

Aus der
Orthopädischen Universitätsklinik mit Poliklinik Tübingen

Inaugural-Dissertation

Vergleichsanalyse radiologischer und klinischer Parameter der Lendenwirbelsäule nach transforaminaler lumbaler interkorporeller Fusion (TLIF)

**zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

**vorgelegt von
Baumgärtner, Tobias
2022**

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. N. Wülker

2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. Badke

Tag der Disputation: 22.03.2021

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Epidemiologie.....	1
1.2 Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen	2
1.2.1 Osteochondrose	3
1.2.2 Spondylolyse und Spondylolisthesis.....	6
1.2.3 Therapeutisches Vorgehen.....	8
1.3 Fusionschirurgie.....	9
1.3.1 Historische Entwicklung der Wirbelsäulenfusion.....	9
1.3.2 Historie der verschiedenen Fusionstechniken	11
1.4 Cage-Implantate.....	13
1.4.1 Geschichte der Cage-Implantate	13
1.4.2 Cage-Design.....	17
1.5 Sagittales Alignment.....	18
1.5.1 Definition und klinische Bedeutung.....	18
1.5.2 Cage-Geometrie und sagittales Profil.....	21
1.6 Fragestellung	23
2 Material und Methoden.....	24
2.1 Studiendesign	24
2.2 Operationstechnik der TLIF.....	25
2.3 Implantate	26
2.4 Radiologische Untersuchung	27

2.4.1	Röntgenologische Untersuchungstechnik.....	27
2.4.2	Lumbale und segmentale Lordose.....	28
2.4.3	Spinopelvine Parameter	29
2.5	Fragebogenevaluation.....	31
2.5.1	Oswestry Disability Index.....	32
2.5.2	Roland Morris Score	33
2.5.3	Visuelle Analogskala.....	33
2.6	Klinisch körperliche Untersuchung	34
2.7	Statistische Methoden	37
3	Ergebnisse	39
3.1	Populationscharakteristika	39
3.2	Klinische Untersuchung.....	41
3.3	Radiologische Ergebnisse.....	45
3.3.1	Gesamtpopulation.....	45
3.3.2	Vergleich der Cage-Formen	47
3.4	Ergebnisse der VAS, des ODI und RMS.....	51
3.4.1	Gesamtpopulation.....	51
3.4.2	Vergleich der Cage-Formen	53
3.4.3	Multivariate Varianzanalyse	55
4	Diskussion.....	58
4.1	Operationstechnik	58
4.1.1	TLIF vs. PLIF	59
4.1.2	TLIF vs. ALIF	60
4.1.3	TLIF vs. MI-TILF	61
4.2	Radiologische Ergebnisse.....	63

4.2.1	Einfluss der TLIF-Technik auf die SL und LL.....	63
4.2.2	Einfluss des lordotischen Cages auf die SL und LL.....	65
4.2.3	Pelvic Tilt	68
4.3	Klinische Ergebnisse	70
4.3.1	Einfluss der Cage-Form.....	71
4.3.2	Aussagekraft der SS.....	73
4.3.3	Aussagekraft des PT	74
4.3.4	Einfluss des BMI.....	75
4.4	Methodenkritik.....	76
4.5	Schlussfolgerung.....	77
5	Zusammenfassung	78
6	Literaturverzeichnis.....	80
7	Erklärung zum Eigenanteil.....	96
	Danksagung.....	97
	Anhang.....	98

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ALIF	engl. Anterior Lumbar Interbody Fusion
ATP	engl. Anterior To Psoas
BAK-Cage	Bagby- und Kuslich-Cage
LL	Lumbale Lordose
LLIF	engl. Lateral Lumbar Interbody Fusion
MI-TLIF	engl. Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion
MANOVA	multivariaten Varianzanalyse
ODI	engl. Oswestry Disability Index
OLIF	engl. Oblique Lumbar Interbody Fusion
PI	engl. Pelvic Incidence
PLIF	engl. Posterior Lumbar Interbody Fusion
PT	engl. Pelvic Tilt
RMDQ	engl. Roland and Morris Disability Questionnaire
SL	Segmentale Lordose
SS	engl. Sacral Slope
SVA	engl. Sagittal Vertical Axis
Tab.	Tabelle
TLIF	engl. Transforaminal Lumbar Interbody Fusion
VAS	Visuelle Analoge Skala
VRL	Vertikale Referenzlinie
XLIF	engl. Extreme Lateral Interbody Fusion

