudie an einem Wirbelsäulensegment eines 30 kg schweren Labrador Retrievers zeigen konnten, entsteht bei der Anlegung eines Drehmoments von 2 Nm an das zu untersuchende Lendenwirbelsäulensegment eine der

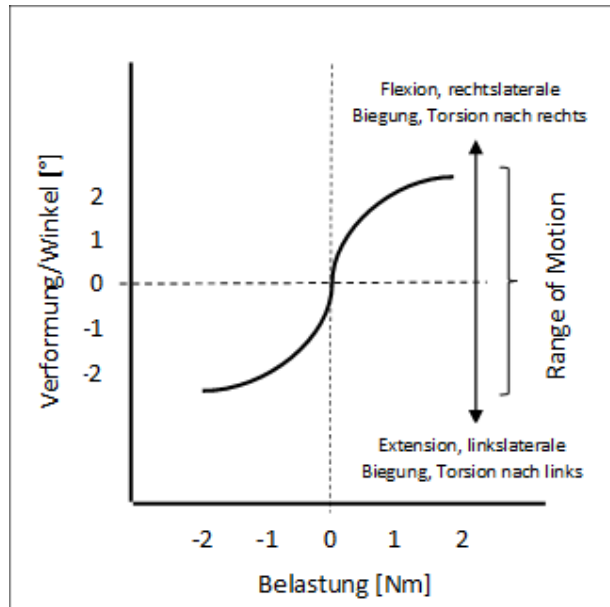


Abbildung 21: Illustrative Darstellung einer sigmoidalen Last-Verformungskurve, adaptiert nach VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012), WILKE et al. (1994) und SMOLDERS et al. (2012)

physiologischen Belastung der Wirbelsäule entsprechende sigmoidale Last-Verformungskurve, ohne dabei die Versagenslast zu erreichen (VIZCAÍNO REVÉS et al. 2012). Die biomechanischen Untersuchungen wurden deswegen in dieser Studie in Anlehnung an VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) ebenfalls mit einem Drehmoment von 2 Nm durchgeführt. Auch in ihrer biomechanischen Kadaverstudie zur Charakterisierung spinaler mechanischer Eigenschaften bei chondrodystrophen und nicht-chondrodystrophen Hunden vor und nach Nukleotomie wendeten SMOLDERS et al. (2012) ein Drehmoment von 2 Nm auf ihre zu testenden Lendenwirbelsäulensegmente an (SMOLDERS et al. 2012b). Unter Anlegung dieses Drehmoments sahen die Autoren die gesamte physiologische Range of Motion der Lendenwirbelsäulensegmente ausgeschöpft, ohne dass Schäden an den untersuchten Wirbelsäulensegmenten auftraten (SMOLDERS et al. 2012b). Natürlich muss berücksichtigt werden, dass sich die Wirbelsäulensteifheit und die Versagenslast für jedes Wirbelsäulensegment entsprechend der Größe und des Gewichts des Spendertieres unterscheiden (SCHULZ et al. 1996). Um diese Studie an Patienten bzw. Wirbelsäulensegmenten mit möglichst ähnlichen Versagenslasten bzw. biomechanischen Eigenschaften durchführen, und damit aussagekräftige Ergebnisse generieren zu können, wurde eine hinsichtlich der Körpermasse möglichst homogene Population an Spendertieren ausgewählt. Die Körpermasse der in diese Studie inkludierten Spendertiere betrug zwischen 21,0 kg und 33,0 kg. Ob das ausgewählte Drehmoment von 2 Nm jedoch für alle Wirbelsäulensegmente der tatsächlichen physiologischen Belastung entsprach, ist ungewiss und hätte z.B. anhand eines

biomechanischen Vortests für jedes einzelne Wirbelsäulensegment an einem anderen Wirbelsäulensegment mit gleichen biologischen Eigenschaften getestet werden können.

5.3 Limitationen der Studie

Mehrere Faktoren des Versuchsaufbaus und auch dessen Durchführung könnten sich potentiell in unerwünschter Weise auf die Ergebnisse der biomechanischen Tests ausgewirkt haben. Einer dieser Faktoren ist die geringe Anzahl der getesteten Wirbelsäulensegmente ($n = 10$). Obwohl auch VIZCAINO REVÉS et al. (2012) ($n = 10$) und VICENTE et al. (2013) ($n = 6$) in ihren Studien nicht mehr Wirbelsäulensegmente testeten und die Studien untereinander somit wiederum gut vergleichbar sind, hätten statistische Schwankungen durch eine größere Anzahl zu testender Wirbelsäulensegmente besser ausgeglichen werden können. Die Überprüfung des Einflusses der Testung selbst auf die Messergebnisse wurde anhand eines einzigen Wirbelsäulensegmentes (Wirbelsäulensegment 9) durchgeführt. Auch hier hätte den Messergebnissen mithilfe einer höheren Anzahl an getesteten Wirbelsäulensegmenten eine größere statistische Aussagekraft verliehen werden können. Eine Darstellung möglicherweise vorliegender signifikanter Unterschiede der Range of Motion zwischen den drei Testreihen am nativen Wirbelsäulensegment 9 war anhand der Anzahl ($n = 1$) nicht möglich. Aus diversen human- und auch veterinärmedizinischen biomechanischen Studien an der Lendenwirbelsäule ist bekannt, dass sowohl in vivo als auch in vitro durch die wiederholte Belastung in immer gleicher Art und Weise Schäden, besonders im Bereich der Endplatten und des subchondralen spongiösen Knochens der Wirbelkörper, auftreten können (HANSSON et al. 1988, BLAZINA et al. 1962, HANSSON et al. 1987, BROWN et al. 1957, HARDY et al. 1958, ADAMS und HUTTON 1983, LIU et al. 1983, HASEGAWA et al. 1995, GALLAGHER et al. 2007, HANSSON und ROOS 1981). Diese sogenannten Ermüdungsläsionen stellen sich z.B. als Frakturen der Endplatten und Schmorl Knoten (GALLAGHER et al. 2007, HANSSON et al. 1988) dar und haben das Potential, Ergebnisse, die z.B. während biomechanischer Untersuchungen der Range of Motion entstehen, zu beeinflussen. Ermüdungsläsionen entstehen nicht nur unter maximaler Belastung des Gewebes, sondern bereits bei physiologischen Belastungen oder Lasten, die deutlich unterhalb der Versagenslast des Gewebes liegen (GALLAGHER et al. 2007, HANSSON et al. 1987). In einem kaninen Modell zur Ermüdungsbelastung von Lendenwirbelsäulensegmenten konnte gezeigt werden, dass bereits unter physiologischer Belastung mikroskopische Risse innerhalb der Wirbelkörper auftraten (HASEGAWA et al. 1995). Signifikant häufiger als bei nativen Wirbelsäulensegmenten traten diese Schäden dabei an Zwischenwirbelspalten auf, die zuvor eine Nukleotomie erfahren hatten (HASEGAWA et al. 1995). Um für unsere Studie die Aussage unterstreichen zu können, dass die biomechanische Testung selbst keine schwerwiegenden mechanischen Schäden an den Wirbelsäulensegmenten verursacht hatte, infolge

derer Messergebnisse hätten beeinflusst werden können, wurden die Wirbelsäulensegmente nach der biomechanischen Testung mithilfe von Computertomographien auf mechanische Schäden untersucht. Alle Wirbelsäulensegmente, bis auf das Wirbelsäulensegment 11, das nach der Durchführung des Versagenstestes Gewebszerreißen zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel erfuhr, wiesen computertomographisch nach der biomechanischen Testung keinerlei Destruktionen auf.

Bekannt ist es, dass das Lebensalter von Patienten einen signifikanten Einfluss auf die Steifheit bzw. die Flexibilität der jeweiligen Wirbelsäule hat (SCHULZ et al. 1996, GILLET et al. 1988). Zudem degenerieren Bandscheiben in Abhängigkeit von Lebensalter und Hunderasse unterschiedlich schnell und stark. Im Rahmen der Bandscheibendegeneration durchläuft die betroffene Zwischenwirbelscheibe kompositionelle Veränderungen, die letztendlich zu ihrer Schwächung führen (ZIRBEL et al. 2013). Negative biomechanische Auswirkungen auf Wirbelsäulenstabilität bzw. spinale Eigenschaften, wie z.B. die Range of Motion, sind dementsprechend zu erwarten (CORSE et al. 2003, BROWN et al. 2002, AIKAWA et al. 2013). Die Studienpopulation dieser biomechanischen Untersuchung war hinsichtlich ihres Alters sehr heterogen. So waren die Tiere, deren Wirbelsäulensegmente biomechanisch untersucht wurden, zum Zeitpunkt des Todes zwischen einem und zwölf Jahren alt. Es besteht somit die Möglichkeit, dass die gemessenen Ranges of Motion allein aufgrund des unterschiedlichen Alters der Hunde und der damit verbundenen unterschiedlichen Flexibilität des Gewebes und der möglicherweise unterschiedlichen Grade an Bandscheibendegeneration beeinflusst wurden. Ursache der Heterogenität in Hinblick auf das Lebensalter der Hunde war, dass dem Einschluss von wirbelsäulengesunden Patienten mit einer innerhalb der Studienpopulation möglichst homogenen Körpermasse größere Bedeutung beigemessen wurde. Wären die Einschlusskriterien dieser Studie mit einer engeren Altersspanne noch schärfer definiert worden, wäre die Kollektion geeigneter Studienpatienten kaum möglich gewesen. Um den Effekt unterschiedlicher spinaler Flexibilität infolge verschiedener Lebensalter und unterschiedlicher Wirbelsäulendegeneration auf die erhobenen Messergebnisse bestmöglich minimieren zu können, wurden vor Einschluss der jeweiligen Wirbelsäulensegmente in die Studie computertomographische Untersuchungen durchgeführt. Erst wenn keine pathologischen Veränderungen dargestellt werden konnten, die einen Einfluss auf die Biomechanik hätten haben können, erfolgte der Studieneinschluss und die biomechanische Untersuchung an dem jeweiligen Lendenwirbelsäulensegment. Dadurch, dass jedoch nur computertomographisch normalanatomische Wirbelsäulensegmente eingeschlossen wurden, war es wiederum gleichzeitig nicht möglich, die im Rahmen der Bandscheibendegeneration veränderten biomechanischen Eigenschaften eines

Wirbelsäulensegments, wie sie bei realen Bandscheibenpatienten möglicherweise zu finden sind, zu beurteilen.

Gebräuchlich ist es, zu testende Proben in der Zeit zwischen Extraktion und Testung einzufrieren (CALVO-GALLEGO et al. 2017, AZARNOOSH et al. 2017). Um eine zeitgleiche biomechanische Testung aller Wirbelsäulensegmente zu ermöglichen, war es auch für diese Studie notwendig, die Wirbelsäulensegmente über unterschiedlich lange Zeiträume hinweg gefroren aufzubewahren. Die Präparation der Wirbelsäulensegmente erfolgte zwischen dem 02.05.2020 und dem 12.09.2020. Bis zur biomechanischen Testung der Wirbelsäulensegmente am 23. und 24.09.2020 vergingen somit zwischen zwei und zwanzig Wochen, in denen die Wirbelsäulensegmente eingewickelt in ein mit physiologischer Kochsalzlösung getränktes Baumwolltuch bei -18°C gelagert wurden. In ihrer Studie zeigten GLEIZES et al. (1998), dass ein Einfrieren von Wirbelsäulensegmenten bei -18°C über einen Zeitraum von drei Monaten die elastischen Eigenschaften von Bandscheiben während Extension, Flexion und lateraler Biegung nicht beeinflusst. Dazu wurden insgesamt 24 Wirbelsäulensegmente mit einer Länge von je drei Wirbeln und zwei Zwischenwirbelspalten ovinen Tierkadavern entnommen und unmittelbar nach der Entnahme aus dem Tierkörper sowie nach drei Monaten der Lagerung bei -18°C und einem 24 Stunden andauernden Auftauprozess biomechanisch getestet (GLEIZES et al. 1998). Dass keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die biomechanischen Eigenschaften der Wirbelsäulensegmente zwischen frischem und gefrorenem Zustand festgestellt werden konnten, erklären die Autoren mit der geringen Empfindlichkeit zellarmen Gewebes, wie Bändern, Bandscheiben und Faszien, gegenüber dem Einfrieren (GLEIZES et al. 1998). Zu berücksichtigen ist jedoch, dass bei der für diese Studie genutzten Temperatur von -18°C einige Enzyme, wie z.B. die Kollagenase, nicht inaktiviert werden (TOMFORD et al. 1983, AZARNOOSH et al. 2017) und es somit aufgrund des hohen Kollagenanteils innerhalb der Bandscheiben im Rahmen fortlaufender Stoffwechselfvorgänge zu einer Degeneration des getesteten Gewebes kommen kann (AZARNOOSH et al. 2017). Diese Degeneration könnte sich möglicherweise in veränderten biomechanischen Eigenschaften der eingefrorenen und für die Testungen wieder aufgetauten Wirbelsäulensegmente im Vergleich zu frischen Wirbelsäulensegmenten äußern. Mögliche Gewebsschädigungen mit Einfluss auf die Testergebnisse könnten auch während des Einfrier- und Auftauprozesses entstanden sein. Wird gut hydriertes Gewebe sehr schnell auf Temperaturen zwischen -10°C und -15°C heruntergekühlt, können Zellen infolge einer intrazellulären Ausbildung von Eiskristallen zerstört werden (AZARNOOSH et al. 2017). Erfolgt das Einfrieren von Geweben jedoch zu langsam, treten Zellschädigungen infolge einer Zelldehydratation auf (AZARNOOSH et al. 2017). Alle mit der Aufbewahrung, dem Einfrieren oder Auftauen der Wirbelsäulensegmente assoziierten Beeinflussungen der Messergebnisse hätten wohl zu

