

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
(Muskuloskelettales Universitätszentrum München)
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktoren:

Prof. Dr. med. Boris Holzapfel, PhD; Lehrstuhl Orthopädie

Prof. Dr. med. W. Böcker; Lehrstuhl Unfallchirurgie

**Entwicklung und klinisch- experimentelle Evaluation von
Ausbildungs- und Behandlungsstrategien bei degenerativen
Erkrankungen der Lendenwirbelsäule mit besonderem Augenmerk
auf die Spinalkanalstenose**

Kumulative Habilitationsschrift der Medizinischen Fakultät der LMU
München zur Erlangung der *venia legendi* im Fach
Orthopädie und Unfallchirurgie



vorgelegt von

Dr. med. Carolin Melcher

2023

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1. <i>Lumbale Rückenschmerzen</i>	3
1.2. <i>Unspezifische Rückenschmerzen</i>	4
1.3. <i>Spezifische Rückenschmerzen</i>	6
1.4. <i>Die lumbale Spinalkanalstenose</i>	6
1.5. <i>Behandlungsstrategien der lumbalen Spinalkanalstenose</i>	9
1.6. <i>Ausbildungsstrategien</i>	11
2. <i>Fragestellung und Zielsetzung der Rehabilitationsarbeit</i>	13
3. <i>Darstellung der Publikationen</i>	15
3.1. <i>Management des akuten lumbalen Rückenschmerzes in der Primärversorgung</i>	15
3.2. <i>Entwicklung von Verfahrens-Metriken für die Durchführung einer minimal-invasiven Laminotomie zur bilateralen Dekompression einer Spinalkanalstenose</i>	18
3.3. <i>Die Verwendung eines High-Fidelity Training Simulators für die minimal Invasive lumbale Dekompression erhöht das operative Verständnis sowie die technischen Fähigkeiten von orthopädischen und neurochirurgischen Assistenten</i>	22
3.4. <i>Ein- und eine halbe Fusion- Unisegmentale TLIF- Fusion mit Dekompression des Anschlusssegmentes mittels unilateraler Laminotomie zur bilateralen Dekompression bei Spondylolisthesis mit bisegmentaler Stenose</i>	26
3.5. <i>Die lumbale Spinalkanalstenose – Ist das chirurgische Ergebnis und die Gefahr einer Revision allein vom Chirurgen abhängig?</i>	29
4. <i>Zusammenfassung, Beantwortung der gestellten Fragen und Ausblick in die Zukunft</i> 31	
5. <i>Literaturverzeichnis</i>	34
6. <i>Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen</i>	38
7. <i>Abkürzungsverzeichnis</i>	39
8. <i>Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen</i>	40
8.1. <i>Originalarbeiten als Erst und Letztautor</i>	40
8.2. <i>Originalarbeiten als Co- Autor</i>	42
8.3. <i>Case- Reports</i>	43
9. <i>Danksagung</i>	45

1. Einleitung

1.1. Lumbale Rückenschmerzen

Unter lumbalem Rückenschmerz werden Schmerzen und Missempfindungen verstanden, die vom unteren Rippenbogen bis zu den Glutealfalten reichen und unter Umständen mit einer Ausstrahlung in die Beine einhergehen (Deutsche Gesellschaft für Allgemeinmedizin und Familienmedizin, 2003). Als akute lumbale Rückenschmerzen werden Schmerzepisoden bezeichnet, die erstmals oder nach mindestens sechs schmerzfreien Monaten auftreten und höchstens sechs Wochen andauern (Bundesärztekammer (BÄK), 2017).

Die Bedeutung des lumbalen Schmerzes für die Gesellschaft ist mehrschichtig. Einerseits verspüren die betroffenen Patienten meist einen außerordentlichen Leidensdruck und eine persönliche Einschränkung und andererseits stellt die Inanspruchnahme des medizinischen Versorgungssystems mit möglicherweise langfristiger Arbeitsunfähigkeit sowie Erwerbsminderungsrente eine immense sozioökonomische Belastung dar. (Raspe, 2012)

Die Gesundheitsstatistiken des statistischen Bundesamtes und des Robert Koch Institutes verdeutlichen die Relevanz von Rückenschmerzen. (Institut, 2007) Statistisch leiden ca. 57% der Männer und 66% der Frauen in Deutschland mindestens einmal jährlich unter Rückenschmerzen, während die Stichtagsprävalenz zwischen 32% und 49% und die Lebenszeitprävalenz mit 74% bis 85% angegeben wird (Lange, 2011; Raspe, 2012; Schmidt et al., 2007). Diese Prävalenz nimmt bis zum mittleren Alter für beide Geschlechter zu, um dann wieder abzunehmen. Bei Frauen steigt die Prävalenz von 14,5 % innerhalb der Gruppe der 18-29- Jährigen auf 34,6% bei 35–50- Jährigen.

Bei Männern ist ein Anstieg von 7,7% auf 23,4% zu verzeichnen (Dunn, Hestbaek, & Cassidy, 2013; Institut, 2007). Ab dem 65. Lebensjahr sinkt die Zahl der berichteten Rückenschmerzepisoden wieder, was möglicherweise auf eine abnehmende Beweglichkeit und körperliche Aktivität sowie reduzierte psychosoziale Konflikte nach Renteneintritt zurückzuführen ist (Bakker et al., 2007; Jäckel, 1998).

Neben der Abhängigkeit vom Alter scheint vor allem bei Frauen epidemiologisch das Bildungsniveau einen Einfluss auf das Auftreten von Rückenschmerzen zu haben, da nachgewiesen wurde, dass innerhalb der untersten Bildungsschicht 30,8% der Frauen eine Episode von Rückenschmerzen beklagten, während die Quote in der obersten Bildungsschicht

nur bei 16,9% lag (Hestbaek, Korsholm, Leboeuf-Yde, & Kyvik, 2008; Institut, 2007). Für Männer konnten vergleichbare Unterschiede nicht nachgewiesen werden.

Die deutschen Zahlen lassen sich mit europäischen Studien vergleichen. So wird in den europäischen Richtlinien für das Management von chronischen lumbalen Rückenschmerzen eine Lebenszeitprävalenz bis zu 84% beschrieben und das Rezidivrisiko nach einem schmerzfreien Intervall mit 44-78 % der Betroffenen angegeben (Airaksinen et al., 2006). Diesen hohen Prävalenzraten muss gleichzeitig gegenübergestellt werden, dass bei 80% der Patienten die Schmerzen nach spätestens acht Wochen rückläufig sind (Diemer, 2002).

Die Diagnostik und Therapie von Rückenschmerzen wird trotz nationaler und internationaler Leitlinien oftmals noch wenig standardisiert durchgeführt und unterscheidet sich zwischen den einzelnen Arztgruppen. Dabei spielt die Vielzahl an unterschiedlichen ärztlichen Leistungserbringern und Einrichtungen sowie deren unterschiedlicher Umgang mit Rückenschmerzen eine erhebliche Rolle, was ein einheitliches und damit zielgerichtetes Vorgehen erschwert.

Bedeutsam ist vor allem die Versorgung auf der Ebene der Erstbehandler, in der eine Differenzierung zwischen spezifischen und nicht spezifischen Rückenschmerzen erfolgen und das Augenmerk auf die Vermeidung einer unnötigen Diagnostik, medikamentösen Therapie und damit einhergehenden Chronifizierungsgefahr liegen sollte. Dies gilt ebenso für Allgemeinmediziner wie Kolleg*innen in Notaufnahmen (Bardin, King, & Maher, 2017; C. Itz, Huygen, & Kleef, 2016; Machado, Rogan, & Maher, 2018; van Tulder et al., 2006).

1.2.Unspezifische Rückenschmerzen

Unspezifische Rückenschmerzen sind definiert als Schmerzen ohne klares morphologisches Korrelat, welche häufig akut auftreten und nach kurzem Verlauf spontan oder unter Therapie vollständig verschwinden (Maher, Underwood, & Buchbinder, 2017). Die Abgrenzung zwischen nicht spezifischen und spezifischen Kreuzschmerzen ist gleichzeitig nicht immer leicht, da sich Symptome ähneln und für viele spezifische Kreuzschmerzformen keine klaren diagnostischen Kriterien existieren. Zudem reicht die Trennschärfe bei den häufigen funktionellen Ursachen oftmals nicht aus, da die Schmerzen von den aktiven Bewegungselementen ausgehen. Es kommt zu Verspannungen, Verkürzungen oder Überdehnungen, ohne dass spezifische Krankheitsvorgänge beteiligt sind. Zudem können eine veränderte Wirbelsäulenstatik (Hypo- oder Hyperlordose, Dysbalancen) und

systemische Probleme wie Koordinationsstörungen, Insuffizienz der Tiefenstabilität oder Hypermobilität eine entsprechende Funktionsstörung hervorrufen (Casser, Seddigh, & Rauschmann, 2016).

Unspezifische Rückenschmerzen reagieren meist gut auf eine rechtzeitige Korrektur der Haltung und des Bewegungsverhaltens, ausgleichende körperliche Aktivität sowie, soweit notwendig, eine schmerzadaptierte Analgesie.

Dem Verständnis eines biopsychosozialen Krankheitsmodells entsprechend, sind bei nicht-spezifischen Kreuzschmerzen neben somatischen auch psychische und soziale Faktoren bei der Entstehung und Persistenz der Beschwerden relevant und entsprechend bei der Diagnostik und Therapie zu berücksichtigen (Rudwaleit & Marker-Hermann, 2012). Bei manchen Patienten erfordert dies besondere Aufmerksamkeit, da psychosoziale Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung und Prognose der Erkrankung haben können.

Der Verlauf kann je nach Einzelfall sehr unterschiedlich sein (Koes, van Tulder, & Thomas, 2006). Demzufolge ist eine individuelle Betreuung der Patienten sinnvoll und notwendig. Es wurde postuliert, dass bei nicht spezifischen Rückenschmerzen die Beschwerden selbstbegrenzend sind und nur 2–7% der Betroffenen chronische Schmerzen entwickeln, während sich die akuten Beschwerden in sechs Wochen um etwa die Hälfte zurückbilden (Costa da et al., 2012) und 68–86% der Betroffenen innerhalb eines Monats ihre Arbeit wieder aufnehmen.

Im Gegensatz dazu konnten Pengel, Itz und Mehling nachweisen, dass nur ein Drittel der Patienten innerhalb von 3 Monaten eine spontane Remission erfahren, 16 % nach 6 Monaten ihre täglichen Aktivitäten noch nicht aufgenommen haben und 62 % der Betroffenen auch nach 12 Monaten nicht schmerzfrei sind (Pengel, Herbert, Maher, & Refshauge, 2003), (C. J. Itz, Geurts, van Kleef, & Nelemans, 2013) (Mehling et al., 2012).

1.3. Spezifische Rückenschmerzen

Wie bereits dargelegt, handelt es sich bei der überwiegenden Zahl von lumbalen Beschwerden um sogenannte „unspezifische“ Rückenschmerzen, jedoch können sich schwerwiegende Pathologien hinter dem Symptomkomplex „Kreuzschmerz“ verbergen. Bei spezifischen lumbalen Rückenschmerzen besteht eine Korrelation der klinischen Symptomatik mit pathoanatomischen Befunden, wie z.B. Kompression neuraler Strukturen durch Bandscheibenvorfälle und degenerativen Veränderungen mit möglicher Aktivierung oder struktureller Instabilität eines oder mehrerer Bewegungssegmente. Insgesamt liegen nur bei 15% aller akuten Rückenschmerzepisoden spezifische und relevante pathologische Befunde vor. Ca. 4 % dieser Patienten weisen einen Bandscheibenprolaps, 3 % eine Spinalkanalstenose, 2 % auf eine Spondylolisthesis und etwa 1–4 % eine Wirbelkörperfraktur auf. Noch seltener wird ein primärer Tumor beziehungsweise eine Metastase (0,7 %), ein Morbus Bechterew (0,2 %) oder eine Spondylodiszitis (0,01 %) diagnostiziert (Henschke et al., 2009). Wichtig ist, auch die Möglichkeit einer extravertebralen, durch topografisch benachbarte Organe ausgelösten Ursache nicht zu unterschätzen, da Pathologien wie Cholezystitiden, Endometriosen, Pankreatitiden oder Zosterneuralgien immerhin bei 2% aller Patienten ursächlich sind. Auch Myokardinfarkte und Bauchortenaneurysmen können vordringlich mit lumbalen Schmerzen einhergehen. (Deyo & Weinstein, 2001).