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Klassifikation der Spondylolisthesis nach Meyerding	8
Abb. 2: Chirurgische Ansätze für Fusionstechniken	11
Abb. 3: Der Bagby-Basket	14
Abb. 4: Der Bagby- und Kuslich-Cage.....	15
Abb. 5: Harms-Cage in postoperative Röntgenaufnahmen	16
Abb. 6: CFRP-Cage aus PEKEKK	17
Abb. 7: Vier Haltungstypen nach Roussouly	20
Abb. 8: DEVEX-Cages der Firma Depuy Synthes.....	27
Abb. 9: Bestimmung der lumbalen und segmentalen Lordose präoperativ (a) und postoperativ (b).	28
Abb. 10: Schematische Bestimmung der Pelvic Incidence.....	29
Abb. 11: Bestimmung der Pelvic Incidence	29
Abb. 12: Schematische Bestimmung des Pelvic Tilt.....	30
Abb. 13: Bestimmung des Pelvic Tilt	30
Abb. 14: Schematische Bestimmung des Sacral Slope.....	31
Abb. 15: Bestimmung des Sacral Slope	31
Abb. 16: Schober und Ott-Zeichen	35
Abb. 17: Lasègue-Zeichen	36
Abb. 18: Bragard-Zeichen	36
Abb. 19: Kernig-Brudzinski-Test.....	37
Abb. 20: Mennell-Test	37
Abb. 21: Altersverteilung des Patientenkollektivs bei Operation.....	39
Abb. 22: Postoperative Schmerzlokalisierung der Cage-Formen im Vergleich	42

Abb. 23: Mittelwerte der LL und SL sowohl prä- als auch postoperativ im Gesamtkollektiv.....	46
Abb. 24: Vergleich der LL zwischen den verschiedenen Cage-Formen	48
Abb. 25: Vergleich der SL zwischen den verschiedenen Cage-Formen.....	49
Abb. 26: Vergleich des PT zwischen den verschiedenen Cage-Formen.....	50
Abb. 27: Präoperative und postoperative Werte der VAS in der Gesamtpopulation.....	52
Abb. 28: Abnahme der VAS (prä- zu postoperativ) in den verschiedenen Cage- Gruppen.....	53
Abb. 29: Postoperative Ergebnisse des ODI in den verschiedenen Cage- Gruppen.....	54
Abb. 30: Grad der Behinderung in den verschiedenen Cage-Gruppen.....	54
Abb. 31: Postoperative Ergebnisse des RMS in den verschiedenen Cage- Gruppen.....	55
Abb. 32: Postoperative Ergebnisse des ODI, kategorisiert nach BMI.....	56
Abb. 33: Postoperative Ergebnisse des RMS, kategorisiert nach BMI.....	57
Abb. 34: Abnahme der VAS (prä- zu postoperativ), kategorisiert nach BMI...	57

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anatomische Klassifikation nach Wiltse und Rothmann.....	7
Tab. 2: Segmentale Versorgung der Gesamtpopulation und der einzelnen Gruppen	41
Tab. 3: Bewegungsumfang in der Gesamtkohorte und den verschiedenen Gruppen	43
Tab. 4: Radiologischen Ergebnisse der verschiedenen Gruppen.....	47
Tab. 5: Klinische Ergebnisse der Fragebogenevaluation in der Gesamtpopulation und den verschiedenen Gruppen	51