einer übermäßigen Vergrößerung der Range of Motion und damit zu einer Überschätzung des destabilisierenden Effekts der Partiellen Lateralen Korpektomie auf die Lendenwirbelsäulensegmente geführt. Für zukünftige Studien sollte dennoch evaluiert werden, ob die Lagerung der zu testenden Wirbelsäulensegmente zur besseren Vergleichbarkeit der Studienergebnisse untereinander ebenfalls bei -18°C erfolgen sollte oder ob ein Einfrieren bei -80°C nach einem genau definierten Einfrier-Protokoll, das geringstmögliche Gewebeschädigung verspricht, zielführender ist; denn bei einer Lagerungstemperatur von -80°C wird die Aktivität des Enzyms Kollagenase ausgesetzt (AZARNOOSH et al. 2017), sodass nicht mehr mit Gewebsdestruktionen infolge fortlaufender Stoffwechselprozesse in den gelagerten Präparaten gerechnet werden muss.

Als weitere Limitation der Studie, muss die Fixierung der zu untersuchenden Lendenwirbelsäulensegmente innerhalb der Testvorrichtung genannt werden. Die Wirbelsäulensegmente wurden entlang einer Bezugsebene ausgerichtet, welche als senkrechte Ebene zwischen Decken- und Bodenplatte des Schlittens verlief. Bei dieser Ausrichtung wurden Decken- und Bodenplatte mit den daran angeschraubten Wirbelsäulensegmenten parallel zueinander angeordnet. Diese Art der Ausrichtung ermöglichte es, alle Wirbelsäulensegmente objektiv gleichsinnig in den Teststand einzubinden, zwang jedoch jedes Wirbelsäulensegment in eine festgelegte Position, in der möglicherweise bereits unterschiedliche Drehmomente als Vorlast auf das jeweilige Wirbelsäulensegment einwirkten. Auch durch diese Vorlast hätten die Messergebnisse beeinflusst werden können.

Durch die Testung eines längeren Wirbelsäulensegments mit weiteren Zwischenwirbelspalten wäre es möglich gewesen, Ergebnisse hinsichtlich der Linearität des Zuwachses der Range of Motion durch das Einfräsen weiterer Partieller Lateraler Korpektomien besser einschätzen zu können. Im Rahmen weiterer Studien könnte deswegen auch die Zunahme der Range of Motion nach der Durchführung dreier oder mehrerer Partieller Lateraler Korpektomien untersucht werden. Dabei sollte Beachtung finden, dass unterschiedliche Wirbelsäulenabschnitte entsprechend ihrer Lokalisation innerhalb der gesamten kaninen Wirbelsäule deutlich voneinander abweichende biomechanische Eigenschaften aufweisen (SMOLDERS et al. 2012b). So scheint im Bereich der Lendenwirbelsäule das Segment zwischen dem siebten Lendenwirbel und dem Kreuzbein die größte Range of Motion bei Extension und Flexion zu haben, während die größte Range of Motion während lateraler Biegung auf Höhe des zweiten und dritten Lendenwirbels festgestellt werden konnte (SMOLDERS et al. 2012b). Bezugnehmend auf die unterschiedliche Flexibilität einzelner Wirbelsäulenabschnitte entsprechend ihrer Lokalisation innerhalb des Tierkörpers, wäre die Testdurchführung unserer Studie mit den beiden Referenzstudien besser vergleichbar gewesen, wenn das Wirbelsäulensegment L1-L2 und L2-L3

getestet worden wäre; denn VIZCAÍNO REVÉS et al. (2012) und VICENTE et al. (2013) führen ihre Untersuchungen am Wirbelsäulensegment L1-L2 durch.

Über diese bereits diskutierten Limitationen hinaus muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass der die Wirbelsäulenstabilität positiv beeinflussende Effekt der paraspinalen Muskulatur in dieser Studie keine Berücksichtigung fand. Ausführlichere Erläuterungen dazu werden im Kapitel Spinale Instabilität gegeben.

5.4 Spinale Instabilität

Seit 1944 werden Untersuchungen hinsichtlich spinaler Instabilitäten in Zusammenhang mit Bandscheibenpathologien durchgeführt (KNUTSSON 1944, PANJABI 2003). Inwiefern mechanische Instabilitäten der Wirbelsäule jedoch klinisch relevant werden, ist bis heute weder in Human- noch in Tiermedizin vollumfassend geklärt. In verschiedenen Studien gilt eine Instabilität der Wirbelsäule dann als klinisch relevant, wenn die Widerstandsfähigkeit der Wirbelsäule während physiologischer Belastung verloren geht und sich Folgeerscheinungen wie neurologische Ausfallserscheinungen, spinale Deformationen oder Dolenzen klinisch manifestieren (PANJABI et al. 1994, WHITE und PANJABI 1990, PANJABI 2003, SCHULZ et al. 1996). Im Rahmen unserer Kadaverstudie konnten zwar während links- und rechtslateraler Biegung sowie während Extension und Flexion signifikante Zunahmen der Range of Motion nach der Durchführung einer und auch einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie festgestellt werden, so dass von einer mechanischen Destabilisierung der Wirbelsäule ausgegangen werden kann, ob diese jedoch in vivo zu neurologischen Defiziten, Deformationen oder Schmerzen der Wirbelsäule infolge einer Instabilität geführt hätten, bleibt unklar.

Einige Studien berichten von einem die Wirbelsäulenstabilität positiv beeinflussenden Effekt der paraspinalen Muskulatur (QUINT et al. 1998, WILKE et al. 1995, PANJABI et al. 1989, WILKE et al. 1994). Es ist jedoch allgemein üblich, dass in vitro biomechanische Untersuchungen der Wirbelsäule an von der paraspinalen Muskulatur befreiten Präparaten stattfinden. Dies erleichtert den Vergleich von Studienergebnissen untereinander, ermöglicht eine einfachere Handhabung der Präparate, in unserer Studie z.B. während des Einfräsens der Partiellen Lateralen Korpektomien in die Wirbelsäulensegmente, und reduziert den Effekt des postmortalen Muskelgewebes auf die Messergebnisse. Da die biomechanischen Eigenschaften der präparierten Wirbelsäulensegmente jedoch insgesamt nicht mehr mit den Eigenschaften der Wirbelsäule in vivo übereinstimmen, müssen die Testergebnisse, wie es auch schon VICENTE et al. (2013) anmahnten, stets mit Vorsicht interpretiert werden (VICENTE et al. 2013, PANJABI 1992a, PANJABI 1992b). Für ein umfassendes Verständnis und eine Beurteilung der spinalen Stabilität ist die Berücksichtigung des Verhaltens des untersuchten Gewebes inklusive des biomechanischen Effekts der paraspinalen Muskulatur in vivo

zwingend notwendig. Die paraspinale Muskulatur hat einen wesentlichen Anteil an der Gesamtstabilität der Wirbelsäule (CORSE et al. 2003, WILKE et al. 1994, WILKE et al. 1995). Innerhalb des von uns gewählten biomechanischen Testansatzes fand eben dieser, die Wirbelsäule stabilisierende Effekt der Muskulatur, keine Berücksichtigung. Werden die Ergebnisse dieser Studie vor diesem Hintergrund betrachtet, so wäre es denkbar, dass die gemessenen Ranges of Motion in vivo bei gleicher Belastung deutlich kleiner ausfallen würden und dadurch multiple Partielle Laterale Korpektomien einen kleineren Einfluss auf die Range of Motion und die Wirbelsäulenstabilität hätten, als unsere Messergebnisse es vermuten lassen. Diese Vermutung scheint in humanmedizinischen Studien Bestätigung zu finden. So berichten BORKOWSKI et al. (2016), dass in der Literatur ein Versagen von Lendenwirbelsäulensegmenten in vitro stets bei wesentlich kleineren Drehmomenten eintritt als in klinischen Studien (BORKOWSKI et al. 2016). Insgesamt wird die Stabilität der Wirbelsäule, v.a. in Bewegung und unter Schwerlast, durch drei einander ergänzende Einheiten gewährleistet. Die Wirbelsäule selbst ermöglicht eine intrinsische Stabilität, die paraspinale Muskulatur generiert eine dynamische Stabilität und durch neuronale Kontrolle der intrinsischen und dynamischen Stabilität können Bedürfnisse der Wirbelsäule hinsichtlich Flexibilität und Stabilität detektiert und eine adäquat abgestimmte muskulärer Antwort generiert werden (PANJABI 1992a, LEMARIÉ et al. 2000). Unter physiologischen Bedingungen ergänzen sich diese drei Subsysteme, um die spinale mechanische Stabilität zu erhalten (PANJABI 2003). Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte ist es sinnvoll, Rückschlüsse in Bezug auf die spinale Stabilität für den klinischen Alltag in Zusammenschau der Ergebnisse biomechanischer Messungen mit klinischen Erfahrungen, z.B. aus Verlaufsstudien, zu ziehen. So konnten FERRAND et al. (2015) in ihrer Verlaufsstudie an 107 Hunden, die infolge einer Bandscheibenerkrankung durch eine Partielle Laterale Korpektomie chirurgisch versorgt wurden, bei insgesamt zwei Patienten mit jeweils einer Partiellen Lateralen Korpektomie postoperativ vertebrale Subluxationen und damit spinale Instabilitäten feststellen. Trotz der Möglichkeit, dass sich nach der Durchführung bereits einer einzigen Partiellen Lateralen Korpektomie spinale Instabilitäten entwickeln, zeigten FLEGEL et al. (2016), dass ein gutes postoperatives Outcome ohne Anzeichen spinaler Instabilitäten sogar an Lendenwirbelsäulen mit bis zu vier Partiellen Lateralen Korpektomien möglich ist. Neuere Untersuchungsansätze wie die fluoroskopische Kinematographie bieten zusätzliche Möglichkeiten, um in vivo spinale Instabilitäten detektieren und diese als Auslöser neurologischer Defizite identifizieren zu können. Während sich Patienten, deren neurologische Defizite in Verdacht stehen, durch spinale Instabilitäten verursacht zu werden, auf einem Laufband fortbewegen, könnte die Wirbelsäule mithilfe der Fluoroskopie während der Bewegung und unter Berücksichtigung aller an der Wirbelsäulenstabilität teilhabenden Subsysteme dargestellt und somit hinsichtlich ihrer spinalen Stabilität untersucht werden. Der Untersuchungsansatz der

fluoroskopischen Kinematographie findet bereits in der veterinärmedizinischen biomechanischen Grundlagenforschung ihren Einsatz (SCHWEDE et al. 2018, ROHWEDDER et al. 2017, REY et al. 2014).