In Anbetracht der möglichen, vielfältigen Pathologien, welche gleichzeitig insgesamt selten sind, muss das Ziel der eingeleiteten Diagnostik vordringlich sein, vertebrale und extravertebrale Notfälle und schwerwiegende Pathologien zu erkennen, spezifische Therapien einzuleiten und dabei unnötige und möglicherweise sogar belastende Untersuchungen zu vermeiden. (S2k-Leitlinie, 2017; VersorgungsLeitlinie, 2017)

1.4. Die lumbale Spinalkanalstenose

Die lumbale Spinalkanalstenose (LSS) wird definiert als Verminderung der Querschnittsfläche des Duralsackes (DCSA), welche in zunehmendem Alter durch degenerative Prozesse an der Lendenwirbelsäule hervorgerufen wird. Der Höhen- und Flüssigkeitsverlust der Bandscheiben führt neben einer Einengung der Rezessus und Neuroforamina zu einer Mikroinstabilität der Facettengelenke, die eine Hypertrophie der Facetten zur Folge haben und in Kombination mit einer Strukturveränderung bzw. Hypertrophie der ligamentären Komplexe zu einer dorsalen Kompression und konsekutiven Spinalkanalstenose führen (Benditz & Grifka, 2019; Benini, 1997). Durch die Degeneration

der Bandscheibe entsteht gleichzeitig ein „bulging“, das wiederum zu einer Einengung des Spinalkanals von ventral führt. Besteht vor allem eine Reduktion des Sagittaldurchmesser des Spinalkanals, spricht man von einer zentralen Stenose. Die häufigste Form ist jedoch die laterale Stenose, welche durch eine Stenose im Rezessus und/oder Foramen ausgelöst wird. In der Regel liegen Kombinationen beider Formen vor (Benini, 1997; Tomkins-Lane, Battié, Hu, & Macedo, 2014; Verbiest, 1977).

Die Kompression intraspinal verlaufender nervaler und vaskulärer Strukturen geht mit einer belastungsabhängigen, radikulären oder pseudoradikulären Schmerzausstrahlung in die Beine und einer Reduktion der schmerzfreien Gehstrecke (Claudicatio spinalis) einher. Neuere Studien erklären die häufig bestehenden Rückenschmerzen mit einer erhöhten Dichte an sensorischen Fasern im hypertrophierten Lig. flavum (Benditz et al., 2019). Diese Schmerzen können sowohl durch Kompensationsmechanismen des Körpers als auch Co-Morbiditäten der vorwiegend älteren Patientenklientel maskiert sein (Igawa et al., 2018; Pourtaheri et al., 2017).

Aus diesen Gründen ist die exakte Anamneseerhebung vor allem zur Abgrenzung einer Claudicatio intermittens von Wichtigkeit. Patienten mit Spinalkanalstenose klagen überwiegend über progrediente Symptome beim Stehen und Gehen und eine Erleichterung beim Sitzen und Liegen. So führt eine Kyphosierung der Lendenwirbelsäule wie beispielsweise beim Fahrradfahren und Bergaufgehen zu einer Beschwerdereduktion, während Bergabgehen eine Progredienz der Beschwerden auslöst. Hinweisend ist, dass Stehen bei einer vaskulären Ursache meist zu einer Erleichterung und bei spinaler Ursache zu einer Verschlechterung führt.

Auch das Verhältnis zwischen Rückenschmerz und Beinschmerz ist wichtig, denn während die Beinschmerzen durch eine nervale Kompression entstehen, ist der Rückenschmerz vordringlich durch Facettendegenerationen und Instabilitäten zu erklären. Jedes Symptom an sich bzw. die Relation zwischen beiden führt zu unterschiedlichen Therapiekonzepten.

Aufgrund der älter werdenden Gesellschaft einerseits und gleichzeitig besser zugänglicher und qualitativ hochwertigerer Bildgebung mittels Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT) andererseits, wird die Spinalkanalstenose seit ihrer Erstbeschreibung 1950 immer häufiger diagnostiziert (Verbiest, 1950). Dabei wird die Inzidenz der lumbalen Spinalkanalstenose in der Literatur sehr unterschiedlich angegeben. In

einem Review von 2020 postulierten Jensen et al. eine gepoolte Prävalenz von 11% in der Allgemeinbevölkerung und 25 bis 39% in klinischen Populationen (Jensen, Jensen, Koes, & Hartvigsen, 2020). Katz et al. nennen 2022 eine Zahl von 103 Millionen betroffenen Menschen weltweit (Katz, Zimmerman, Mass, & Makhni, 2022).

1.5. Behandlungsstrategien der lumbalen Spinalkanalstenose

Der bereits angesprochene demografische Wandel mit immer älteren, aber auch aktiveren Patienten, die erwähnte zugänglichere und verbesserte präoperative Bildgebung sowie fortschrittliche Operationstechniken haben die Erwartungshaltung der Patienten an die Therapie verändert. Dies gilt einerseits für die konservative Therapie, aber insbesondere auch für die operative Versorgung. Laut S2k- Leitlinie der AWMF (Registernummer 033-051) stellt die konservative Therapie trotz niedrigen Evidenzniveaus weiterhin das Mittel der Wahl bei Spinalkanalstenosen dar (S2k-Leitlinie, 2017).

Während für eine Medikation mit neuropathisch wirksamen Medikamenten wie Gabapentin eine niedrige oder sehr niedrige Evidenz besteht (Ammendolia, 2013), scheinen epidurale Injektionen insbesondere im kurzen Verlauf (2 Wochen- 6 Monate) eine Verringerung der Beschwerden erreichen zu können, wobei unklar bleibt, ob wiederholte Injektionen oder der Zusatz von Cortison eine Verlängerung der Wirkdauer bewirken können.

Durch Physiotherapie kann keine Verbesserung der Gehstrecke erwirkt werden, jedoch erscheint eine Beübung möglicherweise den Beinschmerz verbessern zu können. Dies gilt insbesondere für Patienten mit Haltungs- und belastungsabhängigen Beinschmerzen, welche von einer entlordosierenden Physiotherapie profitieren können. Ein ähnlicher Effekt kann auch durch eine Orthesenversorgung erreicht, jedoch nicht auf Dauer gehalten werden (Genevay & Atlas, 2010; Society, 2011).

Verbleibt die konservative Therapie frustan, ist die Dekompression das Mittel der Wahl, um die Stenose zu adressieren. In 2 RCTs und mehreren vergleichenden Studien konnte gezeigt werden, dass sowohl die konservative als auch operative Therapie zu einer Symptombesserung führen, die operative Dekompression der konservativen Therapie jedoch überlegen ist (Amundsen et al., 2000; Katz et al., 2022; Malmivaara et al., 2007; Weinstein et al., 2008). Lumbale Dekompressionsoperationen sind die am häufigsten durchgeführten Wirbelsäulenoperationen. Dies gilt für die operative Behandlung des lumbalen Bandscheibenvorfalls gleichermaßen wie für die Behandlung der degenerativen lumbalen Spinalstenose beim älteren Menschen.

Ogleich es sich um unterschiedliche klinische und morphologische Pathologien handelt, ist die genetisch prädisponierte und durch äußere Faktoren (Alter, Gewicht, Aktivitätslevel etc.) modulierte Bandscheibendegeneration der auslösende Pathomechanismus. Nach lumbalen Dekompressionsoperationen determiniert das initiale klinische Ergebnis häufig auch die

endgültige Patientenzufriedenheit. Dieses Ergebnis wird im Wesentlichen durch die Effizienz der Dekompression und die mit der Operation einhergehende perioperative Morbidität bestimmt, welche wiederum sowohl zur Invasivität des Eingriffs (Gewebetrauma) als auch zum Auftreten von Komplikationen direkt proportional ist. In den vergangenen 10-15 Jahren haben sich dabei Form und Mittel, mit welchen eine Dekompressionsoperation durchgeführt wird, deutlich verändert. Neben der klassischen mikroskopisch assistierten Dekompression gewinnen heutzutage minimal-invasive bis hin zu endoskopischen Techniken zunehmend an Bedeutung. So stellt sich im Rahmen der operativen Versorgung nicht nur die Frage nach der Visualisierungsquelle, sondern gleichzeitig auch die nach Verwendung von Retraktoren, Fräsen und sonstigen Hilfsmitteln (Machado et al., 2016).

1.6.Ausbildungsstrategien

Grundsätzlich existiert in Deutschland ein definierter Katalog für die Weiterbildung in den entsprechenden Fachspezialitäten. So ist es zum Beispiel notwendig 1225 klar definierte operative und nicht-operative Prozeduren durchzuführen, um als Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie zur Prüfung zugelassen zu werden. Dabei gibt es jedoch keine Sicherheit, dass diese Eingriffe durchgeführt werden können bzw. durchgeführt wurden und keine Kontrolle, in welcher Form die Ausbildung erfolgte. Eine regelmäßige „externe“ Kontrolle, wie z. B. die „*orthopaedic in-training examination*“ (OITE) in den USA, ist in nur wenigen Ländern fester Bestandteil der Weiterbildung. Das OITE erfasst im Rahmen eines jährlichen Tests sowohl den Wissensstand der Weiterzubildenden als auch die Qualität des Weiterbildners (Miyamoto Jr, Klein, Walsh, & Zuckerman, 2007). Eine solche externe und beidseitige Qualitätskontrolle ist vor allem deshalb sinnvoll, da gerade in der Chirurgie nicht immer klare Handlungskonzepte existieren, sondern es viele Möglichkeiten der Versorgung gibt, die je nach Vorliebe des Operateurs eingesetzt und von diesem entsprechend auch weitergegeben werden.

Diese Problematik endet jedoch nicht mit Abschluss der Facharztweiterbildung. In der Ausbildung junger Chirurg*innen bedarf es einer feinen Balance zwischen fachlicher Autonomie, die diesen ermöglicht, selbständig, bedacht und umsichtig einen Eingriff durchzuführen und der Patientensicherheit, die primär und vordergründig gewahrt sein muss.

Gerade im Rahmen zunehmender Regulierung der Arbeitszeiten und sinkender Zahlen von Assistenzärzten/*innen, vor allem in den chirurgischen Fächern stellt sich hier die Frage, wie diese Operationstechniken in einer Quantität und Qualität vermittelt werden können, um den gewünschten Standard in der Patientenversorgung aufrecht zu erhalten.

Hier bedarf es neuer Wege und einer Anpassung der Ausbildung unter Nutzung neuer, auch interaktiver Möglichkeiten. Ebenso bedarf es einer veränderten Struktur des „Hands-on-Trainings“, das bisher vor allem im OP und bei Cadaverkursen vermittelt werden konnte. Diese Cadaverkurse sind einerseits finanziell kostspielig und bilden andererseits nicht die reale OP- Situation ab, da nicht nur das Gewebe in der Haptik massiv verändert ist, sondern auch keine Komplikationen wie Blutungen, Gefäß- oder Duraverletzungen zu simulieren sind (Reznick & MacRae, 2006).

Eine Alternative stellen hier High-fidelity-Simulatoren dar, wie sie in der Luftfahrt schon Jahrzehnte und in diversen medizinischen Fachbereichen auch bereits seit längerem mit

großem Erfolg eingesetzt werden (Cannon et al., 2014; Domhan et al., 2020; Palter & Grantcharov, 2014; Roche et al., 2021).

2. Fragestellung und Zielsetzung der Habilitationsarbeit

Die Behandlung spezifischer und unspezifischer Rückenschmerzen im Allgemeinen und der Spinalkanalstenose im Speziellen bleibt sowohl innerhalb der Fachdisziplinen als auch interdisziplinär und im internationalen Vergleich divers. Dies gilt auch für die operative Ausbildung von jungen Chirurg*innen.

Vor diesem Hintergrund sollen in dieser Arbeit folgende spezifische Fragestellungen beantwortet werden:

Wie kann die Diagnostik lumbaler Pathologien vereinfacht und die Behandlung entsprechend zu verbessert werden?

Kann die operative Behandlung der Spinalkanalstenose in Behandlungs-Metriken zusammengefasst und so ein operativer Leitfaden erstellt werden?

Kann ein solcher Leitfaden unter zusätzlicher Unterstützung eines realitätsnahen Simulators die operative Performance von erfahrenen und unerfahrenen Chirurg*innen bei Wirbelsäulenoperationen verbessern?

Welche Merkmale entscheiden über das Outcome von lumbalen Dekompressionsoperationen und sind Komplikationen vorhersagbar?

Können Komplikationen durch die Verwendung unterschiedlicher Techniken reduziert werden?