1 Einleitung

1.1 Epidemiologie

Rückenschmerzen gehören zu den fünf häufigsten Gesundheitsproblemen der deutschen Bevölkerung und zählen damit zu den wichtigsten Erkrankungen des muskuloskelettalen Systems (Fuchs et al. 2012). Studienergebnisse zeigen, dass die Stichtagsprävalenz von Rückenschmerzen zwischen 30 und 40 % liegt, die Einjahresprävalenz mehr als 60 bis 70 % erreicht und die Lebenszeitprävalenz 80 % überschreitet (Andersson 1999; Schumacher und Brähler 1999; Schmidt et al. 2007). Schmerzen im Bereich der Lendenwirbelsäule stellen dabei ein besonderes gesundheitliches Problem dar. Bis vor 20 Jahren ging man davon aus, dass sich diese Schmerzsymptomatik hauptsächlich auf die westlichen Hochkulturen beschränkt (Volinn 1997). Neuere Untersuchungen zeigen allerdings, dass dieses Problem auch Entwicklungsländer betrifft (Ory et al. 1997; Hoy et al. 2003; Jin et al. 2004). Weltweit liegt die durchschnittliche Gesamtprävalenz unterer Rückenschmerzen bei 31 %. Die durchschnittliche Punktprävalenz beträgt 18,3 % und die Prävalenz eines Jahres 38 % (Hoy et al. 2012).

Aus ökonomischer Sicht stellen Rückenschmerzen deshalb eine enorme Herausforderung für das Gesundheits- und Wirtschaftssystem dar. Im Jahr 2015 beliefen sich die Krankheitskosten für Rückenleiden auf über 10,9 Milliarden €, 6,4 Milliarden € bei Frauen und 4,5 Milliarden € bei Männern. Sie machten damit alleine 3,2 % der gesamten Krankheitskosten in Höhe von 338 Milliarden € aus (Statistisches Bundesamt 2019). Unter den Erkrankten betragen die durchschnittlichen Gesamtkosten 1322 € pro Person und Jahr (Wenig et al. 2009). Der größte Teil wird von indirekten Kosten verursacht, die auf den Ausfall der Arbeitsleistung der Patienten zurückzuführen sind (Katz 2006). In den USA gingen in einem Jahr aufgrund von Rückenschmerz bedingten Arbeitsausfällen 101,8 Millionen Arbeitstage verloren (Guo et al. 1999). In Deutschland zählen Rückenschmerzen deshalb auch zu den bedeutendsten Ursachen für die Entstehung von Arbeitsunfähigkeit und Frühberentung (Raspe 2012).

Häufig werden Rückenschmerzen zusätzlich von einer oder mehreren Komorbiditäten begleitet. Dabei zeigt sich nicht nur zu den muskuloskeletalen Erkrankungen (Osteoarthrose, Rheumathoiden Arthritis und Osteoporose) eine positive Korrelation. Auch kardiovaskuläre und zerebrovaskuläre Erkrankungen sowie psychische Störungen, wie Depressionen, Angstzustände und Schlafstörungen, zeigen im Vergleich zu schmerzfreien Patienten bei Personen mit Rückenschmerzen eine höhere Inzidenzrate (Polatin et al. 1993; Schneider et al. 2007; Gore et al. 2012).

Operative Wirbelsäuleneingriffe sind bei Rückenschmerzen oftmals die letzte Option, um eine dauerhafte Beschwerdelinderung zu ermöglichen, wenn die konservativen Therapiemöglichkeiten kein zufriedenstellendes Ergebnis liefern. Diese chirurgischen Interventionen haben in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen. Von 1979 bis 1990 stieg die Rate für lumbale Wirbelsäuleneingriffe in den USA um mehr als 60 % an (Davis 1994). Bei spinalen Fusionsoperationen konnte zwischen 1998 und 2008 sogar ein Wachstum von 137 % verzeichnet werden (Rajae et al. 2012). Im Vergleich dazu kam es bei Laminektomien nur zu einem Anstieg von 11,3 % (Rajae et al. 2012) und bei Hüft- und Knie-Endoprothesen lediglich zu einem Wachstum von 13 bis 15 % (Deyo et al. 2005). Dies ist unter anderem auf die Cage-Technologie und der damit verbundenen Weiterentwicklung der Wirbelsäulenchirurgie zurückzuführen (Deyo et al. 2005).