In vivo darf zudem nicht außer Acht gelassen werden, dass postoperativ Heilungsprozesse oder auch degenerative Veränderungen einsetzen können, die möglicherweise zu einer langfristigen Stabilisierung der zuvor operierten und ggf. destabilisierten Wirbelsäule führen. So ermöglichen ein partieller oder vollständiger Verschluss eines Operationsdefektes eine zusätzliche Stabilisierung der Wirbelsäule (VICENTE et al. 2013) und auch Spondylose- oder Spondylarthrosebildung wirken der möglicherweise durch Partielle Laterale Korpektomien entstehenden Destabilisierung der Wirbelsäule entgegen. Es gibt diverse Studien, die in vivo die Entwicklung der Wirbelsäule nach Durchführung unterschiedlichster Eingriffe untersuchen. So berichten einige Autoren nach geplanter Einbringung unterschiedlicher Defekte in eine Bandscheibe von Heilungstendenzen besonders auf Ebene des Anulus fibrosus, innerhalb eines Zeitraums zwischen 3 Wochen und 3 Monaten postoperativ (WHITEHILL et al. 1987, EINHAUS et al. 1997, HAMPTON et al. 1989, SONGER et al. 1995). Bezogen auf die intraoperativ entstehenden Knochendefekte konnte wiederum in einer Studie an hemilaminektomierten Patienten zu einem Zeitpunkt von 8 Wochen nach der Operation keine Heilungstendenz festgestellt werden (EINHAUS et al. 1997). Hinsichtlich degenerativer Veränderungen mit möglicherweise stabilisierendem Effekt auf die Wirbelsäule zeigte sich bei Patienten, die aufgrund einer Lumbosakralen Stenosen chirurgisch mittels dorsaler Laminektomie versorgt wurden, im Vergleich zum präoperativen Zustand postoperativ deutlich mehr Spondylosen zwischen dem 7. Lenden- und 1. Sakralwirbel (RAPP et al. 2017). Auch nach Durchführung einer oder multipler Hemilaminektomien stellt sich postoperativ gelegentlich eine Zunahme an Spondylosen und Spondylarthrosen auf Höhe des Operationsdefektes ein (siehe Abbildung 22 bis Abbildung 25). BASHKUEV et al (2018) beschrieben bei Patienten mit Bandscheibendegenerationen ein Risiko zur Entstehung von degenerativen Veränderungen im Bereich der Facettengelenke, auch ohne dass Operationen durchgeführt wurden. Hinsichtlich Langzeitveränderungen an der Operationsstelle nach Durchführung thorakolumbalen Partieller Lateraler Korpektomien konnte nachgewiesen werden, dass sich an einem durch Partielle Laterale Korpektomie versorgten Zwischenwirbelspalt sowie an den unmittelbar benachbarten Zwischenwirbelspalten postoperativ eine signifikante Zunahme an Spondylosebildung einstellt und der Operationsdefekt mit der Zeit zunehmend knöchern durchbaut (HERZIG et al. 2018). In einer Studie zur Heilung unterschiedlicher, chirurgisch gesetzter Defekte an der Halswirbelsäule zeigte sich nach einem Zeitraum von 6 Monaten postoperativ in einem Wirbelsäulenprüfstand, der eine 3-dimensionale Testung der entnommenen Wirbelsäulensegmente ermöglichte, dass diese Wirbelsäulensegmente nach 6 Monaten der Heilung keine anderen



Abbildung 22: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule eines Labrador Retrievers 20 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig)

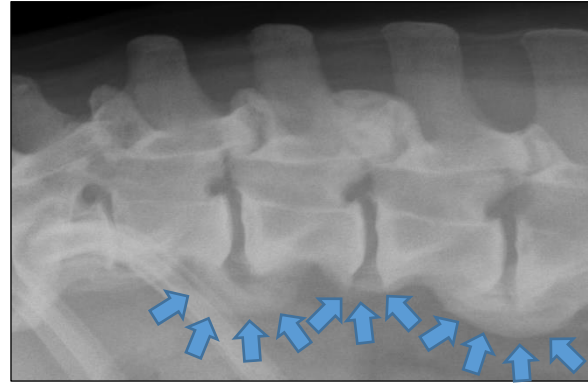


Abbildung 23: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule desselben Labrador Retrievers 446 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts; die blauen Pfeile zeigen eine beginnende Bildung von Spondylosen an (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig)

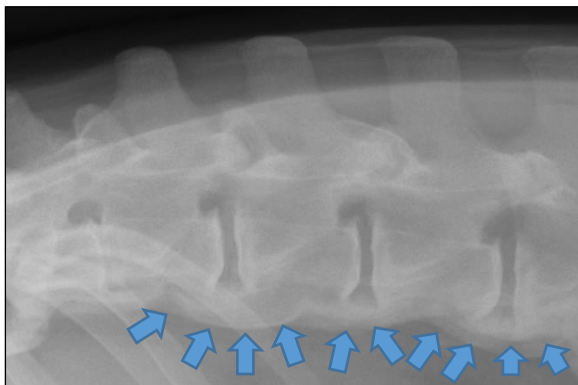


Abbildung 24: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule desselben Labrador Retrievers 830 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts; die blauen Pfeile zeigen die deutlich fortgeschrittene Bildung von Spondylosen an (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig)

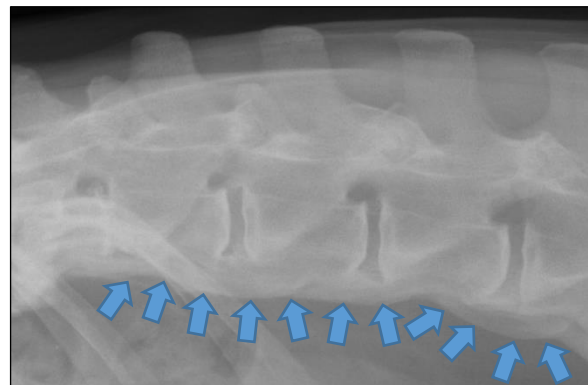


Abbildung 25: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule desselben Labrador Retrievers 1294 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts; die blauen Pfeile zeigen die erneut fortgeschrittene Bildung von Spondylosen an (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig)

biomechanischen Charakteristika aufwiesen als normale, intakte Wirbelsäulensegmente (CRISCO et al. 1990). Auch das Problem einer möglicherweise durch Partielle Laterale Korpektomien verursachten Destabilisierung der Wirbelsäule könnte somit postoperativ nur innerhalb enger zeitlicher Grenzen bestehen.

5.5 Klinische Relevanz der Studienergebnisse und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Studie war es, die biomechanischen Konsequenzen einer und einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie auf ein kanines Lendenwirbelsäulensegment abschätzen zu können. Wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen, führt jede der zwei Partiellen Lateralen Korpektomien zu einer signifikanten Zunahme der Range of Motion und damit zu einer Schwächung der Wirbelsäulenstabilität bei links- und rechtslateraler Biegung sowie bei Extension und Flexion. Sollte sich also nach der Durchführung einer einzelnen oder auch multipler Partieller Lateraler Korpektomien eine anhaltende Verschlechterung des neurologischen Zustandes eines Patienten einstellen oder sollten Schmerzzustände auftreten, die das normale Maß des postoperativen Schmerzes übersteigen, so ist eine sorgfältige diagnostische Aufarbeitung hinsichtlich spinaler Instabilitäten empfehlenswert. In mehreren Studien, in denen auch der postoperative neurologische Zustand von durch Partielle Laterale Korpektomien chirurgisch versorgten Patienten Beachtung fand, führte die Operation nie bei allen Patienten zu einer Verbesserung des neurologischen Zustandes (FLEGEL et al. 2011, SALGER et al. 2014, MEDL et al. 2017). Eine spinale Instabilität muss also auch in diesen Fällen, in denen sich postoperativ keine Verbesserung des neurologischen Zustands einstellt, als Ursache in Betracht gezogen werden (LEMARIÉ et al. 2000). Stellt sich während der diagnostischen Aufarbeitung eine spinale Instabilität infolge multipler Partieller Lateraler Korpektomien als symptomauslösend oder Ursache der ausbleibenden klinischen Verbesserung heraus, so wird eine chirurgische Stabilisierung des betroffenen Wirbelsäulensegments empfohlen.

Werden Patienten mit multiplen chronischen Bandscheibenvorfällen (Hansen Typ II) und ventraler Myelokompression in veterinärmedizinischen Praxen oder Kliniken vorgestellt, so ist die chirurgische Versorgung mithilfe multipler Partieller Lateraler Korpektomien häufig jene Operationsmethode, die bei größtmöglicher Schonung des Myelons gleichzeitig die bestmögliche Dekompression des Rückenmarks verspricht. In diesem Zusammenhang erscheint es als besonders bedeutsam, dass sich in dieser Studie die Tendenz abzeichnet, dass der Effekt jeder zusätzlichen Partiellen Lateralen Korpektomie auf die Range of Motion und damit die Zunahme des destabilisierenden Effektes dieser Operationsmethode auf die Wirbelsäulensegmente immer kleiner zu werden scheint. Es liegt die Vermutung nahe, dass möglicherweise auch bei mehr als zwei Partiellen Lateralen Korpektomien jede zusätzliche Partielle Laterale Korpektomie einen immer kleineren destabilisierenden Effekt auf die kanine Lendenwirbelsäule hat als die ihr vorausgehende. Wie 2016 in der Studie von FLEGEL et al. gezeigt werden konnte, ist es bei gutem postoperativen neurologischen Outcome möglich, multiple Partielle Laterale Korpektomien durchzuführen (FLEGEL et al. 2016). Auch in einigen weiteren Studien

wurden Patienten mithilfe multipler Partieller Lateraler Korpektomien erfolgreich neurochirurgisch versorgt (FLEGEL et al. 2011, SALGER et al. 2014, MEDL et al. 2017).

In Zusammenschau der Ergebnisse dieser Studie mit dem in mehreren Studien nachgewiesenen positiven Outcome nach der Durchführung multipler Partieller Lateraler Korpektomien (FLEGEL et al. 2016, FLEGEL et al. 2011, SALGER et al. 2014, MEDL et al. 2017) und auch hinsichtlich der klinischen Notwendigkeit, bei Bedarf eine Dekompression des Myelons durch multiple Partielle Laterale Korpektomien zu erreichen, kann somit eine Empfehlung in Hinblick auf die Durchführung multipler Partieller Lateraler Korpektomien ausgesprochen werden.

6. Zusammenfassung

Lisa Franziska Becker

Biomechanik der kaninen Lendenwirbelsäule nach der Durchführung multipler Partieller Lateraler Korpektomien

Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinischen Fakultät, Universität Leipzig

Eingereicht im Juni 2023

74 Seiten, 25 Abbildungen, 10 Tabellen, 163 Literaturangaben

Schlüsselwörter: Bandscheibenvorfall, Lendenwirbelsäule, Partielle Laterale Korpektomie, Biomechanik, Destabilisierung

Einleitung

Ziel neurochirurgischer Eingriffe zur Versorgung von Bandscheibenvorfällen ist es, das Rückenmark bei nur geringgradiger Manipulation möglichst vollständig zu dekomprimieren. Bei thorakolumbalen chronischen Bandscheibenvorfällen mit ventraler Myelokompression findet die Partielle Laterale Korpektomie ihren Einsatz. Bei dieser Operationsmethode wird das Rückenmark durch Einfräsen eines Spaltes (Slots) im Bereich der betroffenen Bandscheibe und ihrer benachbarten Wirbelkörper untertunnelt. Im Rahmen verschiedener biomechanischer Studien konnte nachgewiesen werden, dass die Partielle Laterale Korpektomie zu einer Verminderung der Wirbelsäulenstabilität führt. Deswegen wurde in der Literatur bisher davon abgeraten, multiple Partielle Laterale Korpektomien durchzuführen. Gelegentlich ist es aufgrund der Lähmung eines Patienten infolge einer Myelokompression durch mehrere Bandscheibenvorfälle jedoch notwendig, multiple Partielle Laterale Korpektomien anzuwenden.

Ziele der Untersuchungen

In dieser Studie sollten die biomechanischen Konsequenzen von einer und einer zusätzlichen zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie auf ein kanines Lendenwirbelsäulensegment evaluiert werden, um Schlüsse hinsichtlich der Durchführbarkeit multipler Partieller Lateraler Korpektomien bei Hunden ziehen zu können.