Folgende Projektarbeiten wurden zur Erörterung der Fragestellungen im Rahmen der Habilitationsarbeit durchgeführt:

- # 1: Management des akuten lumbalen Rückenschmerzes in der Primärversorgung
- # 2: Entwicklung von Verfahrens-Metriken für die Durchführung einer minimal-invasiven Laminotomie zur bilateralen Dekompression einer Spinalkanalstenose

- # 3: Die Verwendung eines High-Fidelity Training Simulators für die minimal invasive lumbale Dekompression erhöht das operative Verständnis sowie die technischen Fähigkeiten von orthopädischen und neurochirurgischen Assistenten
- # 4: "Ein- und eine halbe Fusion"- unisegmentale TLIF- Fusion mit Dekompression des Anschlusssegmentes mittels unilateraler Laminotomie zur bilateralen Dekompression bei Spondylolisthesis mit bisegmentaler Stenose
- # 5: Die lumbale Spinalkanalstenose – Ist das chirurgische Ergebnis und die Gefahr eines Revisionseingriffes vom Chirurgen abhängig?

3. Darstellung der Publikationen

3.1. Management des akuten lumbalen Rückenschmerzes in der Primärversorgung

Melcher C, Wegener B, Jansson V, Mutschler W, Kanz KG, Birkenmaier C. Management of acute low back pain without trauma - an algorithm. *Z Orthop Unfall*. 2018 Oct;156(5):554-560.

Melcher C, Birkenmaier C, Wegener B.

[Management of acute backpain without trauma - an algorithm].

MMW Fortschr Med. 2021 Sep;163(16):44-47. doi: 10.1007/s15006-021-0239-3.

Jauch, Mutschler, Wichmann

Chirurgische Basisweiterbildung (2009-2022)

Akuter Wirbelsäulenschmerz

Die Diagnostik und Behandlung akuter lumbaler Rückenschmerzen in Allgemeinarzt- oder orthopädischen Praxen, Ambulanzen und Notaufnahmen differiert aufgrund der unterschiedlichen Struktur und Ausrichtung der Institutionen sehr und erfolgt in der täglichen Praxis oftmals entsprechend wenig standardisiert.

Bedeutsam ist vor allem die Versorgung auf Ebene der Erstbehandler, in der eine Differenzierung zwischen spezifischen und nicht spezifischen Rückenschmerzen erfolgen und das Augenmerk auf die Vermeidung einer unnötigen Medikalisierung und Chronifizierung gerichtet sein sollte (Bork, 2017). Gleichzeitig fehlt trotz des Vorliegens multipler Leitlinien (Deutsche Gesellschaft für Allgemeinmedizin und Familienmedizin, 2003; S2k-Leitlinie, 2017; VersorgungsLeitlinie, 2017) ein gut zu nutzender Ablaufplan. Ziel war es entsprechend, einen Handlungsalgorithmus zu entwickeln, dessen logischer Ablauf mittels Risikoprofilen, anamnestischer Information, klinischen Untersuchungsbefunden und gezielt eingesetzten apparativen Untersuchungen eine systematische Evaluation von potenziell lebensbedrohlichen über weniger bedrohliche Differenzialdiagnosen bis zum unkomplizierten Kreuzschmerz ermöglichen sollte.

Bei der Erstellung der jeweiligen Entscheidungs- und Schaltstellen wurde große Mühe darauf verwendet, einen klinisch praktikablen und, wo möglich, evidenzbasierten Kompromiss zwischen dem Risiko der teuren Überdiagnostik und dem des Übersehens bedrohlicher Pathologien zu finden.

Material und Methoden:

Mittels systematischer Literaturrecherche in Medline und der Cochrane Library sowie Referenzrecherche der Literaturverzeichnisse relevanter Publikationen wurde die vorhandene Literatur unter Verwendung der Suchbegriffe: „*lumbar back pain, imaging, sciatica, management, back pain guidelines, therapy*“ gesichtet. Die Entwicklung des Algorithmus erfolgte unter Berücksichtigung der Evidenzklasse der relevanten Literatur einerseits sowie der Erfahrung des klinischen Alltages andererseits. Aus über 15.000 Veröffentlichungen wurden mit diesen stringenten Kriterien und manueller Referenzrecherche 158 relevante Artikel selektiert und analysiert. Die Klassifizierung der Suchergebnisse erfolgte entsprechend ihres Evidenzgrades, wobei als Grundlagen dieser Klassifikation die Methoden zur wissenschaftlichen Einschätzung von Evidenz der „*Canadian and U.S. Preventative Task Force*“ dienten. Die relevanten Entscheidungskriterien wurden im Konsens in dem erstellten Behandlungspfad binär definiert und die entsprechenden Prozeduren für die Diagnostik prioritätenorientiert bewertet. Als Darstellungsform wurde ein modifiziertes Flussdiagramm gewählt, um trotz der Komplexität Checklisten einarbeiten zu können und gleichzeitig eine ausreichende Übersicht zu gewährleisten. Gleichzeitig sollten Kolleg*innen die Möglichkeit erhalten, das Flussdiagramm aktiv zu nutzen, Entscheidungspfade nachvollziehen und sich entsprechende Handlungsabläufe erarbeiten zu können.

Ergebnisse:

Es wurde erstmal in der Literatur ein Handlungsalgorithmus entwickelt, welcher es sowohl erfahrenen als auch unerfahrenen Kollegen im Rahmen einer klar verständlichen und strukturierten Anleitung möglich macht, akute Rückenschmerzen ohne Trauma stringent zu diagnostizieren und zu behandeln, ohne mögliche gravierende Pathologien zu übersehen oder gleichzeitig eine nicht-notwendige Überdiagnostik zu initiieren.

Schlussfolgerung:

Durch den anhand der aktuellen Evidenzlage erarbeiteten, strukturierten Handlungsalgorithmus wurden und werden auch im Rahmen der orthopädisch-unfallchirurgischen Notfall- Evaluation in der Primärdiagnostik internistische Differentialdiagnosen berücksichtigt, Notallsituationen erkannt und diagnostisch sowie therapeutisch sinnvolle Schritte eingeleitet. Die primäre Auswertung der Behandlung konnte im Vergleich zu den Vorjahren sowohl eine Reduktion von nicht notwendiger Bildgebung als auch vor allem die Diagnosestellung schwerwiegender internistischer Erkrankungen wie Myokardinfarkte, Aortenaneurysmen und Lungenembolien bestätigen.

3.2. Entwicklung von Verfahrens-Metriken für die Durchführung einer minimal-invasiven Laminotomie zur bilateralen Dekompression einer Spinalkanalstenose

Melcher C, Korge A, Cunningham M, Foley KT, Härtl R (2020)

Metrics Development for Minimal Invasive Unilateral Laminotomy for Bilateral Decompression of Lumbar Spinal Stenosis with and without Spondylolisthesis by an International Expert Panel. Global Spine J. 2020 Apr;10(2 Suppl):168S-175S.

Hintergrund:

Die chirurgische Ausbildung soll es grundsätzlich ermöglichen, theoretisches und praktisches Wissen zu erwerben, um einen bestimmten chirurgischen Eingriff sicher durchzuführen. Gleichzeitig differiert die wirbelsäulenchirurgische Ausbildung nicht nur an der Wirbelsäule zwischen Fachdisziplinen und Ländern, sondern bereits zwischen Krankenhäusern. Oftmals fehlen für den/die junge(n) Assistenzarzt/-ärztin nachvollziehbare Schritt-für-Schritt-Anleitungen, um komplexe Operationen auch außerhalb des häufig anstrengenden OP-Umfeldes des OPs nachvollziehen zu können. Der Ausbildungsstandard in neurochirurgischen und orthopädischen Kliniken beruht meist auf OP- Anleitung durch Vorgesetzte sowie Cadaver-Training. Zudem bleibt das Assessment der Ausbildung und der erworbenen Kompetenz .

Ziel der hier vorgestellten Studie, welche während des Aufenthaltes im Department of Neurological Surgery and Comprehensive Spinal Care des New York Presbyterian Hospital im Rahmen des AO-Mentorship- Programms entstand, war es, eine Referenzoperation zu bestimmen, deren notwendige Schritte und möglichen Fehler zu definieren und diese in einem Expertenkonsensus zu bestätigen.

Material und Methoden:

Mit der unilateralen Laminotomie zur bilateralen Dekompression wurde eine Standardoperation an der lumbalen Wirbelsäule gewählt und eine „Expert-Group“, bestehend aus drei international renommierten Wirbelsäulenexperten (zwei Neurochirurgen und ein Orthopäde) mit Unterstützung eines Bildungsexperten eingesetzt, um die „Metrics“ der Operation, also die für das Vorgehen notwendigen Phasen, Schritte sowie Fehler zu definieren. Hierbei stellen sich die Begriffe wie folgt dar:

- „Metric“: Ein Messstandard für quantitative und objektive Bewertungen, Vergleiche und Leistungsevaluation

- „*Procedure Phase*“: Eine Gruppe von miteinander verbundenen Ereignissen, die in Kombination ein operatives Verfahren abbilden
- „*Step*“: Eine Teilaufgabe, durch deren Abschluss ein Teilergebnis erreicht wird
- „*Error*“: Eine Abweichung vom optimalen Vorgehen
- „*Sentinel Error*“: Eine schwerwiegende Abweichung vom optimalen Vorgehen (Risiko für das Gelingen der Operation und/oder den Patienten)

Um einen allgemein gültigen Standard festzulegen, wurden zusätzlich zu der Definition innerhalb der Gruppe, Youtube, VuMedi und Journals nach Videos durchsucht, die das OP-Vorgehen beschreiben und 22 Videos einer minimal-invasiven Dekompression bezüglich des Vorkommens der *Metrics* analysiert.

Im Anschluss führten alle Experten zwei Dekompressionen an einem High-fidelity- Simulator durch und wurden dabei anhand der definierten *Metrics* bewertet, um das theoretische Step-by-Step-Modell in eine praktische OP-Anleitung zu überführen.

Procedure Phase	Name	Begins and Ends	
I	Starting point, skin incision, and access	Begins	Preparation phase above has been completed
		Ends	Retractor positioned on bone in correct level
II	Identification of ipsilateral hemilamina, ipsilateral hemilaminotomy, and identification of ligamentum flavum	Begins	Surgeon ready to identify lamina
		Ends	The ligamentum flavum has been identified
III	Flavectomy	Begins	Phase II completed
		Ends	Central portion of ipsilateral ligamentum flavum has been removed
IV	Complete ipsilateral decompression	Begins	Ipsilateral medial flavum has been removed
		Ends	Lateral recess is opened
V	Contralateral hemilaminotomy	Begins	Ready to start contralateral decompression
		Ends	Contralateral decompression and flavectomy performed
VI	Hemostasis and closure	Begins	Hemilaminotomies have been performed
		Ends	Hemostasis applied and wound closed

Abbildung 2: Definition der Phasen mit Start- und Endpunkten

Ergebnisse:

Am Ende der Expertenphase wurden 6 Phasen, 41 „Steps“, 21 „Errors“ und 16 „Sentinel errors“ definiert. Diese wurden 26 unabhängigen Wirbelsäulenchirurgen aus 14 Ländern in einem modifizierten Delphi-Panel vorgelegt, welche im Konsens abschließend 6 Phasen, 41 Steps, 21 errors und 17 sentinel errors definierten.

IV	Complete ipsilateral decompression			Time taken:
<i>Start</i>	<i>Ipsilateral medial flavum has been removed</i>	Step	Error	Start time:
22	Study preop MRI in sagittal and/or axial view in order to determine how far caudally the decompression has to be extended.			
23	Extend decompression toward ipsilateral (if using a tube adequate wanding of the tube is necessary)			
24	Thin out bone with drill and remove with 45° or 90° Kerrison until the lateral edge of the dura is identified (Avoid injury to pars inf.)			
25	Work caudally to at least half of the ipsilateral L5 pedicle (check sagittal MRI). Remove a few mm bone of the upper part of L5			
26	Identify the medial wall of the ipsilateral L5 pedicle with the ball tip			
27	Identify the lateral edge of the dural sac to confirm opening of lateral recess			
28	Inspect disc by medializing dura with ball tip or dissector and determine if discectomy should be performed			
<i>End</i>	<i>Lateral recess is opened</i>			Finish time:

Abbildung 3: Die Metrics von Phase 4 als Beispiel (Melcher, Korge, Cunningham, Foley, & Hartl, 2020)

Schlussfolgerung:

Eine Standardoperation lässt sich durch die Verwendung von Verfahrensmetriken in unterschiedliche Phasen und Schritte einteilen, deren mögliche Fehler definiert werden können, um eine schrittweise Handlungs- und OP- Anweisung zu verfassen, an deren Beispiel die ideale Operationsdurchführung gelingen kann.

3.3. Die Verwendung eines High-Fidelity Training Simulators für die minimal Invasive lumbale Dekompression erhöht das operative Verständnis sowie die technischen Fähigkeiten von orthopädischen und neurochirurgischen Assistenten

Melcher C, Hussain I, Kirnaz S, Goldberg JL, Sommer F, Navarro-Ramirez R, Medary B, Härtl R. 2022

Use of a High-Fidelity Training Simulator for Minimally Invasive Lumbar Decompression Increases Working Knowledge and Technical Skills Among Orthopedic and Neurosurgical Trainees. Global Spine J.2022. Feb 28:21925682221076044.