1.2 Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen

Die gesamte Wirbelsäule ist zeitlebens einer hohen statisch-mechanischen Belastung ausgesetzt. Durch diese täglich schweren Beanspruchungen können degenerative Wirbelsäulenerkrankungen entstehen, die sich in der klinischen Praxis oftmals in Form von Rückenschmerzen präsentieren. Diese degenerativen Pathologien umfassen verschiedene Krankheitsbilder, darunter häufig die Osteochondrose und Spondylolisthesis. Während nur 40 % der Personen unter 30 Jahren eine pathologische Veränderung an der Lendenwirbelsäule zeigen, steigt die Prävalenz im höheren Alter (50 bis 55 Jahre) auf über 90 % an (Cheung et al. 2009). Aufgrund des demographischen Wandels, besonders im Hinblick auf die

fortschreitende Überalterung der Bevölkerung, sollte diesen Erkrankungen zukünftig noch mehr Beachtung geschenkt werden.

1.2.1 Osteochondrose

Die Osteochondrose, oder Osteochondrosis intervertebralis, beschreibt eine degenerative Verschleißerkrankung der Wirbelkörper (Corpus vertebrae) und Bandscheiben (Discus intervertebralis).

Bereits in der zweiten Lebensdekade lassen sich charakteristische histomorphologische Veränderungen an der Wirbelsäule nachweisen (Nerlich et al. 1997; Boos et al. 2002; Weiler 2013). Bei jedem fünften Teenager zeigen sich leichte Anzeichen, die für eine Degenerationen der Bandscheiben sprechen. Dieser Anteil nimmt mit dem Alter stark zu, insbesondere bei Männern, sodass etwa 10 % der 50-Jährigen und 60 % der 70-Jährigen stark degenerierte Bandscheiben aufweisen (Miller et al. 1988; Urban und Roberts 2003).

Viele Studien weisen darauf hin, dass die Degeneration der Bandscheiben auf einem multifaktoriellen Geschehen beruht (Habtemariam et al. 1998; Palmgren et al. 1999; Oegema et al. 2000; Roberts et al. 2000; Antoniou et al. 2001; Gruber et al. 2001; Weiler 2013; Aichmair et al. 2019). Dabei ist der genaue pathophysiologische Mechanismus, der durch eine Kombination aus intrinsischen und extrinsischen Faktoren entsteht, noch nicht abschließend erklärt (Aichmair et al. 2019). Zu den intrinsischen Faktoren zählen sowohl die Ernährung der Bandscheibe als auch genetische Elemente. Die extrinsischen Faktoren werden zum Großteil von mechanischen Belastungen bestimmt (Aichmair et al. 2019).

Während die Ernährung der äußeren Zellschichten des Anulus fibrosus direkt durch Blutgefäße erfolgt, findet die Versorgung der Zellen des Nucleus pulposus nahezu ausschließlich durch Diffusion statt (Urban et al. 2004; Aichmair et al. 2019). Ein steiler Konzentrationsgradient von Sauerstoff, Glucose und Laktat ermöglicht eine konstante Ernährung des Bandscheibenzentrums über die Endplatten und Bandscheibenmatrix (Aichmair et al. 2019). Kommt es bei fortschreitender Degeneration oder Kalzifizierung der Endplatten zu einer Minderversorgung von spezifischen Bereichen der Bandscheibe, kann durch den Konzentrationsabfall von Sauerstoff und den Abfall des pH-Werts die Syntheseleistung der Zellen

stark beeinträchtigt werden (Aichmair et al. 2019). Daraufhin kommt es zu einem Verlust der Matrixproduktion und Zunahme der Matrixdegradation und -resorption, die das Voranschreiten der degenerativen Prozesse beschleunigen (Urban et al. 2004; Aichmair et al. 2019).