Tiere, Material und Methoden

Im Rahmen dieser Kadaverstudie wurden 11 kanine Lendenwirbelsäulensegmente (bestehend jeweils aus dem ersten bis fünften Lendenwirbel) untersucht. Nach Entfernung der paraspinale Muskulatur und Einbettung der Wirbelsäulensegmente an ihren kranialen und kaudalen Enden in eine Halterung aus Gießharz und Metallringen wurde mithilfe eines eigens entwickelten Wirbelsäulenprüfstandes die Range of Motion bei Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion nach links

und rechts unter Anlegung eines Drehmoments von 2 Nm in drei verschiedenen Testreihen getestet. Während einer ersten Testreihe wurden alle Wirbelsäulensegmente in nativem Zustand untersucht. Für eine zweite Testreihe wurde eine Partielle Laterale Korpektomie zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel von rechts eingefügt. Vor der dritten Testreihe wurde eine zweite Partielle Laterale Korpektomie zwischen dem dritten und vierten Lendenwirbel von rechts eingefügt. Eine Testreihe bestand aus jeweils 10 Bewegungszyklen, von denen die ersten fünf Bewegungszyklen zur Präkonditionierung des Gewebes und die darauffolgenden fünf für die statistische Auswertung genutzt wurden. Die entstandenen Messwerte wurden aggregiert und aufbereitet. Die weitere statistische Auswertung erfolgte unter Durchführung des Friedman- und Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests.

Ergebnisse

Sowohl bei Extension und Flexion als auch bei links- und rechtslateraler Biegung konnte im Vergleich zu den nativen Wirbelsäulensegmenten nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie eine signifikante Zunahme der Range of Motion um einen Mittelwert von 22,6 % (Standardabweichung (SD) 16,1 %), bzw. 9,2 % (SD 7,4 %) festgestellt werden. Auch der Zuwachs der Range of Motion nach einer weiteren Partiellen Lateralen Korpektomie war für diese beiden Bewegungsrichtungen signifikant und betrug einen Mittelwert von weiteren 7,8 % (SD 14 %) bei Extension und Flexion sowie weiteren 6,1 % (SD 6,2 %) bei links- und rechtslateraler Biegung. Die Range of Motion nahm über die drei Testreihen hinweg nicht linear zu; so resultierte die größere Zunahme der Range of Motion bei einem Großteil der Wirbelsäulensegmente aus der Durchführung der ersten Partiellen Lateralen Korpektomie. Diese Tendenz konnte jedoch nicht als signifikant identifiziert werden. Die Range of Motion bei Torsion nach links und rechts nahm über die drei Testreihen hinweg nicht signifikant zu.

Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie konnte nachgewiesen werden, dass jede Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie an einem kaninen Lendenwirbelsäulensegment mit zwei Zwischenwirbelspalten zu einer signifikanten Zunahme der Range of Motion bei Extension und Flexion sowie links- und rechtslateraler Biegung führt. Die Zunahme der Range of Motion ist Zeichen einer Verminderung der Stabilität der Wirbelsäulensegmente. Die Reduktion der spinalen Stabilität nimmt jedoch nicht mit jedem Einbringen einer weiteren Partiellen Korpektomie und denselben Faktor zu, sondern die zweite Partielle Laterale Korpektomie scheint einen kleineren destabilisierenden Effekt auf die Lendenwirbelsäulensegmente zu haben als die erste. Aufgrund dessen und da ein positives klinisches Outcome nach der Durchführung multipler Partieller Lateraler Korpektomien in vivo bereits in mehreren Studien gezeigt werden konnte, kann die Durchführung multipler Partieller Lateraler Korpektomien dennoch empfohlen werden.

7. Summary

Lisa Franziska Becker

Biomechanics of the canine lumbar spine after performing multiple partial lateral corpectomies

Department for Small Animals, Veterinary Faculty, University of Leipzig

Submitted in June 2023

74 pages, 25 figures, 10 tables, 163 references

Keywords: Prolapse of the intervertebral disc, lumbar spine, partial lateral corpectomy, biomechanics, destabilization

Introduction

The goal of neurosurgical procedures on the spine to treat herniated intervertebral discs is to decompress the spinal cord while at the same time safeguarding it against massive intraoperative manipulation. Depending on the location and type of herniated disc, it is the neurosurgeon's task to choose the optimal surgical method in order to reach this aim. Partial lateral corpectomy is chosen in case of chronic disc herniation in the thoracic and lumbar spine that results in ventral myelocompression. The slot created by partial lateral corpectomy removes parts of the affected intervertebral disc and the adjacent vertebral bodies. Doing so creates a kind of spinal cord underpass. Different biomechanical studies provided evidence of the spine being destabilized by even a single partial lateral corpectomy. As a result, performing multiple partial lateral corpectomies is not commonly recommended. However, prolapse of several discs along the thoracolumbar spine at the same time may sometimes cause myelocompression, which in turn causes neurological deficits, so multiple partial lateral corpectomies become unavoidable.

Objectives of the investigation

The results obtained in this study should allow assessment of the biomechanical consequences on a canine lumbar spine segment after one and a second partial lateral corpectomy. Using these results conclusions should be drawn regarding the feasibility of multiple partial lateral corpectomies in dogs.

Animals, materials and methods

The lumbar spine segments L1 to L5 were removed from a total of eleven dog cadavers. After removal of the paraspinal musculature the cranial and caudal ends of these spinal segments were embedded in cast resin. With the help of a specifically designed spine testing bench the range of motion during extension and flexion, left and right lateral bending and torsion to the left and right hand sides was evaluated. Three test series were performed to biomechanically assess the range of motion applying a torque of 2 Nm to the caudal end of the embedded spinal segments. In the first test series all native

spinal segments were tested without prior partial lateral corpectomy. In the second test series a partial lateral corpectomy was created between the second and third lumbar vertebrae and in the third test series a second partial lateral corpectomy was created between the third and fourth lumbar vertebrae before starting the biomechanical testing itself. Each test series consisted of 10 motion cycles, of which the first five motion cycles were used to precondition the tissue and the subsequent five motion cycles were used for statistical analysis. The resulting measurements were aggregated and processed. For further statistical analysis, Friedman and Wilcoxon sign-rank tests were performed.

Results

In extension and flexion as well as in left and right lateral bending, a significant increase in range of motion of 22.6 % (standard deviation (SD) 16.1 %) and 9.2 % (SD 7.4 %), respectively, was observed after partial lateral corpectomy compared to the native spinal segments. The increase in range of motion after another partial lateral corpectomy was also significant for these two directions of motion and was an additional 7.8 % (SD 14 %) for extension and flexion and an additional 6.1 % (SD 6,2 %) for left and right lateral bending. Thus, range of motion did not increase linearly across the three test series. The greater increase in range of motion seems to be associated with the performance of the first partial lateral corpectomy. However, this trend could not be shown to be significant. In case of torsion to the left and right side no significant increase in range of motion was observed across the three test series.

Conclusions

This study demonstrated that each insertion of a partial lateral corpectomy in a canine lumbar spine segment consisting of two movable intervertebral spaces results in a significant increase in range of motion during extension and flexion and left and right lateral bending. The increase in range of motion demonstrates the destabilizing effect of a partial lateral corpectomy. As the destabilization seems not to proceed in a linear manner and positive clinical outcomes after multiple partial lateral corpectomies have already been observed, the application of multiple partial lateral corpectomies can be assessed as being benevolent.

8. Literaturverzeichnis

- Adamo PF, Kobayashi H, Markel M, Vanderby R. In vitro biomechanical comparison of cervical disk arthroplasty, ventral slot procedure, and smooth pins with polymethylmethacrylate fixation at treated and adjacent canine cervical motion units. *Vet Surg* 2007; 36(8):729–41. doi: 10.1111/j.1532-950X.2007.00327.x.
- Adams MA, Hutton WC. The effect of fatigue on the lumbar intervertebral disc. *J Bone Joint Surg Br* 1983; 65(2):199–203. doi: 10.1302/0301-620X.65B2.6826631.
- Aikawa T, Fujita H, Kanazono S, Shibata M, Yoshigae Y. Long-term neurologic outcome of hemilaminectomy and disk fenestration for treatment of dogs with thoracolumbar intervertebral disk herniation: 831 cases (2000-2007). *J Am Vet Med Assoc* 2012a; 241(12):1617–26. doi: 10.2460/javma.241.12.1617.
- Aikawa T, Fujita H, Shibata M, Takahashi T. Recurrent thoracolumbar intervertebral disc extrusion after hemilaminectomy and concomitant prophylactic fenestration in 662 chondrodystrophic dogs. *Vet Surg* 2012b; 41(3):381–90. doi: 10.1111/j.1532-950X.2012.00970.x.
- Aikawa T, Shibata M, Sadahiro S. Hemilaminectomy and vertebral stabilization for thoracolumbar intervertebral disc associated dynamic compression in 11 dogs. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2013; 26(6):498–504. doi: 10.3415/VCOT-12-12-0150.
- Arthurs G. Spinal instability resulting from bilateral mini-hemilaminectomy and pediculectomy. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2009; 22(5):422–6. doi: 10.3415/VCOT-08-09-0092.
- Azarnoosh M, Stoffel M, Quack V, Betsch M, Rath B, Tingart M et al. A comparative study of mechanical properties of fresh and frozen-thawed porcine intervertebral discs in a bioreactor environment. *J Mech Behav Biomed Mater* 2017; 69:169–77. doi: 10.1016/j.jmbbm.2016.12.010.
- Ball MU, McGuire JA, Swaim SF, Hoerlein BF. Patterns of occurrence of disk disease among registered dachshunds. *J Am Vet Med Assoc* 1982; 180(5):519–22.
- Baltzer WI, Hillebrand L, Smith TJ, Stieger-Vanegas SM. Surgical management of a Schmorl's node in an Airedale Terrier and review of the literature. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2012; 25(2):167–71. doi: 10.3415/VCOT-11-06-0088.
- Beltran E, Dennis R, Doyle V, Stefani A de, Holloway A, Risio L de. Clinical and magnetic resonance imaging features of canine compressive cervical myelopathy with suspected hydrated nucleus pulposus extrusion. *J Small Anim Pract* 2012; 53(2):101–7. doi: 10.1111/j.1748-5827.2011.01166.x.

- Bergknut N, Egenvall A, Hagman R, Gustås P, Hazewinkel HAW, Meij BP et al. Incidence of intervertebral disk degeneration-related diseases and associated mortality rates in dogs. *J Am Vet Med Assoc* 2012; 240(11):1300–9. doi: 10.2460/javma.240.11.1300.
- Bergknut N, Smolders LA, Grinwis GCM, Hagman R, Lagerstedt A-S, Hazewinkel HAW et al. Intervertebral disc degeneration in the dog. Part 1: Anatomy and physiology of the intervertebral disc and characteristics of intervertebral disc degeneration. *Vet J* 2013; 195(3):282–91. doi: 10.1016/j.tvjl.2012.10.024.
- Besalti O, Pekcan Z, Sirin YS, Erbas G. Magnetic resonance imaging findings in dogs with thoracolumbar intervertebral disk disease: 69 cases (1997-2005). *J Am Vet Med Assoc* 2006; 228(6):902–8. doi: 10.2460/javma.228.6.902.
- Blazina ME, Watanabe RS, Drake EC. Fatigue fractures in track athletes. *Calif Med* 1962; 97(2):61–3.
- Borkowski SL, Sangiorgio SN, Bowen RE, Scaduto AA, He B, Bauer KL et al. Strength of thoracic spine under simulated direct vertebral rotation: A biomechanical study. *Spine Deform* 2016; 4(2):85–93. doi: 10.1016/j.jspd.2015.09.044.
- Braund KG, Taylor TK, Ghosh P, Sherwood AA. Lateral spinal decompression in the dog. *J Small Anim Pract* 1976; 17(9):583–92. doi: 10.1111/j.1748-5827.1976.tb07005.x.
- Braund KG, Taylor TK, Ghosh P, Sherwood AA. Spinal mobility in the dog. A study in chondrodystrophoid and non-chondrodystrophoid animals. *Res Vet Sci* 1977; 22(1):78–82.
- Bray JP, Burbidge HM. The canine intervertebral disk. Part two: Degenerative changes-nonchondrodystrophoid versus chondrodystrophoid disks. *J Am Anim Hosp Assoc* 1998a; 34(2):135–44. doi: 10.5326/15473317-34-2-135.
- Bray JP, Burbidge HM. The canine intervertebral disk: Part one: Structure and function. *J Am Anim Hosp Assoc* 1998b; 34(1):55–63. doi: 10.5326/15473317-34-1-55.
- Brisson BA. Intervertebral disc disease in dogs. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 2010; 40(5):829–58. doi: 10.1016/j.cvsm.2010.06.001.
- Brown MD, Holmes DC, Heiner AD. Measurement of cadaver lumbar spine motion segment stiffness. *Spine (Phila Pa 1976)* 2002; 27(9):918–22. doi: 10.1097/00007632-200205010-00006.
- Brown T, Hansen RJ, Yorra AJ. Some mechanical tests on the lumbosacral spine with particular reference to the intervertebral discs; a preliminary report. *J Bone Joint Surg Am* 1957; 39-A(5):1135–64.