Hintergrund:

Simulation kann, gerade in chirurgischen Fächern, die Ausbildung komplementieren, da mit den Modellen inzwischen Anatomie so nachgebildet wird, dass sie nicht nur der Realität entspricht, sondern auch ein entsprechendes taktiles Feedback gibt. So können sowohl klassische Operationen als auch Komplikationsszenarien erlernt werden, bevor Operationen an Patienten durchgeführt werden. In diversen medizinischen Subspezialitäten wie Thoraxchirurgie, Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie (MKG) und Anästhesie werden Simulatoren bereits seit vielen Jahren verwendet. Jedoch existierte in der spinalen Chirurgie bis vor wenigen Jahren kein Modell, welches realistisch sowohl Weichgewebe als auch Knochen nachbilden und Blutungen sowie Duraläsionen analog zum operativen Situs simulieren konnte.

Material und Methoden:

Im Rahmen einer prospektiven, vergleichenden Studie an zwei Zentren, eines in den USA (Neurochirurgie) und eines in Deutschland (Orthopädie) führten sechs Assistenzärzte jedes Zentrums drei Dekompressionsoperationen am Simulator (Realist) anhand der zuvor definierten und bereits im Vorfeld vorgestellten Metrics für die minimalinvasive unilaterale Laminotomie für die bilaterale Dekompression (ULBD) durch. Die Lernkurve der Probanden wurde anhand der technischen Fähigkeiten, der OP-Zeit, der ausgelassenen Schritte sowie der „Errors“ und "Sentinel errors“ bewertet und durch „Instructor und Personal surveys“ sowie eine „Gap analysis“ evaluiert. Die Videoaufnahmen aller Operationen wurden verblindet und von drei unabhängigen Experten anhand eines modifizierten „global rating scales“ und einer „video specific checklist“ bewertet.

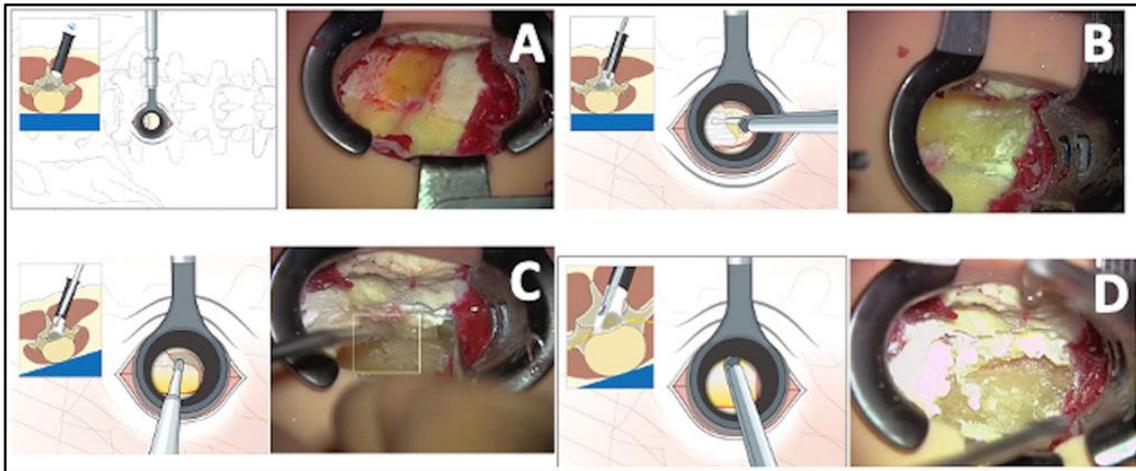


Abbildung 4: Schematische and intraoperative Darstellung des high-fidelity Simulators (Melcher, Hussain, et al., 2022)

Ergebnisse:

Insgesamt konnte eine signifikante Verbesserung aller Teilnehmer in allen untersuchten Kategorien nachgewiesen werden. So reduzierte sich die Operationszeit im Mittel von 72.1 Minuten (43-130 Minuten) in der 1. Operation auf 40.4 Minuten (27-70 Minuten) in der 3. Operation. Zudem zeigte sich eine deutliche Reduktion der ausgelassenen Schritte sowie der aufgezeichneten „errors“ und „sentinel errors“, wobei offensichtlich wurde, dass immer wieder die gleichen Fehler wiederholt und die gleichen Schritte ausgelassen wurden.

Im Vergleich der Ergebnisse des „Instructor surveys“ des 1. und 3. Eingriffs zeigte sich eine durchschnittliche Verbesserung des Ergebnisses um 25,8% (7-50%).

Die Verbesserung war am deutlichsten in der Gruppe der sehr unerfahrenen (< 1 Jahr) und unerfahrenen (1-3 Jahre) Assistent*innen, aber auch bei den sehr erfahrenen Assistent*innen (4-6 Jahre) nachweisbar.

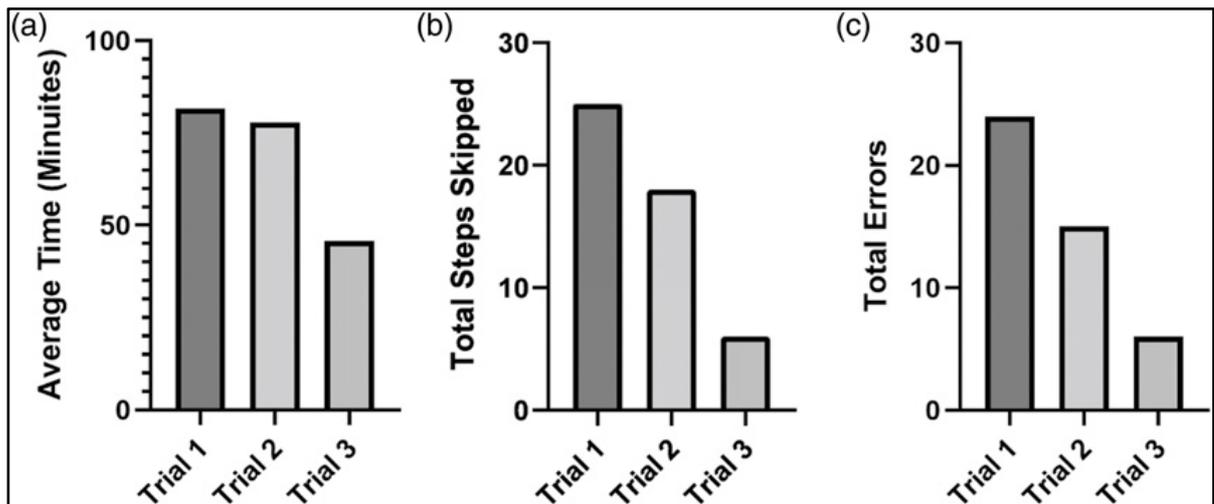


Abbildung 5: Reduktion der durchschnittlichen OP- Zeit (A), der ausgelassenen Schritte (B) sowie der Fehler (C) im Rahmen der 3 Operationen (Melcher, Hussain, et al., 2022)

Auch die Selbsteinschätzung der Assistent*innen veränderte sich im Verlauf der Operationen maßgeblich. So zeigte sich im Vergleich der 1. und 3. Operation eine Reduktion der Diskrepanz zwischen aktueller und erwünschter Performance von 46.16% (13.3-81.8%).

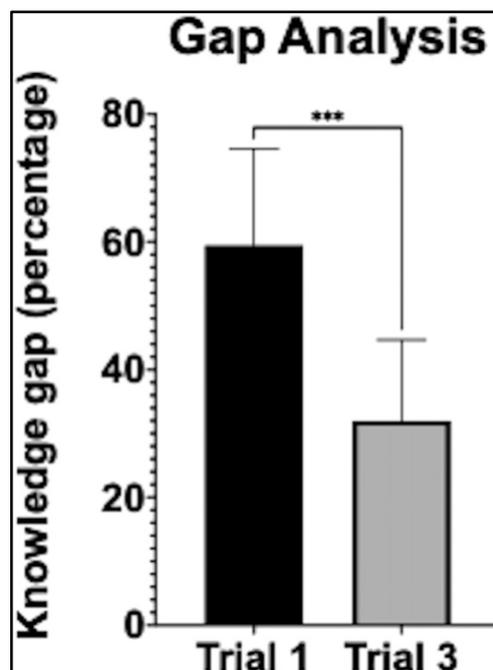


Abbildung 6: Die Wissenslücke aller Teilnehmer reduzierte sich zwischen der 1. und 3. Operation signifikant (Melcher, Hussain, et al., 2022)

Schlussfolgerung:

Somit lässt sich schlussfolgern, dass Verfahrensmetriken in Kombination mit Simulationsmodellen in der Zukunft eine Verbesserung der Fähigkeiten und Beschleunigung der Lernkurve in der chirurgischen Ausbildung bewirken können.

3.4. Ein- und eine halbe Fusion- Unisegmentale TLIF- Fusion mit Dekompression des Anschlusssegmentes mittels unilateraler Laminotomie zur bilateralen Dekompression bei Spondylolisthesis mit bisegmentaler Stenose

Wipplinger C*, Melcher C*, Hernandez RN, Lener S, Navarro-Ramirez R, Kirnaz S, Schmidt FA, Kim E, Härtl R.

One and a half" minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: single level transforaminal lumbar interbody fusion with adjacent segment unilateral laminotomy for bilateral decompression for spondylolisthesis with bisegmental stenosis. J Spine Surg. 2018 Dec;4(4):780-786.

* geteilte Erstautorenschaft

Hintergrund:

Die degenerative lumbale Spondylolisthesis ist oft mit einer uni- oder mehrsegmentalen lumbalen Spinalkanalstenose der angrenzenden Segmente assoziiert. Traditionell erfolgte in solchen Fällen eine offene Dekompression, an welche eine mehrstufige Fusion angeschlossen wurde (Herkowitz & Kurz, 1991; Weinstein et al., 2007). In den vergangenen Jahren wurde jedoch postuliert, dass eine unisegmentale Fusion des instabilen, gefolgt von einer Dekompression des benachbarten Segments ohne Fusion bei deutlich geringer Invasivität eine mögliche und erfolgreiche Behandlungsmöglichkeit darstellt (Smorgick et al., 2013). In den letzten zwei Jahrzehnten hat die minimal-invasive Chirurgie aufgrund diverser Vorteile (weniger Muskeltrauma, geringerer Blutverlust und reduzierte Krankenhausaufenthaltszeiten) an Popularität gewonnen.

1997 wurde von Foley und Smith primär die tubuläre Diskektomie etabliert und im Folgenden an verschiedene Verfahren in der Wirbelsäulenchirurgie (Dekompression, Fusion) angepasst (Boukebir et al., 2017; Foley, Smith, & Rampersaud, 1999; Lian et al., 2016).