Bestimmte genetische Faktoren sind ebenfalls charakteristisch für die Bandscheibendegeneration. Auf molekularer Ebene lässt sich im Endstadium der Bandscheibendegeneration (> 70 Jahre) ein vermehrtes Vorkommen von Kollagen X feststellen. In den Bandscheiben von jungen Probanden, vom Säugling bis zum jungen Erwachsenen, tritt im Vergleich dazu weder im Nucleus pulposus noch im Anulus fibrosus eine positive Typ-X-Färbung auf (Boos et al. 1997). Die Kollagen-Typen I, II, III, VI und IX treten sowohl in degenerativ veränderten als auch in normalen Abschnitten der Bandscheibe auf. Dabei verringern sich die Anteile von Kollagen II und IX bei fortgeschrittenen Umbauprozessen, während sich Typ III und VI deutlich erhöht zeigen (Nerlich et al. 1998). Des Weiteren besteht eine positive Korrelation zwischen der Expression des Tumornekrosefaktors α sowie dem Transforming Growth Factors β und der histomorphologischen Degeneration der Bandscheiben (Weiler et al. 2005). Auch die vermehrte Expression von Zytokinen übernimmt eine regulatorische Funktion. Besonders Interleukin-1 induziert im Zusammenspiel mit vielen anderen Enzymen (z.B. Caspase 1) und Proteinen (z.B. NALP3) ein Ungleichgewicht zwischen katabolen und anabolen Vorgängen an den Bandscheiben und fördert damit die Degeneration (Le Maitre et al. 2005; Tang et al. 2016). Die Hemmung von Interleukinen und deren Wirkungskette kann deshalb ein wichtiger therapeutischer Ansatz zur Verhinderung und Umkehrung der Degeneration sein (Le Maitre et al. 2005).

Mechanisch abnormale Belastungen der Bandscheiben verursachen als bedeutendster extrinsischer Faktor Gewebetraumata und adaptive Veränderungen (Stokes und Iatridis 2004). Zu unterscheiden sind hierbei drei Belastungsformen: Vibrations-, Torsions- und Kompressionsbelastung. Die Vibrations- und Kompressionsbelastung wirken sich nachteilig auf den Stoffwechsel und die Ernährung der Bandscheibe aus (Frymoyer et al. 1980; Mundt et al. 1993; Aichmair et al. 2019). Selbst geringfügige belastungsinduzierte Beschädigungen der Wirbelkörperendplatte führen durch Erzeugung von Spannungsspitzen im Anulus zu

fortschreitenden strukturellen Veränderungen der angrenzenden Bandscheiben (Adams et al. 2000). Farfan et al.(1970) zeigten, dass Rotationsbewegungen im Rahmen der normalen Lendenbeweglichkeit eine Bandscheibenschädigung durch entstehende Torsionsbelastungen verursachen. Bei Überdehnung der Kollagenfasern des Anulus fibrosus entstehen dadurch erste Risse, die in Folge Strukturdefizite sowie Vernarbungen der ringförmigen Ringfasern verursachen und die Bandscheibendegeneration begünstigen (Farfan et al. 1970).

In ihrer Gesamtheit führen alle diese Faktoren zu einer immer weiter fortschreitenden Verschlechterung der Bandscheibenintegrität. Der Konzentrationsverlust an Proteoglykanen ist dabei von besonderer Bedeutung. Als wichtiger Bestandteil der extrazellulären Matrix im Knorpelgewebe sind die Proteoglykane entscheidend am Wassergehalt der Bandscheibe beteiligt (Aichmair et al. 2019). Bei einer verringerten Proteoglykankonzentration und folglich einem geringen Wassergehalt sinkt der osmotische Druck und damit auch der Turgor im Nucleus pulposus (Urban und McMullin 1988; Shinmei et al. 1989; Urban und Roberts 2003). Dies führt in Kombination mit anderen degenerativen Veränderungen der Bandscheibe sowohl zu einem Verlust der Elastizität und Pufferfunktion der Bandscheibe als auch zu einem Höhenverlust des intervertebralen Raums (Aichmair et al. 2019). Aufgrund der daraus resultierenden Druckveränderungen im Bereich der angrenzenden Wirbelkörper, finden reaktive knöcherne Um- und Anbauten statt. Diese machen sich zunächst als vermehrte subchondrale Sklerosierung bemerkbar, gefolgt von exophytischen Spondylophytenbildung bei fortschreitender Degeneration (Aichmair et al. 2019). Im Extremfall entstehen knöcherne Verwachsungen zwischen den einzelnen Wirbelkörpern und das Gelenk versteift (Aichmair et al. 2019). Pathophysiologisch beeinflussen diese Veränderungen auch den Anulus fibrosus des betroffenen Segments. Es kommt zu einer Vorwölbung des Nucleus pulposus in den posterioren Bereich des Anulus fibrosus, einer sogenannten Diskusprotrusion, und damit zu einer Einengung des Spinalkanals (Twomey und Taylor 1985; Adams et al. 1996; Aichmair et al. 2019). Die Bandscheibendegenerationen führen außerdem aufgrund der biomechanischen Belastungsumverteilung zu einer zunehmenden Spondylarthrose (Adams et al. 1990; Maher et al. 1994). Dadurch entstehen sowohl eine kompensatorische