- Calvo-Gallego JL, Commisso MS, Domínguez J, Tanaka E, Martínez-Reina J. Effect of freezing storage time on the elastic and viscous properties of the porcine TMJ disc. *J Mech Behav Biomed Mater* 2017; 71:314–9. doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.03.035.
- Carozzo C, Maitre P, Genevois J-P, Gabanou P-A, Fau D, Viguier E. Endoscope-assisted thoracolumbar lateral corpectomy. *Vet Surg* 2011; 40(6):738–42. doi: 10.1111/j.1532-950X.2011.00862.x.
- Chambers JN, Oliver JE, Kornegay JN, Malnati GA. Ventral decompression for caudal cervical disk herniation in large- and giant-breed dogs. *J Am Vet Med Assoc* 1982; 180(4):410–4.
- Chang Y, Dennis R, Platt SR, Penderis J. Magnetic resonance imaging of traumatic intervertebral disc extrusion in dogs. *Vet Rec* 2007; 160(23):795–9. doi: 10.1136/vr.160.23.795.
- Coates JR. Intervertebral disk disease. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 2000; 30(1):77-110, vi. doi: 10.1016/s0195-5616(00)50004-7.
- Corse MR, Renberg WC, Friis EA. In vitro evaluation of biomechanical effects of multiple hemilaminectomies on the canine lumbar vertebral column. *Am J Vet Res* 2003; 64(9):1139–45. doi: 10.2460/ajvr.2003.64.1139.
- Crawford AH, Decker S de. Clinical presentation and outcome of dogs treated medically or surgically for thoracolumbar intervertebral disc protrusion. *Vet Rec* 2017; 180(23):569. doi: 10.1136/vr.103871.
- Crisco JJ, Panjabi MM, Wang E, Price MA, Pelker RR. The injured canine cervical spine after six months of healing. An in vitro three-dimensional study. *Spine (Phila Pa 1976)* 1990; 15(10):1047–52. doi: 10.1097/00007632-199015100-00012.
- Cudia SP, Duval JM. Thoracolumbar intervertebral disk disease in large, nonchondrodystrophic dogs: A retrospective study. *J Am Anim Hosp Assoc* 1997; 33(5):456–60. doi: 10.5326/15473317-33-5-456.
- Davis GJ, Brown DC. Prognostic indicators for time to ambulation after surgical decompression in nonambulatory dogs with acute thoracolumbar disk extrusions: 112 cases. *Vet Surg* 2002; 31(6):513–8. doi: 10.1053/jvet.2002.36015.
- Decker S de, Fenn J. Acute herniation of nondegenerate nucleus pulposus: Acute noncompressive nucleus pulposus extrusion and compressive hydrated nucleus pulposus extrusion. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 2018; 48(1):95–109. doi: 10.1016/j.cvsm.2017.08.004.
- Dewey CW. Chirurgie der thorakolumbalen Wirbelsäule. In: Fossum TW, Hrsg. *Small animal surgery*. Fifth edition. Philadelphia, PA: Elsevier; 2019. p. 1573–96.

- Dewey CW. Chirurgie der Halswirbelsäule: Allgemeine Prinzipien und Techniken. In: Fossum TW, Hrsg. Chirurgie der Kleintiere. 5. Auflage. München: Elsevier; 2020a. p. 1535–45.
- Dewey CW. Chirurgie der Halswirbelsäule: Allgemeine Prinzipien und Techniken [Postoperatives Management]. In: Fossum TW, Hrsg. Chirurgie der Kleintiere. 5. Auflage. München: Elsevier; 2020b. p. 1544.
- Dhupa S, Glickman N, Waters DJ. Reoperative neurosurgery in dogs with thoracolumbar disc disease. *Vet Surg* 1999; 28(6):421–8. doi: 10.1111/j.1532-950x.1999.00421.x.
- Dolera M, Malfassi L, Marcarini S, Mazza G, Sala M, Carrara N et al. Hydrated nucleus pulposus extrusion in dogs: Correlation of magnetic resonance imaging and microsurgical findings. *Acta Vet Scand* 2015; 57:58. doi: 10.1186/s13028-015-0151-x.
- Early P, Mente P, Dillard S, Roe S. In vitro biomechanical comparison of the flexion/extension mobility of the canine lumbosacral junction before and after dorsal laminectomy and partial discectomy. *Vet J* 2013; 196(3):533–5. doi: 10.1016/j.tvjl.2012.11.006.
- Einhaus SL, Robertson JT, Dohan FC, Wujek JR, Ahmad S. Reduction of peridural fibrosis after lumbar laminotomy and discectomy in dogs by a resorbable gel (ADCON-L). *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; 22(13):1440-6; discussion 1446-7. doi: 10.1097/00007632-199707010-00003.
- Elliott RC, Moon C, Zeiler G, Lobetti R. Short-term clinical outcomes of 220 dogs with thoraco-lumbar disc disease treated by mini-hemilaminectomy. *J S Afr Vet Assoc* 2020; 91(0):e1-e8. doi: 10.4102/jsava.v91i0.2008.
- Fauber AE, Wade JA, Lipka AE, McCabe GP, Aper RL. Effect of width of disk fenestration and a ventral slot on biomechanics of the canine C5-C6 vertebral motion unit. *Am J Vet Res* 2006; 67(11):1844–8. doi: 10.2460/ajvr.67.11.1844.
- Fenn J, Drees R, Volk HA, Decker S de. Comparison of clinical signs and outcomes between dogs with presumptive ischemic myelopathy and dogs with acute noncompressive nucleus pulposus extrusion. *J Am Vet Med Assoc* 2016; 249(7):767–75. doi: 10.2460/javma.249.7.767.
- Fenn J, Olby NJ. Classification of intervertebral disc disease. *Front Vet Sci* 2020; 7:579025. doi: 10.3389/fvets.2020.579025.
- Ferrand F-X, Moissonnier P, Filleur A, Cachon T, Fau D, Viguier E et al. Thoracolumbar partial lateral corpectomy for the treatment of chronic intervertebral disc disease in 107 dogs. *Ir Vet J* 2015; 68:27. doi: 10.1186/s13620-015-0056-z.

- Ferreira AJA, Correia JHD, Jaggy A. Thoracolumbar disc disease in 71 paraplegic dogs: Influence of rate of onset and duration of clinical signs on treatment results. *J Small Anim Pract* 2002; 43(4):158–63. doi: 10.1111/j.1748-5827.2002.tb00049.x.
- Fitch RB, Kerwin SC, Hosgood G. Caudal cervical intervertebral disk disease in the small dog: Role of distraction and stabilization in ventral slot decompression. *J Am Anim Hosp Assoc* 2000; 36(1):68–74. doi: 10.5326/15473317-36-1-68.
- Flegel T, Boettcher IC, Ludewig E, Kiefer I, Oechtering G, Böttcher P. Partial lateral corpectomy of the thoracolumbar spine in 51 dogs: Assessment of slot morphometry and spinal cord decompression. *Vet Surg* 2011; 40(1):14–21. doi: 10.1111/j.1532-950X.2010.00747.x.
- Flegel T, Münch M, Held K, Salger F, Ziegler L, Böttcher P. Multiple thoracolumbar partial lateral corpectomies in 17 dogs. *Tierarztl Prax Ausg K Kleintiere Heimtiere* 2016; 44(6):397–403. doi: 10.15654/TPK-160433.
- Forterre F, Spreng D, Rytz U, Jaggy A, Schawalder P. Thoracolumbar dorsolateral laminectomy with osteotomy of the spinous process in fourteen dogs. *Vet Surg* 2007; 36(5):458–63. doi: 10.1111/j.1532-950X.2007.00292.x.
- Gage ED. Modifications in dorsolateral hemilaminectomy and disc fenestration in the dog. *J Am Anim Hosp Assoc* 1975; (11):405–11.
- Gallagher S, Marras WS, Litsky AS, Burr D, Landoll J, Matkovic V. A comparison of fatigue failure responses of old versus middle-aged lumbar motion segments in simulated flexed lifting. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007; 32(17):1832–9. doi: 10.1097/01.brs.0000259812.75138.c0.
- Gaschen L, Lang J, Haeni H. Intravertebral disc herniation (Schmorl's node) in five dogs. *Vet Radiol Ultrasound* 1995; 36(6):509–16. doi: 10.1111/j.1740-8261.1995.tb00304.x.
- Ghosh P, Taylor TK, Braund KG. The variation of the glycosaminoglycans of the canine intervertebral disc with ageing. I. Chondrodystrophoid breed. *Gerontology* 1977a; 23(2):87–98. doi: 10.1159/000212177.
- Ghosh P, Taylor TK, Braund KG. Variation of the glycosaminoglycans of the intervertebral disc with ageing. II. Non-chondrodystrophoid breed. *Gerontology* 1977b; 23(2):99–109. doi: 10.1159/000212178.
- Ghosh P, Taylor TK, Braund KG, Larsen LH. The collagenous and non-collagenous protein of the canine intervertebral disc and their variation with age, spinal level and breed. *Gerontology* 1976; 22(3):124–34. doi: 10.1159/000212129.

- Gillett NA, Gerlach R, Cassidy JJ, Brown SA. Age-related changes in the beagle spine. *Acta Orthop Scand* 1988; 59(5):503–7. doi: 10.3109/17453678809148772.
- Gilpin GN. Evaluation of three techniques of ventral decompression of the cervical spinal cord in the dog. *J Am Vet Med Assoc* 1976; 168(4):325–8.
- Gleizes V, Viguier E, Féron JM, Canivet S, Lavaste F. Effects of freezing on the biomechanics of the intervertebral disc. *Surg Radiol Anat* 1998; 20(6):403–7. doi: 10.1007/BF01653130.
- Gödde T, Steffen F. Surgical treatment of lumbosacral foraminal stenosis using a lateral approach in twenty dogs with degenerative lumbosacral stenosis. *Vet Surg* 2007; 36(7):705–13. doi: 10.1111/j.1532-950X.2007.00324.x.
- Griffin JF, Levine JM, Kerwin SC. Canine thoracolumbar intervertebral disk disease: Pathophysiology, neurologic examination and emergency medical therapy. *Compend Contin Educ Vet* 2009; 31(3):E2.
- Guevar J, Olby N. Minimally invasive microsurgical decompression of an intervertebral disc protrusion in a dog. *Vet Surg* 2020; 49(Suppl 1):86-92. doi: 10.1111/vsu.13263.
- Guo S, Lu D, Pfeiffer S, Pfeiffer DU. Non-ambulatory dogs with cervical intervertebral disc herniation: Single versus multiple ventral slot decompression. *Aust Vet J* 2020; 98(4):148–55. doi: 10.1111/avj.12908.
- Hampton D, Laros G, McCarron R, Franks D. Healing potential of the anulus fibrosus. *Spine (Phila Pa 1976)* 1989; 14(4):398–401. doi: 10.1097/00007632-198904000-00009.
- Hansen H-J. A pathologic-anatomical study on disc degeneration in dog, with special reference to the so-called enchondrosis intervertebralis. *Acta Orthop Scand Suppl* 1952; 11:1–117. doi: 10.3109/ort.1952.23.suppl-11.01.
- Hansson T, Keller T, Jonson R. Fatigue fracture morphology in human lumbar motion segments. *J Spinal Disord* 1988; 1(1):33–8.
- Hansson T, Roos B. Microcalluses of the trabeculae in lumbar vertebrae and their relation to the bone mineral content. *Spine (Phila Pa 1976)* 1981; 6(4):375–80. doi: 10.1097/00007632-198107000-00008.
- Hansson TH, Keller TS, Spengler DM. Mechanical behavior of the human lumbar spine. II. Fatigue strength during dynamic compressive loading. *J Orthop Res* 1987; 5(4):479–87. doi: 10.1002/jor.1100050403.
- Hardy WG, Lissner HR, Webster JE, Gurdjian ES. Repeated loading tests of the lumbar spine; a preliminary report. *Surg Forum* 1958; 9:690–5.