Das Management einer monosegmentalen Instabilität mit Spinalkanalstenose im Anschlusssegment bleibt jedoch weiterhin ein umstrittenes Thema. Multilevel-Fusionen haben durch den erhöhten biomechanischen Stress nachgewiesenermaßen einen negativen Einfluss auf die an die Fusion angrenzenden Wirbelsäulensegmente, der zu einer Degeneration der Anschlusssegmente führen kann (Aiki et al., 2005). Andererseits kann eine Dekompression ohne Fusion im Anschluss an ein fusioniertes Segment mit Instabilität und Versagen einhergehen (Cardoso et al., 2008; Hopp & Tsou, 1988). #

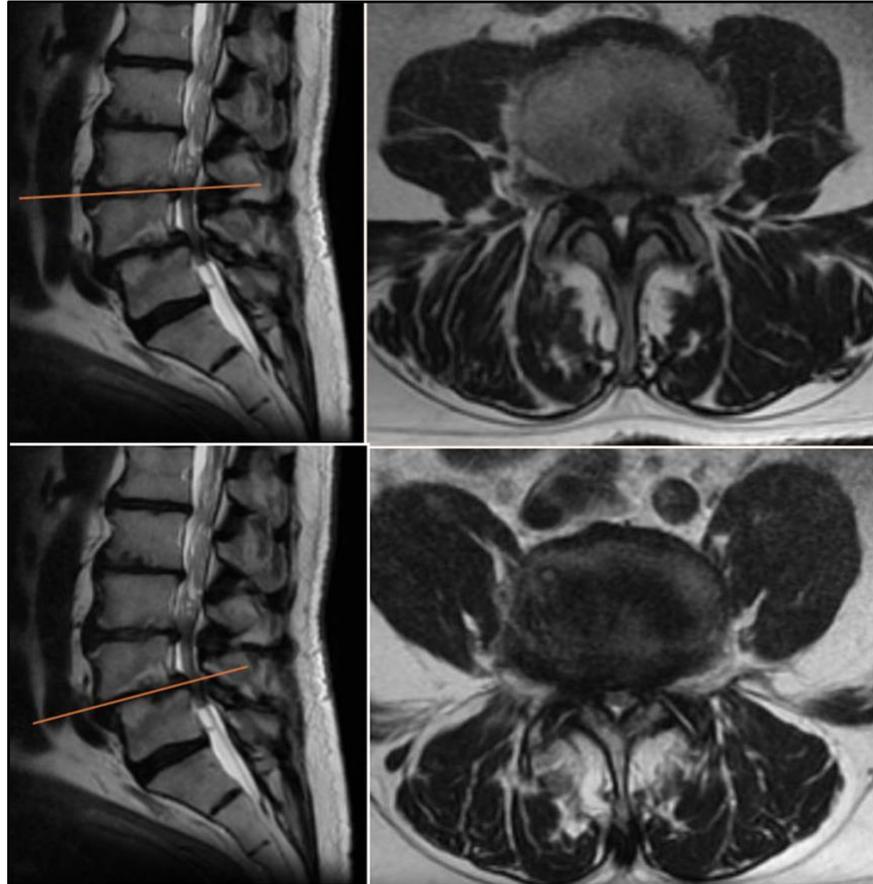


Abbildung 7: Degenerative Spondyloisthesis L4/5 und kraniale Spinalkanalstenose L3/4 (Wipplinger et al., 2018)

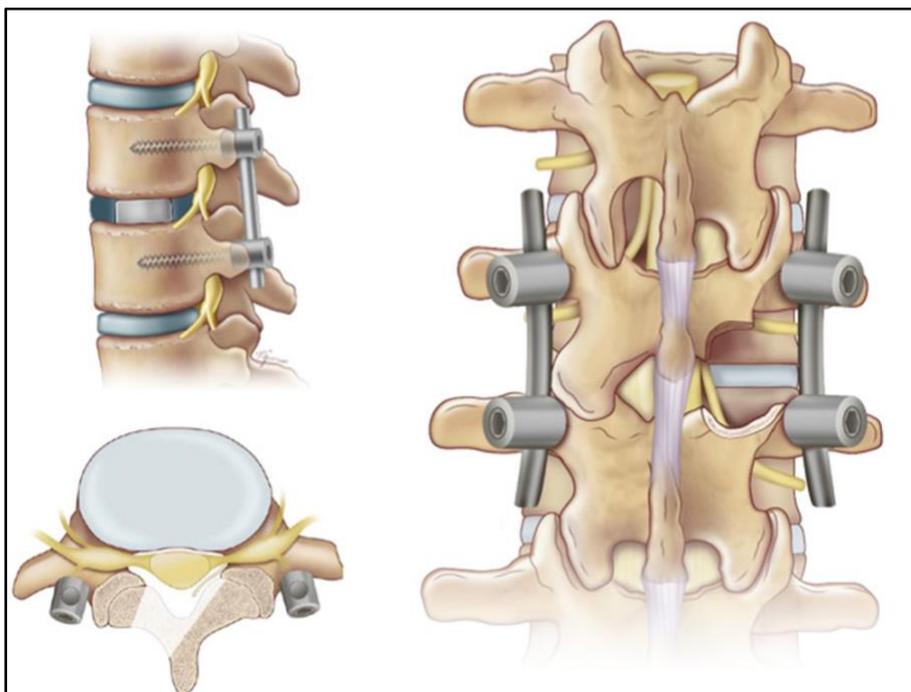


Abbildung 8: Anatomische Darstellung der Operationstechnik (Wipplinger et al., 2018)

Ergebnisse:

Biomechanische Studien zeigten, dass eine einseitige Laminotomie zur bilateralen Dekompression (ULBD) des angrenzenden Segments unter Erhalt beider Facettengelenke signifikant weniger Mikro-Instabilitäten verursacht als eine herkömmliche offene Laminektomie. Dieses Verfahren wurde erfolgreich in die Klinik übernommen.

Schlussfolgerung:

Im Rahmen der biomechanischen und klinischen Evaluation zeigte sich, dass eine kalkulierte, unilaterale over the top Dekompression eine Versorgungsalternative bei Spinalkanalstenosen im Anschlusssegment an eine Osteochondrose darstellt, da die Stabilität des Segmentes erhalten bleibt.

3.5. Die lumbale Spinalkanalstenose – Ist das chirurgische Ergebnis und die Gefahr einer Revision allein vom Chirurgen abhängig?

Melcher C, Paulus AC, Roßbach BP, Gülecyüz MF, Birkenmaier C, Schulze-Pellengahr CV, Teske W, Wegener B.

Lumbar spinal stenosis – surgical outcome and the odds of revision-surgery – is it all due to the surgeon? Technol Health Care. 2022;30(6):1423-1434.

Hintergrund:

Die chirurgische Dekompression ist das therapeutische Mittel der Wahl, wenn konservative Behandlungsmöglichkeiten der Spinalkanalstenose ausgeschöpft sind oder frustan verblieben. Im Rahmen der Versorgung müssen neben perioperativen Komplikationen wie epiduralen Hämatomen oder Infektionen auch Re-Stenosen des Indexsegmentes oder Anschlusssegmentdegenerationen beherrscht werden. Vor allem die Versorgung von Spinalkanalstenosen mit degenerativen Veränderungen der Bandscheiben des Anschlusssegmentes wird in diesem Rahmen äußerst kontrovers diskutiert.

Material und Methoden:

Alle Patient*innen, die zwischen 2000 und 2011 in der orthopädischen Klinik der LMU München bei einer lumbalen Spinalkanalstenose (LSS) entweder mit einer Dekompression oder Dekompression und Fusion versorgt wurden, wurden in die Studie eingeschlossen. Neben prä- und postoperativen Röntgenbildern wurden demographische Daten sowie mögliche Risikofaktoren erfasst und das klinische Ergebnis mittels der „*Numeric rating scale (NRS)*“, eines adaptierten deutschen „*Spinal Stenosis Measure (SSM)*“ und der subjektiven Gehfähigkeit analysiert.

Ergebnisse:

Insgesamt wurden 438 Patient*innen in die Studie eingeschlossen, von denen 338 mittels Dekompression allein und 100 mittels Dekompression und Fusion versorgt wurden.

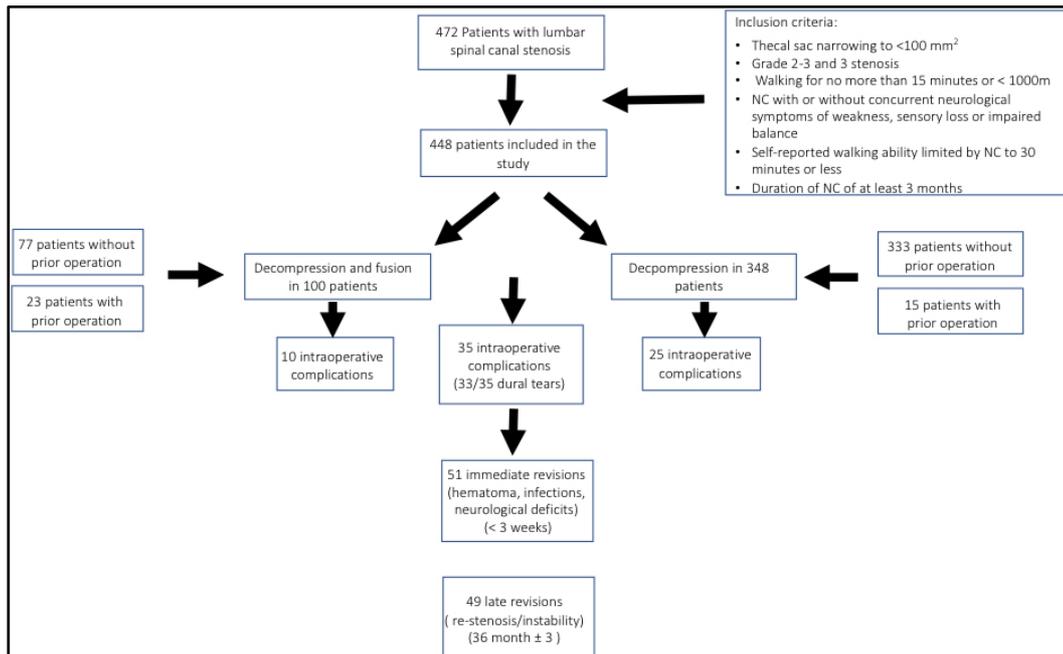


Abbildung 9: Einschlusskriterien und Komplikationen sowie Revisionen

In der genaueren Evaluation der Revisionen, die nach Auftreten in intraoperative Komplikationen sowie frühe und späte Revisionen unterteilt wurden, traten 35 intraoperative Komplikationen (Duraleck 33/35) auf, welche direkt versorgt wurden. Zudem wurden 51 Revisionen als unmittelbare Folge der Primäroperation (Infektionen, neurologische Defizite, Hämatome) sowie 49 späte (> 36 Monate) Revisionen aufgrund von Re-Stenosen oder Instabilitäten definiert. In dieser primären Referenzgruppe der späten Revision konnte kein Nachweis auf Prädiktoren für Re-Stenosen, Instabilitäten oder Anschlusssegmentdegenerationen geführt werden.

Auch konnten in keiner der Gruppen signifikanten Unterschiede der demografischen, perioperativen oder radiologischen Daten von Patienten mit oder ohne Revision herausgearbeitet werden. Überraschenderweise zeigten sich jedoch hoch signifikante Unterschiede in der Verteilung der intra- und frühpostoperativen Komplikationen der 6 Hauptoperateure, welche in der initialen Indexgruppe der Spätrevisionen nicht auffällig waren.

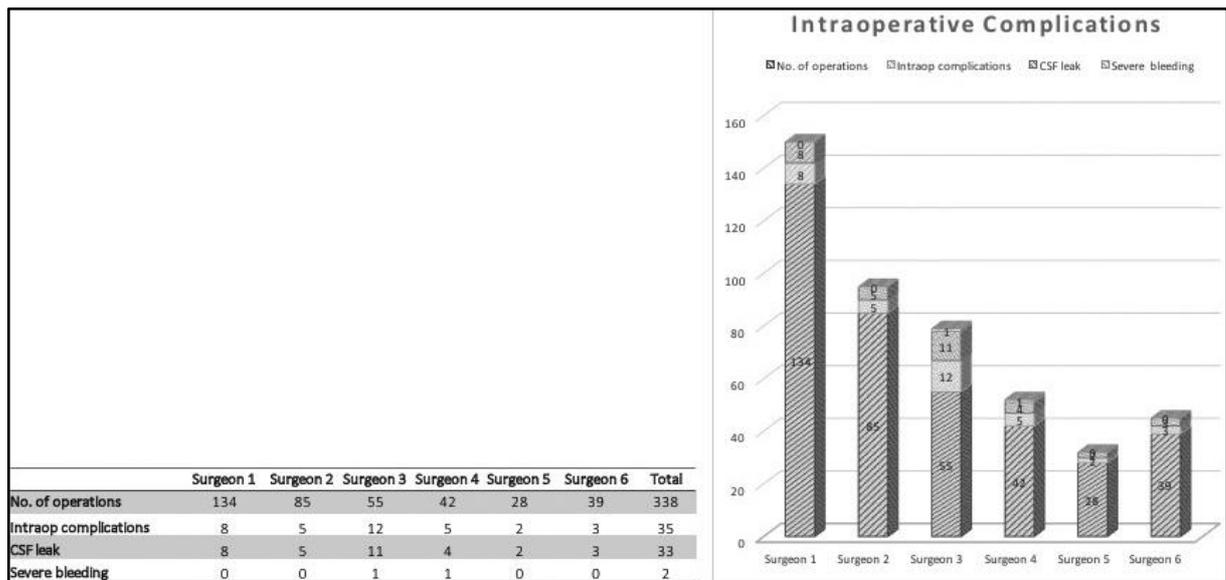


Abbildung 10: Relation der intraoperativen Komplikationen (nach Hauptoperateuren) (Melcher, Paulus, et al., 2022)

Schlussfolgerung:

Unsere Ergebnisse decken sich im Vergleich mit anderen Studien dahingehend, dass Revisionen aufgrund von Re-Stenosen des Index- oder der Anschlusssegmente sowie Instabilitäten nicht anhand der demographischen Daten und des Risikoprofils des Patienten abzuschätzen sind. Im Rahmen unserer Studie wurde jedoch erstmals die Abhängigkeit des Outcomes vom Chirurg*in und damit der individuelle Faktor untersucht. Hier zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Spätkomplikationen wie Re-Stenosen oder Segmentinstabilitäten, jedoch eine eindeutige und signifikante individuelle Korrelation von Revisionseingriffen aufgrund intraoperativer Komplikationen. Im Rahmen der Aufarbeitung konnte diese einerseits mit dem Ausbildungsstand des Chirurgen/der Chirurgin korreliert werden, jedoch muss auch eine eindeutige Abhängigkeit von den allgemeinen operativen Fertigkeiten und dem entsprechenden intraoperativen Vorgehen postuliert werden.