Hypertrophie der dorsaler Bandstrukturen als auch eine Gelenkkapselverdickung, die den Spinalkanal zusätzlich beeinträchtigen und im schlimmsten Fall eine 360°-Einengung des Spinalkanals und der Neuroforamina verursachen (Papanagiotou und Boutchakova 2014; Aichmair et al. 2019). Außerdem begünstigt die Osteochondrose das Auftreten anderer Wirbelsäulenpathologien, wie beispielsweise die Spondylolyse oder die degenerative Form der Spondylolisthesis.

1.2.2 Spondylolyse und Spondylolisthesis

Die Spondylolisthesis, in der Fachliteratur auch als Olisthesis oder Wirbelgleiten beschrieben, definiert das Gleiten eines Wirbelkörpers nach ventral oder dorsal in Relation zum nächsttieferen Wirbel. Die Spondylolyse beschreibt eine uni- oder bilaterale Diskontinuität der Pars interarticularis des Arcus vertebrae (Aichmair et al. 2019).

In der Allgemeinbevölkerung beträgt die Inzidenz für Spondylolyse etwa 5 % (Laurent und Einola 1961). Dabei steigt die Inzidenz ab dem Kindesalter (sechstes Lebensjahr) bis zum Erwachsensein von 4,4 % auf 6 % an (Fredrickson et al. 1984). Bei Sportlern, die Bewegungsabläufe mit starker Belastung der lumbalen Wirbelsäule, wie Speerwerfen oder Delfinschwimmen, ausführen, ist die Spondylolyserate um ein Mehrfaches erhöht (Aichmair et al. 2019). Bei jugendlichen Turnerinnen zeigt sich sogar eine vierfach erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Entstehen von Stressfrakturen der Pars interarticularis (Aichmair et al. 2019). Im Lendenwirbelbereich betrifft eine Spondylolyse mit 82 % die Wirbelkörper LWK5/SWK1, zu 11,3 % LWK4/LWK5 und zu 0,5 % LWK3/LWK4 (Roche und Rowe 1951; Wittenberg et al. 1998)

Erstmals wurde die Spondylolisthesis anhand ihrer anatomischen Gegebenheiten von Wiltse et al. (1976) klassifiziert (siehe Tab. 1). Im Jahre 1989 erweiterten Wiltse und Rothman diese Klassifikation und ergänzten die postoperativen Spondylolisthesis als Typ VI (Wittenberg et al. 1998; Aichmair et al. 2019). Alternativ wird im europäischen Raum die Spondylolisthesis hinsichtlich ihrer Ursachen klassifiziert. Dabei wird zwischen primär entwicklungsbedingten Ursachen und sekundär erworbenen (traumatische, pathologische, postoperative oder degenerative) Ursachen unterschieden (Aichmair et al. 2019).

Tab. 1: Anatomische Klassifikation der Spondylolisthesis (modifiziert nach Wiltse et al. 1976; Wittenberg et al. 1998; Fritsch 2003; Kroppenstedt und Halder 2017; Aichmair et al. 2019)

Typ	Beschreibung
I	Angeborene oder dysplastische Spondylolisthesis: <ul style="list-style-type: none"> • Subtyp a: Axial ausgerichtete Gelenkfortsätze • Subtyp b: Sagittal ausgerichtete Gelenkfortsätze • Subtyp c: Kongenitale Kyphose und weitere kongenitale Anomalien
II	Isthmische Spondylolisthesis (Läsion der Pars interarticularis): <ul style="list-style-type: none"> • Subtyp a: Lytisch (Stressfraktur) • Subtyp b: Elongation der Pars ohne Lyse • Subtyp c: Akute Fraktur der Pars
III	Degenerative (Pseudo-)Spondylolisthesis (Bandscheiben- und Facettengelenksdegeneration)
IV	Traumatische Spondylolisthesis (akute Fraktur im Bereich des Wirbelbogens, außer der Pars interarticularis)
V	Pathologische Spondylolisthesis (generalisierte oder lokale pathologische Veränderung)
VI	Postoperative Spondylolisthesis