- Hasegawa K, Turner CH, Chen J, Burr DB. Effect of disc lesion on microdamage accumulation in lumbar vertebrae under cyclic compression loading. *Clin Orthop Relat Res* 1995; (311):190–8.
- Hediger KU, Ferguson SJ, Gedet P, Busato A, Forterre F, Isler S et al. Biomechanical analysis of torsion and shear forces in lumbar and lumbosacral spine segments of nonchondrodystrophic dogs. *Vet Surg* 2009; 38(7):874–80. doi: 10.1111/j.1532-950X.2009.00582.x.
- Herzig R, Kiefer I, Flegel T. Langzeitveränderungen der Operationsstelle nach thorakolumbalen lateraler partieller Korpektomie (TPLC) zur Therapie eines Bandscheibenvorfalles beim Hund. Poster auf dem 12. Leipziger Tierärztekongress, Leipziger Messe, Messe-Allee 1, 04356 Leipzig. 2018.
- Hill TP, am Lubbe, Guthrie AJ. Lumbar spine stability following hemilaminectomy, pediculectomy, and fenestration. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2000; 13(04):165–71. doi: 10.1055/s-0038-1632655
- Hirano R, Asahina R, Hirano T, Hyakkoku A, Miura R, Kunihiro T et al. Outcomes of extensive hemilaminectomy with durotomy on dogs with presumptive progressive myelomalacia: A retrospective study on 34 cases. *BMC Vet Res* 2020; 16(1):476. doi: 10.1186/s12917-020-02690-z.
- Holm S, Maroudas A, Urban JP, Selstam G, Nachemson A. Nutrition of the intervertebral disc: Solute transport and metabolism. *Connect Tissue Res* 1981; 8(2):101–19. doi: 10.3109/03008208109152130.
- Hukins DWL, Meakin JR, Leahy JC. Biomechanics of the spine: The engineer's view. In: Gerber BE, Knight MTN, Siebert WE, Hrsg. *Lasers in the Musculoskeletal System*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2001. p. 237–40.
- Huska JL, Gaitero L, Brisson BA, Nykamp S, Thomason J, Sears WC. Comparison of the access window created by hemilaminectomy and mini-hemilaminectomy in the thoracolumbar vertebral canal using computed tomography. *Can Vet J* 2014 May; 55(5):449-55.
- Huska JL, Gaitero L, Brisson BA, Nykamp S, Thomason J, Sears WC. Presence of residual material following mini-hemilaminectomy in dogs with thoracolumbar intervertebral disc extrusion. *Can Vet J* 2014 Oct; 55(10):975–80.
- Ingram EA, Kale DC, Balfour RJ. Hemilaminectomy for thoracolumbar Hansen type I intervertebral disk disease in ambulatory dogs with or without neurologic deficits: 39 cases (2008-2010). *Vet Surg* 2013; 42(8):924–31. doi: 10.1111/j.1532-950X.2013.12061.x.
- Inoue H. Three-dimensional architecture of lumbar intervertebral discs. *Spine (Phila Pa 1976)* 1981; 6(2):139–46. doi: 10.1097/00007632-198103000-00006.

- Jeffery ND, Harcourt-Brown TR, Barker AK, Levine JM. Choices and decisions in decompressive surgery for thoracolumbar intervertebral disk herniation. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 2018; 48(1):169–86. doi: 10.1016/j.cvsm.2017.08.014.
- Jeffery ND. Treatment of acute and chronic thoracolumbar disc disease by ‘mini hemilaminectomy’. *J Small Anim Pract* 1988; 29(9):611–6. doi: 10.1111/j.1748-5827.1988.tb02181.x.
- Jeffery ND, Levine JM, Olby NJ, Stein VM. Intervertebral disk degeneration in dogs: Consequences, diagnosis, treatment, and future directions. *J Vet Intern Med* 2013; 27(6):1318–33. doi: 10.1111/jvim.12183.
- Kamishina H, Ogawa H, Katayama M, Yasuda J, Sato R, Tohyama K. Spontaneous regression of a cervical intraspinal cyst in a dog. *J Vet Med Sci* 2010; 72(3):349–52. doi: 10.1292/jvms.09-0375.
- King AS, Smith RN. A comparison of the anatomy of the intervertebral disc in dog and man. *Br Vet J* 1955; 111(4):135–49. doi: 10.1016/S0007-1935(17)47302-7.
- Knutsson F. The instability associated with disk degeneration in the lumbar spine. *Acta Radiol* 1944; 25(5-6):593–609. doi: 10.3109/00016924409136488.
- Koehler CL, Stover SM, LeCouteur RA, Schulz KS, Hawkins DA. Effect of a ventral slot procedure and of smooth or positive-profile threaded pins with polymethylmethacrylate fixation on intervertebral biomechanics at treated and adjacent canine cervical vertebral motion units. *Am J Vet Res* 2005; 66(4):678–87. doi: 10.2460/ajvr.2005.66.678.
- Konar M, Lang J, Flühmann G, Forterre F. Ventral intraspinal cysts associated with the intervertebral disc: Magnetic resonance imaging observations in seven dogs. *Vet Surg* 2008; 37(1):94–101. doi: 10.1111/j.1532-950X.2007.00353.x.
- Langerhuus L, Miles J. Proportion recovery and times to ambulation for non-ambulatory dogs with thoracolumbar disc extrusions treated with hemilaminectomy or conservative treatment: A systematic review and meta-analysis of case-series studies. *Vet J* 2017; 220:7–16. doi: 10.1016/j.tvjl.2016.12.008.
- Lemarié RJ, Kerwin SC, Partington BP, Hosgood G. Vertebral subluxation following ventral cervical decompression in the dog. *J Am Anim Hosp Assoc* 2000; 36(4):348–58. doi: 10.5326/15473317-36-4-348.
- Levine JM, Levine GJ, Johnson SI, Kerwin SC, Hettlich BF, Fosgate GT. Evaluation of the success of medical management for presumptive cervical intervertebral disk herniation in dogs. *Vet Surg* 2007a; 36(5):492–9. doi: 10.1111/j.1532-950X.2007.00296.x.

- Levine JM, Levine GJ, Johnson SI, Kerwin SC, Hettlich BF, Fosgate GT. Evaluation of the success of medical management for presumptive thoracolumbar intervertebral disk herniation in dogs. *Vet Surg* 2007b; 36(5):482–91. doi: 10.1111/j.1532-950X.2007.00295.x.
- Levine JM, Levine GJ, Kerwin SC, Hettlich BF, Fosgate GT. Association between various physical factors and acute thoracolumbar intervertebral disk extrusion or protrusion in Dachshunds. *J Am Vet Med Assoc* 2006; 229(3):370–5. doi: 10.2460/javma.229.3.370.
- Lipsitz D, Levitski RE, Chauvet AE, Berry WL. Magnetic resonance imaging features of cervical stenotic myelopathy in 21 dogs. *Vet Radiol Ultrasound* 2001; 42(1):20–7. doi: 10.1111/j.1740-8261.2001.tb00899.x.
- Liu YK, Njus G, Buckwalter J, Wakano K. Fatigue response of lumbar intervertebral joints under axial cyclic loading. *Spine (Phila Pa 1976)* 1983; 8(8):857–65. doi: 10.1097/00007632-198311000-00008.
- Lubbe AM, Kirberger RM, Verstraete FJM. Pediculectomy for thoracolumbar spinal decompression in the dachshund. *J Am Anim Hosp Assoc* 1994; 30:233-8.
- Macy NB, Les CM, Stover SM, Kass PH. Effect of disk fenestration on sagittal kinematics of the canine C5-C6 intervertebral space. *Vet Surg* 1999; 28(3):171–9. doi: 10.1053/jvet.1999.0171.
- Manunta ML, Evangelisti MA, Bergknut N, Grinwis GCM, Ballocco I, Meij BP. Hydrated nucleus pulposus herniation in seven dogs. *Vet J* 2015; 203(3):342–4. doi: 10.1016/j.tvjl.2014.12.027.
- Mayhew PD, McLear RC, Ziemer LS, Culp WTN, Russell KN, Shofer FS et al. Risk factors for recurrence of clinical signs associated with thoracolumbar intervertebral disk herniation in dogs: 229 cases (1994-2000). *J Am Vet Med Assoc* 2004; 225(8):1231–6. doi: 10.2460/javma.2004.225.1231.
- McCartney W. Partial pediculectomy for the treatment of thoracolumbar disc disease. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1997; 10(02):117–21. doi: 10.1055/s-0038-1632580.
- McKee WM. A comparison of hemilaminectomy (with concomitant disc fenestration) and dorsal laminectomy for the treatment of thoracolumbar disc protrusion in dogs. *Vet Rec* 1992; 130(14):296–300. doi: 10.1136/vr.130.14.296.
- McKee WM, Downes CJ, Pink JJ, Gemmill TJ. Presumptive exercise-associated peracute thoracolumbar disc extrusion in 48 dogs. *Vet Rec* 2010; 166(17):523–8. doi: 10.1136/vr.b4823.
- Medl SC, Reese S, Medl NS. Individualized mini-hemilaminectomy-corpectomy (iMHC) for treatment of thoracolumbar intervertebral disc herniation in large breed dogs. *Vet Surg* 2017; 46(3):422–32. doi: 10.1111/vsu.12616.

- Meij BP, Suwankong N, van der Veen AJ, Hazewinkel HAW. Biomechanical flexion-extension forces in normal canine lumbosacral cadaver specimens before and after dorsal laminectomy-discectomy and pedicle screw-rod fixation. *Vet Surg* 2007; 36(8):742–51. doi: 10.1111/j.1532-950X.2007.00331.x.
- Merbl Y, Shamir M, Chamisha Y, Peery D, Benzioni H, Chai O. Three consecutive ventral slots for the treatment of cervical intervertebral disk disease in a dog. *Isr J Vet Med* 2017; 72:49–53.
- Miller A, Marchevsky A. Cranial thoracic vertebral canal stenosis in three juvenile large-breed brachycephalic dogs treated by unilateral hemilaminectomy. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2017; 30(3):223–9. doi: 10.3415/VCOT-16-10-0147.
- Moens NMM, Runyon CL. Fracture of L7 vertebral articular facets and pedicles following dorsal laminectomy in a dog. *J Am Vet Med Assoc* 2002; 221(6):807-10, 800. doi: 10.2460/javma.2002.221.807.
- Moissonnier P, Meheust P, Carozzo C. Thoracolumbar lateral corpectomy for treatment of chronic disk herniation: Technique description and use in 15 dogs. *Vet Surg* 2004; 33(6):620–8. doi: 10.1111/j.1532-950X.2004.04085.x.
- Moon H-S, Hwang Y-H, Lee H-C, Lee J-H. Operative techniques of percutaneous endoscopic mini-hemilaminectomy using a uniportal approach in dogs. *J Vet Med Sci* 2017; 79(9):1532–9. doi: 10.1292/jvms.17-0148.
- Mortera-Balsa V, van Oostrom H, Yeamans C, Gutierrez-Quintana R, Penderis J, Granger N. Suspected air embolism through the thoracic ventral internal vertebral venous plexus during hemilaminectomy in dogs. *J Small Anim Pract* 2017; 58(6):355–8. doi: 10.1111/jsap.12665.
- Myers ER, Wilson SE. Biomechanics of osteoporosis and vertebral fracture. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; 22(24 Suppl):25S-31S. doi: 10.1097/00007632-199712151-00005.
- Nakamoto Y, Uemura T, Hasegawa H, Nakamoto M, Ozawa T. Outcomes of dogs with progressive myelomalacia treated with hemilaminectomy or with extensive hemilaminectomy and durotomy. *Vet Surg* 2021; 50(1):81–8. doi: 10.1111/vsu.13514.
- Ng H-W, Teo E-C, Lee K-K, Qiu T-X. Finite element analysis of cervical spinal instability under physiologic loading. *J Spinal Disord Tech* 2003; 16(1):55–65. doi: 10.1097/00024720-200302000-00010.
- Panjabi M, Abumi K, Duranceau J, Oxland T. Spinal stability and intersegmental muscle forces. A biomechanical model. *Spine (Phila Pa 1976)* 1989; 14(2):194–200. doi: 10.1097/00007632-198902000-00008.

- Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation and enhancement. *J Spinal Disord* 1992a; 5(4):383-9; discussion 397. doi: 10.1097/00002517-199212000-00001.
- Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis. *J Spinal Disord* 1992b; 5(4):390-6; discussion 397. doi: 10.1097/00002517-199212000-00002.
- Panjabi MM. Clinical spinal instability and low back pain. *J Electromyogr Kinesiol* 2003; 13(4):371-9. doi: 10.1016/S1050-6411(03)00044-0.
- Panjabi MM, Lydon C, Vasavada A, Grob D, Crisco JJ, Dvorak J. On the understanding of clinical instability. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994; 19(23):2642-50.
- Priester WA. Canine intervertebral disc disease — Occurrence by age, breed, and sex among 8,117 cases. *Theriogenology* 1976; 6(2-3):293-303. doi: 10.1016/0093-691X(76)90021-2.
- Quint U, Wilke H-J, Shirazi-Adl A, Pamiampour M, Lör F, Claes LE. Importance of the intersegmental trunk muscles for the stability of the lumbar spine: A biomechanical study in vitro. *Spine (Phila Pa 1976)* 1998; 23(18):1937-45. doi: 10.1097/00007632-199809150-00003
- Rapp M, Ley CJ, Hansson K, Sjöström L. Postoperative computed tomography and low-field magnetic resonance imaging findings in dogs with degenerative lumbosacral stenosis treated by dorsal laminectomy. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2017; 30(2):143-52. doi: 10.3415/VCOT-16-06-0096.
- Resnick D, Niwayama G. Intravertebral disk herniations: Cartilaginous (Schmorl's) nodes. *Radiology* 1978; 126(1):57-65. doi: 10.1148/126.1.57.
- Rey J, Fischer MS, Böttcher P. Sagittal joint instability in the cranial cruciate ligament insufficient canine stifle. Caudal slippage of the femur and not cranial tibial subluxation. *Tierarztl Prax Ausg K Kleintiere Heimtiere* 2014; 42(3):151-6. doi: 10.1055/s-0038-1623760
- Risio L de. A review of fibrocartilaginous embolic myelopathy and different types of peracute non-compressive intervertebral disk extrusions in dogs and cats. *Front Vet Sci* 2015; 2:24. doi: 10.3389/fvets.2015.00024.
- Risio L de, Adams V, Dennis R, McConnell FJ. Association of clinical and magnetic resonance imaging findings with outcome in dogs with presumptive acute noncompressive nucleus pulposus extrusion: 42 cases (2000-2007). *J Am Vet Med Assoc* 2009; 234(4):495-504. doi: 10.2460/javma.234.4.495.
- Risio L de, Muñana K, Murray M, Olby N, Sharp NJH, Cuddon P. Dorsal laminectomy for caudal cervical spondylomyelopathy: Postoperative recovery and long-term follow-up in 20 dogs. *Vet Surg* 2002; 31(5):418-27. doi: 10.1053/jvet.2002.34673.

- Rohwedder T, Fischer M, Böttcher P. In vivo fluoroscopic kinematography of dynamic radio-ulnar incongruence in dogs. *Open Vet J* 2017; 7(3):221–8. doi: 10.4314/ovj.v7i3.4.
- Rossmesl JH, White C, Pancotto TE, Bays A, Henao-Guerrero PN. Acute adverse events associated with ventral slot decompression in 546 dogs with cervical intervertebral disc disease. *Vet Surg* 2013; 42(7):795–806. doi: 10.1111/j.1532-950X.2013.12039.x.
- Ruddle TL, Allen DA, Schertel ER, Barnhart MD, Wilson ER, Lineberger JA et al. Outcome and prognostic factors in non-ambulatory Hansen type I intervertebral disc extrusions: 308 cases. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2006; 19(1):29–34. doi: 10.1055/s-0038-1632970
- Rusbridge C, Wheeler SJ, Torrington AM, Pead MJ, Carmichael S. Comparison of two surgical techniques for the management of cervical spondylomyelopathy in dobermanns. *J Small Anim Pract* 1998; 39(9):425–31. doi: 10.1111/j.1748-5827.1998.tb03749.x.
- Salger F, Ziegler L, Böttcher IC, Oechtering G, Böttcher P, Flegel T. Neurologic outcome after thoracolumbar partial lateral corpectomy for intervertebral disc disease in 72 dogs. *Vet Surg* 2014; 43(5):581–8. doi: 10.1111/j.1532-950X.2014.12157.x.
- Santifort KM. Combined partial lateral corpectomy and pediculectomy in a dachshund. *Vet. rec. case rep.* 2020; 8(1). doi: 10.1136/vetreccr-2019-001042.
- Schleifenbaum S, Heilmann R, Riemer E, Reise R, Heyde C-E, Jarvers J-S et al. A biomechanical model for testing cage subsidence in spine specimens with osteopenia or osteoporosis under permanent maximum Load. *World Neurosurg* 2021; 152:e540-e548. doi: 10.1016/j.wneu.2021.05.131.
- Schulz KS, Waldron DR, Grant JW, Shell L, Smith G, Shires PK. Biomechanics of the thoracolumbar vertebral column of dogs during lateral bending. *Am J Vet Res* 1996; 57(8):1228–32.
- Schwede M, Rey J, Böttcher P. In vivo fluoroscopic kinematography of cranio-caudal stifle stability after tibial tuberosity advancement (TTA): A retrospective case series of 10 stifles. *Open Vet J* 2018; 8(3):295–304. doi: 10.4314/ovj.v8i3.8.
- Seim HB. Ventral decompression for the treatment of cervical disk disease in the dog: A review of 54 cases. *J. Am. Anim. Hosp. Assoc.* 1982; 18:233–40.
- Shires PK, Waldron, Hedlund CS, Blass CE, Massoudi L. A biomechanical study of rotational instability in unaltered and surgically altered canine thoracolumbar vertebral motion units. *Prog Vet Neurol* 1991; 2(1):6-14.

- Smit TH, van Tunen MS, van der Veen AJ, Kingma I, van Dieën JH. Quantifying intervertebral disc mechanics: A new definition of the neutral zone. *BMC Musculoskelet Disord* 2011; 7:12:38. doi: 10.1186/1471-2474-12-38.
- Smith BA, Hosgood G, Kerwin SC. Ventral slot decompression for cervical intervertebral disc disease in 112 dogs. *Aust Vet Pract* 1997; 27(2):58–64.
- Smith GK, Walter MC. Spinal decompressive procedures and dorsal compartment injuries: Comparative biomechanical study in canine cadavers. *Am J Vet Res* 1988; 49(2):266–73.
- Smolders LA, Bergknut N, Kingma I, van der Veen AJ, Smit TH, Koole LH et al. Biomechanical evaluation of a novel nucleus pulposus prosthesis in canine cadaveric spines. *Vet J* 2012a; 192(2):199–205. doi: 10.1016/j.tvjl.2011.05.025.
- Smolders LA, Forterre F. Biomechanics of the intervertebral disc and why do discs displace? In: Fingerroth JM, Thomas WB, Hrsg. *Advances in Intervertebral Disc Disease in Dogs and Cats*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2015. p. 8–13.
- Smolders LA, Kingma I, Bergknut N, van der Veen, Albert J, Dhert WJA, Hazewinkel HAW et al. Biomechanical assessment of the effects of decompressive surgery in non-chondrodystrophic and chondrodystrophic canine multisegmented lumbar spines. *Eur Spine J* 2012b; 21(9):1692–9. doi: 10.1007/s00586-012-2285-0.
- Songer MN, Rauschnig W, Carson EW, Pandit SM. Analysis of peridural scar formation and its prevention after lumbar laminotomy and discectomy in dogs. *Spine (Phila Pa 1976)* 1995; 20(5):571-80; discussion 579-80. doi: 10.1097/00007632-199503010-00012.
- Svensson G, Simonsson USH, Danielsson F, Schwarz T. Residual spinal cord compression following hemilaminectomy and mini-hemilaminectomy in dogs: A prospective randomized study. *Front Vet Sci* 2017; 4:42. doi: 10.3389/fvets.2017.00042.
- Swaim SF. Ventral decompression of the cervical spinal cord in the dog. *J Am Vet Med Assoc* 1974; 164(5):491–5.
- Swaim SF, Vandeveld M. Clinical and histologic evaluation of bilateral hemilaminectomy and deep dorsal laminectomy for extensive spinal cord decompression in the dog. *J Am Vet Med Assoc* 1977; 170(4):407-13
- Takahashi K, Miyazaki T, Ohnari H, Takino T, Tomita K. Schmorl's nodes and low-back pain. Analysis of magnetic resonance imaging findings in symptomatic and asymptomatic individuals. *Eur Spine J* 1995; 4(1):56–9. doi: 10.1007/BF00298420.

- Taylor-Brown FE, Cardy TJA, Liebel FX, Garosi L, Kenny PJ, Volk HA et al. Risk factors for early post-operative neurological deterioration in dogs undergoing a cervical dorsal laminectomy or hemilaminectomy: 100 cases (2002-2014). *Vet J* 2015; 206(3):327–31. doi: 10.1016/j.tvjl.2015.10.010.
- Taylor-Brown FE, Decker S de. Presumptive acute non-compressive nucleus pulposus extrusion in 11 cats: Clinical features, diagnostic imaging findings, treatment and outcome. *J Feline Med Surg* 2017; 19(1):21–6. doi: 10.1177/1098612X15605150.
- Tomford WW, Doppelt SH, Mankin HJ, Friedlaender GE. 1983 Bone bank procedures. *Clin Orthop Relat Res.* 1983 Apr; (174):15-21. doi: 10.1097/00003086-198304000-00003.
- VanGundy TE. Disc-associated wobbler syndrome in the doberman pinscher. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 1988; 18(3):667–96. doi: 10.1016/s0195-5616(88)50061-x.
- Vicente F de, Bernard F, FitzPatrick D, Moissonnier P. In vitro radiographic characteristics and biomechanical properties of the canine lumbar vertebral motion unit after lateral corpectomy, mini-hemilaminectomy and hemilaminectomy. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2013; 26(1):19–26. doi: 10.3415/VCOT-12-02-0016.
- Vizcaíno Revés N, Bürki A, Ferguson S, Geissbühler U, Stahl C, Forterre F. Influence of partial lateral corpectomy with and without hemilaminectomy on canine thoracolumbar stability: A biomechanical study. *Vet Surg* 2012; 41(2):228–34. doi: 10.1111/j.1532-950X.2011.00912.x.
- White AA, Panjabi MM. *Clinical biomechanics of the spine.* 2nd ed. Philadelphia, Pa.: Lippincott; 1990.
- Whitehill R, Moran DJ, Fechner RE, Ruch WW, Drucker S, Hooper WE et al. Cervical ligamentous instability in a canine in vivo model. *Spine (Phila Pa 1976)* 1987; 12(10):959–63. doi: 10.1097/00007632-198712000-00001.
- Wilke HJ, Claes L, Schmitt H, Wolf S. A universal spine tester for in vitro experiments with muscle force simulation. *Eur Spine J* 1994; 3(2):91–7. doi: 10.1007/BF02221446.
- Wilke HJ, Wenger K, Claes L. Testing criteria for spinal implants: Recommendations for the standardization of in vitro stability testing of spinal implants. *Eur Spine J* 1998; 7(2):148–54. doi: 10.1007/s005860050045.
- Wilke HJ, Wolf S, Claes LE, Arand M, Wiesend A. Stability increase of the lumbar spine with different muscle groups. A biomechanical in vitro study. *Spine (Phila Pa 1976)* 1995; 20(2):192–8. doi: 10.1097/00007632-199501150-00011.