4. Zusammenfassung, Beantwortung der gestellten Fragen und Ausblick in die Zukunft

Die Ergebnisse der dargestellten Arbeiten evaluieren einerseits Strategien in der Diagnostik der häufigen lumbalen Schmerzsymptomatik und zeigen andererseits auch Optionen zur Verbesserung der Behandlungsqualität durch neue Ausbildungskonzepte im Rahmen der Facharztweiterbildung auf.

Entsprechend lässt sich die Fragestellung der vorliegenden Arbeit wie folgt beantworten:

Ist es möglich, die Diagnostik lumbaler Pathologien zu vereinfachen und die Behandlung entsprechend zu verbessern?

In unserer Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass klare und strukturierte Handlungsanweisungen die Diagnostik lumbaler Pathologien vereinfachen, Überdiagnostik zu vermeiden und gleichzeitig schwerwiegende Pathologien auch interdisziplinär diagnostiziert werden können. Bisher fehlte jedoch ein klarer Algorithmus, der übersichtlich Abläufe darstellte und Entscheidungshilfen anbot. Diese Lücke konnte mit dem entwickelten Algorithmus geschlossen werden.

Kann die operative Behandlung der Spinalkanalstenose in Behandlungs-Metriken zusammengefasst und so ein operativer Leitfaden erstellt werden?

Durch die Expertengruppe wurde anhand der individuellen Erfahrung und der gängigen Literatur eine Anleitung zur operativen Versorgung der lumbalen Spinalkanalstenose erstellt und auf ihre Praktikabilität untersucht. Um eine allgemein gültige OP- Anleitung zu schaffen, wurde diese abschließend einem internationalen Panel von Wirbelsäulenchirurgen vorgelegt, welche das Vorgehen im Konsens in einem abgewandelten Delphi-Panel bestätigte. Entsprechend entstand erstmals ein strukturierter operativer Leitfaden für eine der Standardoperationen in der Wirbelsäulenchirurgie, welcher sowohl die notwendigen Schritte für einen idealen Ablauf beinhaltet, als auch mögliche Fehler beleuchtet.

Kann ein solcher Leitfaden unter zusätzlicher Unterstützung eines realitätsnahen Simulators die operative Performance von erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen bei Wirbelsäulenoperationen verbessern?

Die Studienergebnisse konnten zeigen, dass die Verwendung von Verfahrensmetriken in Kombination mit einem realitätsnahen Simulator zu einer Verbesserung der operativen Performance des Operateurs/der Operateurin (OP- Zeit, ausgelassene OP- Schritte, Fehler) führt, was sowohl bei erfahrenen als auch vor allem bei unerfahrenen Chirurgen nachweisbar ist. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass klar strukturierten Handlungsabläufe sowohl die Qualität der chirurgischen Ausbildung im Allgemeinen als auch des individuellen chirurgischen Könnens verbessern können. Werden diese in Kombination mit einem realitätsnahen Simulator eingesetzt, können Interventionen und deren mögliche Komplikationen unter sicheren und gleichzeitig realitätsnahen Bedingungen trainiert und die Patientenversorgung verbessert werden.

Welche Merkmale entscheiden über das Outcome von lumbalen Dekompressionsoperationen und sind Komplikationen vorhersagbar?

Bezüglich der klassischen Spätkomplikationen wie Re-Stenosen oder Instabilitäten sind bei adäquater Indikationsstellung und Operationsdurchführung bisher keine Indikatoren oder Risikofaktoren zu definieren, um diese vorauszusagen. Entscheiden bleibt also neben der richtigen Indikation die Ausbildung und Sorgfalt des Chirurgen/der Chirurgin. Dies lässt jedoch auch den Rückschluss zu, dass durch falsche Indikationsstellung und Fehler in der Operationsdurchführung Komplikationen auftreten, die vermeidbar gewesen wären und möglicherweise schwerwiegende Konsequenzen für den Patienten haben können. Hier zeigt sich nochmals die immense Wichtigkeit einer klar strukturierten chirurgischen Aus- und Weiterbildung, die gerade in Zeiten zunehmend straffer Zeitpläne und reduzierter personeller Ressourcen alle zur Verfügung stehenden Mittel nutzen sollte. Die Möglichkeiten des individuellen Verbesserungspotentials auf unterschiedlichen Ausbildungsniveaus wurde im Rahmen der bereits im Vorfeld vorgestellten Studien gezeigt.

Ist es möglich, die Komplikationen durch die Verwendung unterschiedlicher Techniken zu reduzieren?

Möglichkeiten der Fehlerreduktion stellen die Verbesserung der Ausbildung mit repetitiven Eingriffen dar. Gerade die Adaptation neuer, auch minimal- invasiver Techniken oder eines Vorgehens, das bisher nicht zum Repertoire gehörte, kann im Rahmen von Kursen, auch unter Verwendung von Metriken und Simulation in einem sicheren Umfeld erlernt werden. Dies ist wichtig, um das Outcome für den Patienten bei spezifischen Verfahren zu optimieren und kann gleichzeitig genutzt werden, um das eigene Spektrum zu erweitern. Ein entsprechend breiteres Spektrum kann wiederum eine verbesserte Indikationsstellung initiieren, da Pathologien neu bewertet und gegebenenfalls anders betrachtet und behandelt werden. Gerade unter dem vorherrschenden zeitlichen, ökonomischen und medico-legalen Druck, dem Krankenhäuser unterliegen, werden so andernorts wichtige Möglichkeiten geschaffen.

5. Literaturverzeichnis

- Aiki, H., Ohwada, O., Kobayashi, H., Hayakawa, M., Kawaguchi, S., Takebayashi, T., & Yamashita, T. (2005). Adjacent segment stenosis after lumbar fusion requiring second operation. *J Orthop Sci*, *10*(5), 490-495. doi:10.1007/s00776-005-0919-3
- Airaksinen, O., Brox, J. I., Cedraschi, C., Hildebrandt, J., Klüber-Moffett, J., Kovacs, F., . . . Pain, C. B. W. G. o. G. f. C. L. B. (2006). Chapter 4. European guidelines for the management of chronic nonspecific low back pain. *Eur Spine J*, *15 Suppl 2*, S192-300. doi:10.1007/s00586-006-1072-1
- Ammendolia, C., et al. (2013). Nonoperative treatment for lumbar spinal stenosis with neurogenic claudication. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Amundsen, T., Weber, H., Nordal, H. J., Magnaes, B., Abdelnoor, M., & Lilleas, F. (2000). Lumbar spinal stenosis: conservative or surgical management?: A prospective 10-year study. *Spine (Phila Pa 1976)*, *25*(11), 1424-1435; discussion 1435-1426. doi:10.1097/00007632-200006010-00016
- Bakker, E. W., Verhagen, A. P., Lucas, C., Koning, H. J., de Haan, R. J., & Koes, B. W. (2007). Daily spinal mechanical loading as a risk factor for acute non-specific low back pain: a case-control study using the 24-Hour Schedule. *Eur Spine J*, *16*(1), 107-113. doi:10.1007/s00586-006-0111-2
- Bardin, L. D., King, P., & Maher, C. G. (2017). Diagnostic triage for low back pain: a practical approach for primary care. *Med J Aust*, *206*(6), 268-273. doi:10.5694/mja16.00828
- Benditz, A., & Grifka, J. (2019). [Lumbar spinal stenosis : From the diagnosis to the correct treatment]. *Orthopäde*, *48*(2), 179-192. doi:10.1007/s00132-018-03685-3
- Benditz, A., Sprenger, S., Rauch, L., Weber, M., Grifka, J., & Straub, R. H. (2019). Increased pain and sensory hyperinnervation of the ligamentum flavum in patients with lumbar spinal stenosis. *J Orthop Res*, *37*(3), 737-743. doi:10.1002/jor.24251
- Benini, A. (1997). [Stenosis of the lumbar spinal canal. Pathophysiology, clinical aspects and therapy]. *Orthopäde*, *26*(5), 503-514. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9312710>
- Bork, H. (2017). Nicht spezifischer Rückenschmerz. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*, *12*(06), 625-641. doi: 10.1055/s-0043-109519
- Boukebir, M. A., Berlin, C. D., Navarro-Ramirez, R., Heiland, T., Scholler, K., Rawanduzy, C., . . . Hartl, R. (2017). Ten-Step Minimally Invasive Spine Lumbar Decompression and Dural Repair Through Tubular Retractors. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, *13*(2), 232-245. doi:10.1227/NEU.0000000000001407
- Bundesärztekammer (BÄK), K. B. K., Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). (2017). Nationale VersorgungsLeitlinie Nicht-spezifischer Kreuzschmerz – Kurzfassung. [www.leitlinien.de/mdb/downloads/nvl/kreuzschmerz/kreuzschmerz-1aufl-vers5-lang.pdf]. 2. Auflage. Version 1. doi:DOI: 10.6101/AZQ/000377.
- Cannon, W. D., Garrett, W. E., Jr., Hunter, R. E., Sweeney, H. J., Eckhoff, D. G., Nicandri, G. T., . . . Reinig, K. D. (2014). Improving residency training in arthroscopic knee surgery with use of a virtual-reality simulator. A randomized blinded study. *J Bone Joint Surg Am*, *96*(21), 1798-1806. doi:10.2106/JBJS.N.00058
- Cardoso, M. J., Dmitriev, A. E., Helgeson, M., Lehman, R. A., Kuklo, T. R., & Rosner, M. K. (2008). Does superior-segment facet violation or laminectomy destabilize the adjacent level in lumbar transpedicular fixation? An in vitro human cadaveric assessment. *Spine (Phila Pa 1976)*, *33*(26), 2868-2873. doi:10.1097/BRS.0b013e31818c63d3
- Casser, H.-R., Seddigh, S., & Rauschmann, M. (2016). Akuter lumbaler Rückenschmerz. *Dtsch Arztebl International*, *113*(13), 223-234. Retrieved from <https://www.aerzteblatt.de/int/article.asp?id=175568>
- Costa da, C. M., L., Maher, C. G., Hancock, M. J., McAuley, J. H., Herbert, R. D., & Costa, L. O. (2012). The prognosis of acute and persistent low-back pain: a meta-analysis. *CMAJ*, *184*(11), E613-624. doi:10.1503/cmaj.111271