Bei Therapieempfehlungen sind beide Klassifikationen als gleichwertig zu betrachten und auf alle Formen der Spondylolisthesis anwendbar (Hammerberg 2005; Aichmair et al. 2019).

Die Schweregradeinteilung nach Meyerding ist die am häufigsten angewandte Methode der radiologischen Diagnostik der Spondylolisthesis (Aichmair et al. 2019). Dabei wird der anterior-posteriore Durchmesser der Deckplatte in vier gleich große Abschnitte gegliedert. Der Schweregrad ergibt sich daraus, auf welchen der vier Abschnitte sich die Hinterkante des darüberliegenden Lendenwirbels im seitlichen Strahlengang projiziert (siehe Abb. 1). Grad I nach Meyerding beschreibt somit ein Gleiten des Wirbelkörpers zwischen 0 % und 25 %. Bei Grad II der Spondylolisthesis ist der Wirbel bis zur Hälfte auf der Deckplatte des kaudalen Wirbelkörpers nach ventral gegliedert. Ab Grad III (50 bis 75 %) spricht man

von schwerem Wirbelgleiten. Das Wirbelgleiten in den vierten Abschnitt der Deckplatte (75 bis 100 %) entspricht Grad IV nach Meyerding. Die schwerste Form der Spondylolisthesis wird als Spondyloptose (Grad V) bezeichnet und beschreibt das vollständige Abrutschen des fünften Lendenwirbelkörpers nach ventral (Fritsch 2003; Aichmair et al. 2019).

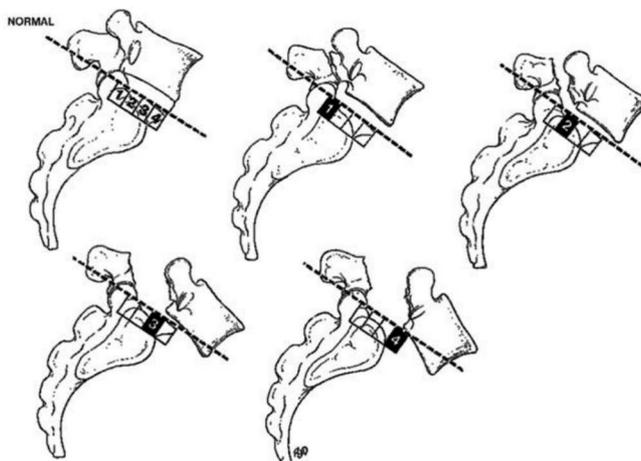


Abb. 1: Klassifikation der Spondylolisthesis nach Meyerding (modifiziert nach Fritsch 2003)

Der Gleitgrad bei der degenerativen lumbalen Spondylolisthesis liegt normalerweise unter 25 % (Grad I) und überschreitet selten Grad II (maximal 30 %). Bei der dysplastischen Form hingegen kann eine höhergradige Spondylolisthesis (Grad \geq III), im schlimmsten Fall eine Spondyloptose, entstehen (Bridwell et al. 1993; Kalichman und Hunter 2008; Aichmair et al. 2019)

1.2.3 Therapeutisches Vorgehen

Die Entscheidung über die Form der Behandlung bei einer Spondylolisthesis und / oder einer Osteochondrose erfolgt nach einem alters- und krankheitsadaptierten Therapiekonzept (Aichmair et al. 2019). Hierbei sind für die Entscheidungsfindung neben dem Alter der Patienten auch der Symptombeginn, die Symptomintensität sowie eine neurologische Symptomatik von Bedeutung. Gleichmaßen sollen mögliche Komorbiditäten, die ein erhöhtes perioperatives Risiko darstellen, bei Therapieentscheidungen berücksichtigt werden (Aichmair et al. 2019).