- Yang H, Lambrechts NE, Lehner M, Adam GM, Packer RA, Moore TW et al. Effects of conventional and slanted ventral slot procedures on the biomechanical behavior of the C5-C6 vertebral motion unit in dogs. *Am J Vet Res* 2016; 77(8):846–53. doi: 10.2460/ajvr.77.8.846.
- Yovich JC, Read R, Eger C. Modified lateral spinal decompression in 61 dogs with thoracolumbar disc protrusion. *J Small Anim Pract* 1994; 35(7):351–6. doi: 10.1111/j.1748-5827.1994.tb01715.x.
- Zdeblick TA, Abitbol JJ, Kunz DN, McCabe RP, Garfin S. Cervical stability after sequential capsule resection. *Spine (Phila Pa 1976)* 1993; 18(14):2005–8. doi: 10.1097/00007632-199310001-00013.
- Zirbel SA, Stolworthy DK, Howell LL, Bowden AE. Intervertebral disc degeneration alters lumbar spine segmental stiffness in all modes of loading under a compressive follower load. *Spine J* 2013; 13(9):1134–47. doi: 10.1016/j.spinee.2013.02.010.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Illustration der dorsoventralen und kraniokaudalen Abmessungen einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) anhand einer Computertomographie des dritten und vierten Lendenwirbels in sagittaler Schnittebene.....	10
Abbildung 2: Illustration der dorsoventralen und laterolateralen Abmessungen einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) anhand einer Computertomographie des dritten Lendenwirbels in transversaler Schnittebene.....	10
Abbildung 3: Illustration zur Positionierung einer Holzschraube durch die Wirbelkörper des ersten und fünften Lendenwirbels anhand einer Computertomographie in transversaler Schnittebene	29
Abbildung 4: Ausrichtung eines Wirbelsäulensegments innerhalb der Einbettwanne zur nachfolgenden Einbettung des kaudalen Wirbelsäulensegmentanteils in Gießharz – Aufsicht.....	30
Abbildung 5: Ausrichtung eines Wirbelsäulensegments innerhalb der Einbettwanne zur nachfolgenden Einbettung des kaudalen Wirbelsäulensegmentanteils in Gießharz – Seitliche Ansicht.....	30
Abbildung 6: Eingießen des Gießharzes in die Einbettwanne zur Fixierung eines ausgerichteten Wirbelsäulensegments an seinem kaudalen Ende.....	31
Abbildung 7: Vollständig eingebettetes Wirbelsäulensegment – Seitliche Ansicht.....	31
Abbildung 8: Wirbelsäulenprüfstand.....	32
Abbildung 9: Ausrichtung eines eingebetteten Wirbelsäulensegments innerhalb des Wirbelsäulenprüfstandes entsprechend der Ausgangsposition.....	32
Abbildung 10: Wirbelsäulensegment eingespannt in Wirbelsäulenprüfstand zur Testung der Extension und Flexion, Ansicht des Wirbelsäulensegments von ventral	34
Abbildung 11: Wirbelsäulensegment eingespannt in Wirbelsäulenprüfstand zur Testung der links- und rechtslateralen Biegung, Ansicht des Wirbelsäulensegments von rechtslateral.....	34
Abbildung 12: Wirbelsäulensegment eingespannt in Wirbelsäulenprüfstand zur Testung der Torsion nach links und rechts, Ansicht des Wirbelsäulensegments von ventral	35

Abbildung 13: Wirbelsäulensegment nach dem Fräsen einer Partiellen Lateralen Korpektomie von rechts zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel und nach erneutem Einspannen in den Wirbelsäulenprüfstand..... 35

Abbildung 14: Wirbelsäulensegment nach dem Fräsen einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie von rechts zwischen dem dritten und vierten Lendenwirbel und nach erneutem Einspannen in den Wirbelsäulenprüfstand..... 36

Abbildung 15: Vergleich der Range of Motion (RoM) der Wirbelsäulensegmente (WSS) in nativem Zustand mit der RoM der WSS nach der Durchführung einer und einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während Extension und Flexion bei n = 10 WSS. Die Boxen repräsentieren den Interquartilsabstand (Bereich der gemessenen mittleren 50 % der RoM). Der Strich innerhalb jeder Box gibt den jeweiligen Median aller erhobenen RoM innerhalb einer Testreihe an. Die Whiskers repräsentieren alle Werte, die kleiner als das erste (unterer Whisker) und größer als das dritte (oberer Whisker) Quartil sind. Die Klammern unterhalb der Boxplots zeigen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Testreihen an..... 40

Abbildung 16: Vergleich der Range of Motion (RoM) der Wirbelsäulensegmente (WSS) in nativem Zustand mit der RoM der WSS nach der Durchführung einer und einer zweiten Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während links- und rechtslateraler Biegung bei n = 10 WSS. Die Boxen repräsentieren den Interquartilsabstand (Bereich der gemessenen mittleren 50 % der RoM). Der Strich innerhalb jeder Box gibt den jeweiligen Median aller erhobenen RoM innerhalb einer Testreihe an. Die Whiskers repräsentieren alle Werte, die kleiner als das erste (unterer Whisker) und größer als das dritte (oberer Whisker) Quartil sind. Die Klammern unterhalb der Boxplots zeigen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Testreihen an..... 41

Abbildung 17: Vergleich der RoM der WSS in nativem Zustand mit der RoM der WSS nach der Durchführung einer und einer zweiten PLC während Torsion nach links und rechts bei n = 10 WSS. Die Boxen repräsentieren den Interquartilsabstand (Bereich der gemessenen mittleren 50 % der RoM). Der Strich innerhalb jeder Box gibt den jeweiligen Median aller erhobenen RoM innerhalb einer Testreihe an. Die Whiskers repräsentieren alle Werte, die kleiner als das erste (unterer Whisker) und größer als das dritte (oberer Whisker) Quartil sind, gleichzeitig aber weniger als das Eineinhalbfache des Interquartilsabstandes vom ersten oder dritten Quartil entfernt sind. Ausreißerwerte sind als Punkte markiert und liegen weiter als das Eineinhalbfache des Interquartilsabstands von der Box entfernt 42

Abbildung 18: Vergleich der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie und Range of Motion in nativem Zustand (a) mit der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien und Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie (b) während Extension und Flexion.....	45
Abbildung 19: Vergleich der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie und Range of Motion in nativem Zustand (a) mit der Differenz zwischen Range of Motion nach der Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien und Range of Motion nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie (b) während links- und rechtslateraler Biegung.....	45
Abbildung 20: Gewebszerreiung zwischen dem zweiten und dritten Lendenwirbel bei Wirbelsäulensegment 11 während des Versagenstests unter lateraler Biegung nach der Anlegung eines Drehmoments von 13 Nm.....	52
Abbildung 21: Illustrative Darstellung einer sigmoidalen Last-Verformungskurve, adaptiert nach VIZCAINO REVÉS et al. (2012), WILKE et al. (1994) und SMOLDERS et al. (2012).....	60
Abbildung 22: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule eines Labrador Retrievers 20 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig).....	68
Abbildung 23: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule desselben Labrador Retrievers 446 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts; die blauen Pfeile zeigen eine beginnende Bildung von Spondylosen an (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig).....	68
Abbildung 24: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule desselben Labrador Retrievers 830 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts; die blauen Pfeile zeigen die deutlich fortgeschrittene Bildung von Spondylosen an (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig).....	68
Abbildung 25: Laterolaterales Röntgen der Lendenwirbelsäule desselben Labrador Retrievers 1294 Tage nach Hemilaminektomie bei Th13-L4 von rechts; die blauen Pfeile zeigen die erneut fortgeschrittene Bildung von Spondylosen an (Röntgenuntersuchung aus der Klinik für Kleintiere, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig).....	68

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse des Friedman-Tests zur Darstellung signifikanter Unterschiede der Range of Motion zwischen den drei Testreihen (native Wirbelsäulensegmente, Wirbelsäulensegmente nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) und nach zwei PLC) innerhalb der drei Bewegungsrichtungen Extension und Flexion, links- und rechtslaterale Biegung sowie Torsion nach links und rechts bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten	39
Tabelle 2: Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zum paarweisen Vergleich der Range of Motion zwischen den verschiedenen Testreihen (native Wirbelsäulensegmente, Wirbelsäulensegmente nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) und nach zwei PLC) während Extension und Flexion sowie links- und rechtslateraler Biegung bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten ..	39
Tabelle 3: Darstellung der aus den Bewegungszyklen sechs bis zehn errechneten Mittelwerte der Range of Motion absolut [°] und prozentual [%] für den nativen Zustand der Wirbelsäulensegmente (Testreihe 1) sowie für den Zustand nach einer (Testreihe 2) und einer zweiten (Testreihe 3) Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion nach links und rechts bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten	43
Tabelle 4: Darstellung der Zunahme der Range of Motion (RoM) im Vergleich zwischen den verschiedenen Testreihen (native Wirbelsäulensegmente, Wirbelsäulensegmente nach einer und nach zwei Partiellen Lateralen Korpektomien (PLC)) während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion nach links und rechts bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten	44
Tabelle 5: Vergleich der Differenzen zwischen Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie und der Range of Motion der Wirbelsäulensegmente in nativem Zustand mit der Differenz zwischen Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach der Durchführung zweier Partieller Lateraler Korpektomien und der Range of Motion der Wirbelsäulensegmente nach der Durchführung einer Partiellen Lateralen Korpektomie mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zur Prüfung auf Gleichheit der Differenzen	46
Tabelle 6: Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zum paarweisen Vergleich der Teil-Ranges of Motion innerhalb derselben Bewegungsrichtung; als Signifikanzniveau wurde p = 0,05 gewählt ...	47
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Teil-Ranges of Motion innerhalb eines Bewegungszyklus (Extension vs. Flexion, links (li)- vs. rechtslaterale (re) Biegung, Torsion nach links (li) vs. Torsion nach rechts (re)) in absoluten Werten bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten	48

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Teil-Range of Motion innerhalb eines Bewegungszyklus (Extension vs. Flexion, links (li)- vs. rechtslaterale (re) Biegung, Torsion nach links (li) vs. Torsion nach rechts (re)) in prozentualen Werten bei n = 10 Wirbelsäulensegmenten 49

Tabelle 9: Darstellung der Mittelwerte der Range of Motion (RoM) inklusive ihrer Standardabweichung (SD) des nativen Wirbelsäulensegments 9 über die drei verschiedenen Testreihen hinweg während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion 51

Tabelle 10: Vergleich der in dieser Studie und den Studien von VIZCAÍNO REVÉS et al (2012) und VICENTE et al. (2013) gemessenen Ranges of Motion der Lendenwirbelsäulensegmente von Hundekadavern in nativem Zustand und im Zustand nach einer Partiellen Lateralen Korpektomie (PLC) während Extension und Flexion, links- und rechtslateraler Biegung sowie Torsion nach links und rechts. Fett gedruckt sind diejenigen Messergebnisse, bei denen signifikante Zunahmen der Range of Motion zwischen nativem Zustand und Zustand nach einer PLC festgestellt wurden 58

11. Finanzielle Förderung und Veröffentlichung der Studienergebnisse

Die Finanzierung dieser Studie wurde dankenswerter Weise in vollem Umfang durch die Gesellschaft zur Förderung Kynologischer Forschung e.V. übernommen. Entsprechend der Vereinbarungen zur finanziellen Förderung wurden die Ergebnisse dieser Studie am 23. September 2022 im Rahmen eines Kurzabstracts auf dem 34. ESVN-ECVN Symposium vorgestellt.

12. Danksagung

Viele Personen haben mich auf dem Weg zur Erstellung dieser Dissertation tatkräftig unterstützt. Aus diesem Grund möchte ich allen Beteiligten hier meinen herzlichen Dank aussprechen.

Herr Prof. Dr. Thomas Flegel begleitete mich als Doktorvater von der Themenfindung über die Studiendurchführung bis hin zur Anfertigung der Monographie. Sein hervorragendes Fachwissen, seine Genauigkeit, seine Übersicht und Zielgerichtetheit waren mir zugleich Antrieb und Verpflichtung. Für seine konstruktiven Ratschläge und sein stets offenes Ohr bin ich ihm überaus dankbar.

Danken möchte ich auch Dr. Shenja Loderstedt und allen Mitarbeitern der Abteilung Neurologie und Neurochirurgie der Klinik für Kleintiere der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig für ihre fachliche Unterstützung und ihre aufmunternde Art; ohne euren Rückhalt und eure Unterstützung wäre die Durchführung dieser Arbeit und auch die Präsentation der Ergebnisse nicht möglich gewesen.

Die Abteilung Bildgebende Diagnostik der Klinik für Kleintiere der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig unterstützte mich bei der Durchführung und Befundung der Computertomographien mit hervorragendem Sachverstand und großem Durchhaltevermögen.

Herrn Dr. Stefan Schleifenbaum, Herrn Robin Heilmann und Frau Elena Riemer danke ich für die Konstruktion des Wirbelsäulenprüfstandes sowie die konstruktive Unterstützung während der biomechanischen Tests und der anschließenden Auswertung der Ergebnisse. Euer unermüdlicher Einsatz, eure Hilfsbereitschaft und das kollegiale Miteinander halfen, so manche Hürde zu überwinden.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. Dirk Hasenclever für seine Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Untersuchungsergebnisse und Frau Prof. Dr. Michaela Alef für ihre Hilfe bei der Zusammenfassung der Monographie. Frau Lynnda Curry und Frau Monica Solem überarbeiteten mit Feuereifer die englische Zusammenfassung der Monographie. Auch hierfür möchte ich meinen großen Dank aussprechen.

Für die Mithilfe bei der Suche nach für die Studie geeigneten Tierkadavern bedanke ich mich bei Frau Susanne Ludewig aus der Kleintierpraxis an der Lutherkirche in Limbach-Oberfrohna.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, für ihren Rückhalt, für Zuspruch und Aufmunterung und die Vermittlung von Zuversicht, auch dann, wenn es mal nicht so gut lief.

Nana, du bist der lebende Beweis dafür, dass ich den richtigen Beruf gewählt habe.