- Deutsche Gesellschaft für Allgemeinmedizin und Familienmedizin, D. (2003). Kreuzschmerzen. (DEGAM-Leitlinie; 3).
- Deyo, R. A., & Weinstein, J. N. (2001). Low back pain. *N Engl J Med*, 344(5), 363-370. doi:10.1056/nejm200102013440508
- Diemer, W. B., H. (2002). Chronische Schmerzen- Kopf- und Rückenschmerzen, Tumorschmerzen. Gesundheitsberichtserstattung des Bundes. . Verlag Robert Koch Institut und Statistisches Bundesamt., Vol.7.
- Domhan, L., Johannink, J., Miller, J., Steger, V., Linder, A., Kirschniak, A., & Wilhelm, P. (2020). TuThor: an innovative new training model for video-assisted thoracic surgery. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 30(3), 477-482. doi:10.1093/icvts/ivz270
- Dunn, K. M., Hestbaek, L., & Cassidy, J. D. (2013). Low back pain across the life course. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 27(5), 591-600. doi:10.1016/j.berh.2013.09.007
- Foley, K. T., Smith, M. M., & Rampersaud, Y. R. (1999). Microendoscopic approach to far-lateral lumbar disc herniation. *Neurosurg Focus*, 7(5), e5. doi:10.3171/foc.1999.7.6.6
- Genevay, S., & Atlas, S. J. (2010). Lumbar spinal stenosis. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 24(2), 253-265. doi:10.1016/j.berh.2009.11.001
- Henschke, N., Maher, C. G., Refshauge, K. M., Herbert, R. D., Cumming, R. G., Bleasel, J., . . . McAuley, J. H. (2009). Prevalence of and screening for serious spinal pathology in patients presenting to primary care settings with acute low back pain. *Arthritis Rheum*, 60(10), 3072-3080. doi:10.1002/art.24853
- Herkowitz, H. N., & Kurz, L. T. (1991). Degenerative lumbar spondylolisthesis with spinal stenosis. A prospective study comparing decompression with decompression and intertransverse process arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am*, 73(6), 802-808. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2071615>
- Hestbaek, L., Korsholm, L., Leboeuf-Yde, C., & Kyvik, K. O. (2008). Does socioeconomic status in adolescence predict low back pain in adulthood? A repeated cross-sectional study of 4,771 Danish adolescents. *Eur Spine J*, 17(12), 1727-1734. doi:10.1007/s00586-008-0796-5
- Hopp, E., & Tsou, P. M. (1988). Postdecompression lumbar instability. *Clin Orthop Relat Res*, 227, 143-151. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2962798>
- Igawa, T., Katsuhira, J., Hosaka, A., Uchikoshi, K., Ishihara, S., & Matsudaira, K. (2018). Kinetic and kinematic variables affecting trunk flexion during level walking in patients with lumbar spinal stenosis. *PLOS ONE*, 13(5), e0197228. doi:10.1371/journal.pone.0197228
- Institut, R. K. (2007). Gesundheitsberichtserstattung des Bundes. Verlag Robert Koch Institut und Statistisches Bundesamt, 2nd Edition.
- Itz, C., Huygen, F., & Kleef, M. V. (2016). A proposal for the organization of the referral of patients with chronic non-specific low back pain. *Curr Med Res Opin*, 32(11), 1903-1909. doi:10.1080/03007995.2016.1220933
- Itz, C. J., Geurts, J. W., van Kleef, M., & Nelemans, P. (2013). Clinical course of non-specific low back pain: a systematic review of prospective cohort studies set in primary care. *Eur J Pain*, 17(1), 5-15. doi:10.1002/j.1532-2149.2012.00170.x
- Jäckel, W. H. (1998). Epidemiologie der Rückenschmerzen *Rheumatologie / Klinik der Gegenwart*, 11((8)).
- Jensen, R. K., Jensen, T. S., Koes, B., & Hartvigsen, J. (2020). Prevalence of lumbar spinal stenosis in general and clinical populations: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J*, 29(9), 2143-2163. doi:10.1007/s00586-020-06339-1
- Katz, J. N., Zimmerman, Z. E., Mass, H., & Makhni, M. C. (2022). Diagnosis and Management of Lumbar Spinal Stenosis: A Review. *Jama*, 327(17), 1688-1699. doi:10.1001/jama.2022.5921
- Koes, B. W., van Tulder, M. W., & Thomas, S. (2006). Diagnosis and treatment of low back pain. *BMJ*, 332(7555), 1430-1434. doi:10.1136/bmj.332.7555.1430
- Lange, C. (2011). Daten und Fakten: Ergebnisse der Studie "Gesundheit in Deutschland aktuell 2009". Berlin: Robert-Koch-Inst (Beiträge zur Gesundheitsberichterstattung des Bundes).

- Lian, X., Navarro-Ramirez, R., Berlin, C., Jada, A., Moriguchi, Y., Zhang, Q., & Hartl, R. (2016). Total 3D Airo(R) Navigation for Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion. *Biomed Res Int*, 2016, 5027340. doi:10.1155/2016/5027340
- Machado, G. C., Ferreira, P. H., Yoo, R. I., Harris, I. A., Pinheiro, M. B., Koes, B. W., . . . Ferreira, M. L. (2016). Surgical options for lumbar spinal stenosis. *Cochrane Database Syst Rev*, 11(11), Cd012421. doi:10.1002/14651858.Cd012421
- Machado, G. C., Rogan, E., & Maher, C. G. (2018). Managing non-serious low back pain in the emergency department: Time for a change? *Emerg Med Australas*, 30(2), 279-282. doi:10.1111/1742-6723.12903
- Maher, C., Underwood, M., & Buchbinder, R. (2017). Non-specific low back pain. *Lancet*, 389(10070), 736-747. doi:10.1016/S0140-6736(16)30970-9
- Malmivaara, A., Slatis, P., Heliovaara, M., Sainio, P., Kinnunen, H., Kankare, J., . . . Finnish Lumbar Spinal Research, G. (2007). Surgical or nonoperative treatment for lumbar spinal stenosis? A randomized controlled trial. *Spine (Phila Pa 1976)*, 32(1), 1-8. doi:10.1097/01.brs.0000251014.81875.6d
- Mehling, W. E., Gopisetty, V., Bartmess, E., Acree, M., Pressman, A., Goldberg, H., . . . Avins, A. L. (2012). The prognosis of acute low back pain in primary care in the United States: a 2-year prospective cohort study. *Spine (Phila Pa 1976)*, 37(8), 678-684. doi:10.1097/BRS.0b013e318230ab20
- Melcher, C., Hussain, I., Kirnaz, S., Goldberg, J. L., Sommer, F., Navarro-Ramirez, R., . . . Hartl, R. (2022). Use of a High-Fidelity Training Simulator for Minimally Invasive Lumbar Decompression Increases Working Knowledge and Technical Skills Among Orthopedic and Neurosurgical Trainees. *Global Spine J*, 21925682221076044. doi:10.1177/21925682221076044
- Melcher, C., Korge, A., Cunningham, M., Foley, K. T., & Hartl, R. (2020). Metrics Development for Minimal Invasive Unilateral Laminotomy for Bilateral Decompression of Lumbar Spinal Stenosis With and Without Spondylolisthesis by an International Expert Panel. *Global Spine J*, 10(2 Suppl), 168S-175S. doi:10.1177/2192568219893675
- Melcher, C., Paulus, A. C., Rossbach, B. P., Gulecyuz, M. F., Birkenmaier, C., Schulze-Pellengahr, C. V., . . . Wegener, B. (2022). Lumbar spinal stenosis - surgical outcome and the odds of revision-surgery: Is it all due to the surgeon? *Technol Health Care*, 30(6), 1423-1434. doi:10.3233/THC-223389
- Melcher, C., Wegener, B., Jansson, V., Mutschler, W., Kanz, K. G., & Birkenmaier, C. (2018). [Management of acute low back pain without trauma - an algorithm]. *Z Orthop Unfall*, 156(5), 554-560. doi:10.1055/a-0586-4815
- Miyamoto Jr, R. G., Klein, G. R., Walsh, M., & Zuckerman, J. D. (2007). Orthopedic surgery residents' study habits and performance on the orthopedic in-training examination. *Am J Orthop*, 36(12), E185-E188.
- Palter, V. N., & Grantcharov, T. P. (2014). Individualized deliberate practice on a virtual reality simulator improves technical performance of surgical novices in the operating room: a randomized controlled trial. *Ann Surg*, 259(3), 443-448. doi:10.1097/SLA.0000000000000254
- Pengel, L. H., Herbert, R. D., Maher, C. G., & Refshauge, K. M. (2003). Acute low back pain: systematic review of its prognosis. *BMJ*, 327(7410), 323. doi:10.1136/bmj.327.7410.323
- Pourtaheri, S., Sharma, A., Savage, J., Kalfas, I., Mroz, T. E., Benzel, E., & Steinmetz, M. P. (2017). Pelvic retroversion: a compensatory mechanism for lumbar stenosis. *J Neurosurg Spine*, 27(2), 137-144. doi:10.3171/2017.2.Spine16963
- Raspe, H. (2012). Themenheft 53 "Rückenschmerzen". In (pp. 36): Robert Koch-Institut.
- Reznick, R. K., & MacRae, H. (2006). Teaching surgical skills--changes in the wind. *N Engl J Med*, 355(25), 2664-2669. doi:10.1056/NEJMra054785
- Roche, T. R., Said, S., Braun, J., Maas, E. J. C., Machado, C., Grande, B., . . . Tscholl, D. W. (2021). Avatar-based patient monitoring in critical anaesthesia events: a randomised high-

- fidelity simulation study. *Br J Anaesth*, 126(5), 1046-1054. doi:10.1016/j.bja.2021.01.015
- Rudwaleit, M., & Marker-Hermann, E. (2012). [Management of nonspecific low back pain. The new national guidelines 2011]. *Z Rheumatol*, 71(6), 485-497; quiz 498-489. doi:10.1007/s00393-012-1004-x
- S2k-Leitlinie. (2017). Spezifischer Kreuzschmerz -AWMF Registernummer: 033-051.
- Schmidt, C. O., Raspe, H., Pfingsten, M., Hasenbring, M., Basler, H. D., Eich, W., & Kohlmann, T. (2007). Back pain in the German adult population: prevalence, severity, and sociodemographic correlates in a multiregional survey. *Spine (Phila Pa 1976)*, 32(18), 2005-2011. doi:10.1097/BRS.0b013e318133fad8
- Smorgick, Y., Park, D. K., Baker, K. C., Lurie, J. D., Tosteson, T. D., Zhao, W., . . . Weinstein, J. N. (2013). Single- versus multilevel fusion for single-level degenerative spondylolisthesis and multilevel lumbar stenosis: four-year results of the spine patient outcomes research trial. *Spine (Phila Pa 1976)*, 38(10), 797-805. doi:10.1097/BRS.0b013e31827db30f
- Society, N. A. S. (2011). Clinical Guidelines for Multidisciplinary Spine Care, Diagnosis and Treatment of Degenerative Lumbar Spinal Stenosis.
- Tomkins-Lane, C. C., Battié, M. C., Hu, R., & Macedo, L. (2014). Pathoanatomical characteristics of clinical lumbar spinal stenosis. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 27(2), 223-229. doi:10.3233/bmr-130440
- van Tulder, M., Becker, A., Bekkering, T., Breen, A., del Real, M. T., Hutchinson, A., . . . Care, C. B. W. G. o. G. f. t. M. o. A. L. B. P. i. P. (2006). Chapter 3. European guidelines for the management of acute nonspecific low back pain in primary care. *Eur Spine J*, 15 Suppl 2, S169-191. doi:10.1007/s00586-006-1071-2
- Verbiest, H. (1950). [Primary stenosis of the lumbar spinal canal in adults, a new syndrome]. *Ned Tijdschr Geneesk*, 94(33), 2415-2433.
- Verbiest, H. (1977). Results of surgical treatment of idiopathic developmental stenosis of the lumbar vertebral canal. A review of twenty-seven years' experience. *J Bone Joint Surg Br*, 59(2), 181-188. doi:10.1302/0301-620X.59B2.141452
- VersorgungsLeitlinie, N. (2017). Nicht-spezifischer Kreuzschmerz. Langfassung. 2. Auflage 2017, Version 1, AWMF-Register-Nr.: nvl-007. . Im Internet: <http://www.versorgungsleitlinien.de> Stand: 13.06.2017
- Weinstein, J. N., Lurie, J. D., Tosteson, T. D., Hanscom, B., Tosteson, A. N., Blood, E. A., . . . Hu, S. S. (2007). Surgical versus nonsurgical treatment for lumbar degenerative spondylolisthesis. *N Engl J Med*, 356(22), 2257-2270. doi:10.1056/NEJMoa070302
- Weinstein, J. N., Tosteson, T. D., Lurie, J. D., Tosteson, A. N., Blood, E., Hanscom, B., . . . Investigators, S. (2008). Surgical versus nonsurgical therapy for lumbar spinal stenosis. *N Engl J Med*, 358(8), 794-810. doi:10.1056/NEJMoa0707136
- Wipplinger, C., Melcher, C., Hernandez, R. N., Lener, S., Navarro-Ramirez, R., Kirnaz, S., . . . Hartl, R. (2018). "One and a half" minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: single level transforaminal lumbar interbody fusion with adjacent segment unilateral laminotomy for bilateral decompression for spondylolisthesis with bisegmental stenosis. *J Spine Surg*, 4(4), 780-786. doi:10.21037/jss.2018.10.01

6. Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1: Algorithmus Management bei akutem Kreuzschmerz (Melcher et al., 2018)

Abbildung 2: Definition der Phasen mit Start- und Endpunkten

Abbildung 3: Die Metrics von Phase 4 als Beispiel (Melcher, Korge, Cunningham, Foley, & Hartl, 2020)

Abbildung 4: Schematische and intraoperative Darstellung des high-fidelity Simulators (Melcher, Hussain, et al., 2022)

Abbildung 5: Reduktion der durchschnittlichen OP- Zeit (A), der ausgelassenen Schritte (B) sowie der Fehler (C) im Rahmen der 3 Operationen (Melcher, Hussain, et al., 2022)

Abbildung 6: Die Wissenslücke aller Teilnehmer reduzierte sich zwischen der 1. und 3. Operation signifikant (Melcher, Hussain, et al., 2022)

Abbildung 7: Degenerative Spondyloisthesis L4/5 und kraniale Spinalkanalstenose L3/4 (Wipplinger et al., 2018)

Abbildung 8: Anatomische Darstellung der Operationstechnik (Wipplinger et al., 2018)

Abbildung 9: Einschlusskriterien und Komplikationen sowie Revisionen

Abbildung 10: Relation der intraoperativen Komplikationen (nach Hauptoperateuren) (Melcher, Paulus, et al., 2022)

7. Abkürzungsverzeichnis

LSS	Lumbale Spinalkanalstenose
DCSA	Dural cross sectional areal
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
MKG	Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie
RCT	Randomized controlled trial
Lig.	Ligament

8. Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen

8.1. Originalarbeiten als Erst und Letztautor

1. Lumbar spinal stenosis – surgical outcome and the odds of revision-surgery – is it all due to the surgeon?
Melcher C., Paulus A., Roßbach B., Gülecüyüz M.F., Birkenmaier C., Jansson V., Wegener B Technol Health Care. 2022;30(6):1423-1434. doi: 10.3233/THC-223389.
IF 1.285
2. Biomechanical comparisons of three minimally invasive Achilles tendon percutaneous repair suture techniques.
Melcher C, Renner C, Piepenbrink M, Fischer N, Büttner A, Wegener V, Birkenmaier C, Jansson V, Wegener B. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2022 Jan 24;92:105578. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105578.
IF 2.1
3. Use of a High-Fidelity Training Simulator for Minimally Invasive Lumbar Decompression Increases Working Knowledge and Technical Skills Among Orthopedic and Neurosurgical Trainees
Melcher C, Hussain I, Kirnaz S, Goldberg J, Sommer F, Navarro-Ramirez R, Medary B, Härtl R. Global Spine J. 2022 Feb 28:21925682221076044. doi: 10.1177/21925682221076044. Online ahead of print.
IF 2.915
4. Melcher C, Birkenmaier C, Wegener B.
[Management of acute backpain without trauma - an algorithm].
MMW Fortschr Med. 2021 Sep;163(16):44-47. doi: 10.1007/s15006-021-0239-3.
IF 0.034
5. Metrics Development for Minimal Invasive Unilateral Laminotomy for Bilateral Decompression of Lumbar Spinal Stenosis With and Without Spondylolisthesis by an International Expert Panel.
Melcher C, Korge A, Cunningham M, Foley KT, Härtl R. Global Spine J. 2020 Apr;10(2 Suppl):168S-175S. doi: 10.1177/2192568219893675. Epub 2020 May 28.
IF 2.915
6. "One and a half" minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: single level transforaminal lumbar interbody fusion with adjacent segment unilateral laminotomy for bilateral decompression for spondylolisthesis with bisegmental stenosis.
Wipplinger C, Melcher C, Hernandez RN, Lener S, Navarro-Ramirez R, Kirnaz S, Schmidt FA, Kim E, Härtl R. J Spine Surg. 2018 Dec;4(4):780-786. doi: 10.21037/jss.2018.10.01.
IF 1.63
7. Effect of Hyperbaric Oxygen on Proliferation and Gene Expression of Human Chondrocytes: An In Vitro Study.
Melcher C, Sievers B, Höchsmann N, Düren F, Jansson V, Müller PE. Cartilage. 2019 Oct;10(4):459-466. doi: 10.1177/1947603518764281. Epub 2018 Mar 27.

IF 3.857

8. [Management of acute low back pain without trauma - an algorithm].
Melcher C, Wegener B, Jansson V, Mutschler W, Kanz KG, Birkenmaier C. *Z Orthop Unfall*. 2018 Oct;156(5):554-560. doi: 10.1055/a-0586-4815. Epub 2018 May 14.
IF 0.923

9. Slow correction of severe spastic hyperlordosis in an adult by means of magnetically expandable rods.
Birkenmaier C, D'Anastasi M, Wegener B, Melcher C. *Eur Spine J*. 2018 Aug;27(8):1671-1678. doi: 10.1007/s00586-017-5366-2. Epub 2017 Nov 22.
IF 2.836

10. "Kissing Nail Technique" for the exchange of intramedullary implants in adjacent peri-implant fractures.
Melcher C, Delhey PR, Birkenmaier C, Thaller PH. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2017 Dec;51(6):488-491. doi: 10.1016/j.aott.2017.08.003. Epub 2017 Oct 3.
IF 0.599

11. Subtrochanteric end-to-side valgus osteotomy for severe infantile coxa vara].
Heimkes B, Komm M, Melcher C. *Oper Orthop Traumatol*. 2009 Mar;21(1):97-111.
doi: 10.1007/s00064-009-1609-7.
IF 1.286

Kumulativer Impact Faktor 20.38

8.2. Originalarbeiten als Co- Autor

1. Experimental measurements of micromotions of the cementless intervertebral disc prostheses in the cadaver bone.
Klein A, Wegener B, Büttner A, Melcher C, Jansson V, von Schulze Pellengahr C. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2022 Feb 2;92:105589. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105589. Online ahead of print.
IF 2.1
2. Is the EOS imaging system as accurate as conventional radiography in grading osteoarthritis of the knee?
Koliogiannis VKA, Brandlhuber M, Messerschmidt V, Stahl R, Melcher C, Schinner R, Birkenmaier C, Ricke J, Baur-Melnyk A. Eur Radiol. 2020 Oct 29. doi: 10.1007/s00330-020-07187-9. Online ahead of print.
IF 7.034
3. Tandem Microscopic Slalom Technique: The Use of 2 Microscopes Simultaneously Performing Unilateral Laminotomy for Bilateral Decompression in Multilevel Lumbar Spinal Stenosis.
Wipplinger C, Kim E, Lener S, Navarro-Ramirez R, Kirnaz S, Hernandez RN, Melcher C, Paolicelli M, Maryam F, Schmidt FA, Härtl R. Global Spine J. 2020 Apr;10(2 Suppl):88S-93S. doi: 10.1177/2192568219871918. Epub 2020 May 28.
IF 2.915
4. Effects of Whole Body Vibration Therapy and Classic Physiotherapy on Postural Stability in People With Back Pain: A Randomized Trial.
Wegener V, Rarack S, Tiffe T, Grill E, Melcher C, Birkenmaier C, Jansson V, Wegener B. Clin Spine Surg. 2019 May;32(4):E214-E220. doi: 10.1097/BSD.0000000000000777.
IF 1.61
5. First case of Roussoella percutanea bursitis.
Almagro-Molto M, Haas A, Melcher C, Nam-Apostolopoulos YC, Schubert S. Diagn Microbiol Infect Dis. 2017 Feb;87(2):172-174. doi: 10.1016/j.diagmicrobio.2016.10.021. Epub 2016 Oct 26.
IF 2.401
6. Modification of PMMA vertebroplasty cement for reduced stiffness by addition of normal saline: a material properties evaluation.
Schröder C, Nguyen M, Kraxenberger M, Chevalier Y, Melcher C, Wegener B, Birkenmaier C. Eur Spine J. 2017 Dec;26(12):3209-3215. doi: 10.1007/s00586-016-4845-1. Epub 2016 Dec 9. PMID: 27942939
IF 3.42
7. Surgical treatment of patients with spondylodiscitis and neurological deficits caused by spinal epidural abscess (SEA) is a predictor of clinical outcome.

Roßbach BP, Niethammer TR, Paulus AC, Melcher C, Birkenmaier C, Jansson V, Wegener B. *J Spinal Disord Tech.* 2014 Oct;27(7):395-400. doi: 10.1097/BSD.0000000000000030.

IF 0.72

8. Polyethylene wear particles induce TLR 2 upregulation in the synovial layer of mice. Paulus AC, Frenzel J, Ficklscherer A, Roßbach BP, Melcher C, Jansson V, Utzschneider S. *J Mater Sci Mater Med.* 2014 Feb;25(2):507-13. doi: 10.1007/s10856-013-5095-y. Epub 2013 Nov 19.

IF 4.0

9. An evaluation of medications commonly used for epidural neurolysis procedures in a human fibroblast cell culture model.

Birkenmaier C, Redeker J, Sievers B, Melcher C, Jansson V, Mayer-Wagner S. *Reg Anesth Pain Med.* 2011 Mar-Apr;36(2):140-4. doi: 10.1097/AAP.0b013e31820d41c4.

IF 4.097

10. The gel box - a testing device for the characterization of cryo- and radiofrequency lesions employed in interventional pain therapy.

Birkenmaier C, Terzis A, Wegener B, Melcher C, Fottner A, Hausdorf J, Schmitt-Sody M, Jansson V. *Pain Physician.* 2010 May-Jun;13(3):263-71.

IF 7.793

Kumulativer Impact Faktor 36.08

8.3. Case- Reports

1. An intramedullary capillary hemangioma of the spine with an underlying plasmocytoma.

Melcher C, Wegener B, Niederhagen M, Jansson V, Birkenmaier C. *Spine J.* 2013 Jul;13(7):e1-4. doi: 10.1016/j.spinee.2013.01.044. Epub 2013 Mar 13.

IF 2.915

8.4. Buchkapitel

1. Roger Härtl and Rodrigo Navarro-Ramirez
Essential Step-by-Step Techniques for Minimally Invasive Spinal Surgery
Thieme, 2022
2. Jauch, Mutschler, Wichmann
Chirurgische Basisweiterbildung (2009-2022)
Akuter Wirbelsäulenschmerz
3. Meßmer, Jähne, Neuhaus
Was gibt es Neues in der Chirurgie (2009-2022)
Kapitel: Was gibt es Neues in der Kinderorthopädie?

9. Danksagung

In erster Linie möchte ich meinen klinischen und wissenschaftlichen Mentoren Prof. Dr. med. Christof Birkenmaier und Prof. Dr. med. Bernd Wegener danken, die die Liebe zur Wirbelsäule in mir geweckt, mich in ihr Team aufgenommen und mit Ihrer unnachahmlichen Weise gefördert und gefordert haben. Dank Euch habe ich nicht nur das gefunden, was mich beruflich erfüllt, sondern ihr habt mir mit Euren Ideen und Eurer Begeisterung auch die Forschung nähergebracht und so diese Arbeit ermöglicht.

Mein besonderer Dank gilt hier vor allem Dir, Bernd. Ohne Deine stete Unterstützung, Deinen Ansporn, Deine Ideen, Deinen Rat zu jeder Tages- und Nachtzeit, aber vor allem das viele Lachen und Deine Freundschaft gäbe es diese Arbeit nicht.

Des Weiteren möchte ich meinem Fachmentor Herrn Prof. Dr. med. Boris Holzapfel und meiner Fachmentorin Frau Prof. Dr. med. Orsolya Genzel -Boroviczeny für die Unterstützung und Begleitung während des Habilitationsprozesses von ganzem Herzen danken. Ohne die Wiederaufnahme in meine „alte Heimat“, der ich mich noch immer so verbunden fühle, hätte diese Arbeit ihre Erfüllung nicht gefunden.

Auch ohne meinen Aufenthalt in New York im Rahmen meines AO Mentorships wäre diese Arbeit nicht Realität geworden, denn ein großer Teil des Habilitationsprojektes ist dort entstanden und umgesetzt worden. Entsprechend möchte ich meinem Mentor Prof. Dr. med. Roger Härtl von ganzem Herzen für seine wunderbare Art, die Aufnahme in seine Klinik und sein Team, seine unendlichen Ideen, seine mitreißende Art, seine Zeit, stete Unterstützung und die mit besten drei Monate meines Lebens danken. Thank you, Chiefy!

Entsprechend gilt auch mein Dank dem wunderbaren Team der AO Spine und der AO Foundation für Ihren Glauben in mich sowie die fortwährende persönliche und berufliche Unterstützung.

If I had to name one... - Mike Cunningham. Thank you for your calm, your insight, your never lasting support, for showing me possibilities I would have never dreamed of, for putting the stars into reach.

Wenn auch noch relativ frisch, gebührt mein Dank auch meinem aktuellen Chef, Herrn Prof. Dr. med. Henry Halm sowie meinen Oberarztkollegen Dr. med. Marc Ruppolt und Ferdinand Zang. Danke, dass ihr mich konsequent erinnert, liebevoll angeschubst und immer wieder angetrieben habt. Noch mehr als Kontroverse, Diskussion und Korrekturen ist das, was ihr

jeden Tag tut besonders. Ohne Euch hätte es noch viel länger gedauert. Ihr seid eine wahre Bereicherung.

Am Ende und doch ganz besonders gilt mein tiefer Dank meiner Familie, ohne die ich nicht wäre, wer, was und wo ich bin. Meinen Eltern, die mir erst jede Möglichkeit gegeben, immer an mich geglaubt und mich unterstützt haben, meinem Bruder, der steten Ansporn, Unterstützung und wunderbares Spiegelbild personifiziert und meiner Schwester, die viel von dem ist, was ich immer sein wollte.