Zu den konservativen Therapiemöglichkeiten zählen zum einen die umfangreiche Beratung über die Notwendigkeit von Gewichtsreduktion, wirbelsäulengerechtem Arbeiten und körperlicher Aktivität, zum anderen die physiotherapeutische Behandlungen mit Fokus auf die Kräftigung der Rumpf- und Rückenmuskulatur. Zur medikamentösen Therapie sollten Analgetika, Muskelrelaxantien, Anti-phlogistika sowie die Injektion von Lokalanästhetika / Glucocorticoiden in Erwägung gezogen werden (Fritsch 2003; Aichmair et al. 2019).

Als operative Therapiemöglichkeiten stehen mikro- und makrochirurgische Techniken zur Verfügung. Bei großen Defekten und einer entsprechenden klinischen Symptomatik wird eine Spondylodese (Wirbelkörperversteifung) der betroffenen Segmente angestrebt. Dabei sollte operativ neben der Konsolidierung des Fusionsareals, auch die Rekonstruktion der sakro- und spinopelvinen Balance angestrebt werden (Fritsch 2003; Aichmair et al. 2019).

1.3 Fusionschirurgie

1.3.1 Historische Entwicklung der Wirbelsäulenfusion

Die Geschichte der Fusionschirurgie durchlief seit mehr als einem Jahrhundert multiple Entwicklungsperioden bis hin zu den heute angewandten Operationstechniken der Spondylodese. Die früheste Beschreibung eines gebrochenen Halswirbels mit Lähmungssymptomatik wurde im Papyrus Edwin Smith (Ägypten, um 1550 v. Chr.) entdeckt. Die therapeutische Behandlung beinhaltete damals die Ruhigstellung mit zusätzlicher Anwendung von Bandagen und Verbänden (Knoeller und Seifried 2000). Hippokrates (ca. 460 bis 370 v. Chr.) war wahrscheinlich der Erste, der Ischialgien und lumbale Rückenschmerzen beschrieb. Außerdem stellte er fest, dass die Verletzung des Wirbels mit einer Lähmung der Gliedmaßen auf der ipsilateralen Seite korreliert (Castro et al. 2005).

Die chirurgische Behandlungsmethoden entwickelten sich allerdings erst im 19. Jahrhundert, da bis zu diesem Zeitpunkt die fehlenden technischen Möglichkeiten sowie hohe Infektionsgefahr eine unüberwindbare Hürde darstellten (Knoeller und Seifried 2000). Hadra (1975) operierte als Erster eine Frakturluxation der Halswirbelsäule, bei einem Kind mit progredienter neurologischer Symptomatik.

Er konnektierte durch einer Drahtcerclage aus Silber die cervikalen Processus spinosi miteinander und stabilisierte so die Segmente. Später wandte er dieses Verfahren auch bei fortschreitenden Wirbeldeformitäten an, die durch die Potts-Krankheit entstanden sind (Knoeller und Seifried 2000; Mohan und Das 2003). In den frühen 1900er Jahren verwendete Fritz Lange erstmalig ein Stabsystem aus Fremdmaterialien wie Seide oder Metall, um Teile der Wirbelsäule intern zu stabilisieren. Er mutmaßte, dass Bereiche des Körpers, die eine rein mechanische Funktion haben, ersetzt werden können, einschließlich derer, die an Bewegungen beteiligt sind (Mohan und Das 2003). Hibbs (1964) und Albee (1911) führten das Konzept der nicht instrumentierten Knochenfusion ein. Nach der Entfernung des Knorpels der Zwischenwirbelgelenke befestigten sie autologe Spongiosa, die eine dorsale Wirbelsäulenfusion ermöglichen sollte (Knoeller und Seifried 2000; Mohan und Das 2003).

King (1948) entwickelte die intraartikulären Facettengelenkschrauben. Zur klinischen Anwendung kamen diese aber erst durch Boucher (1959), der auch die Platzierung der Schrauben durch den Pedikel etablierte (Knoeller und Seifried 2000). Harrington (1962) ermöglichte mit seinem Haken-Stab-System die Genese der ersten Generation moderner Wirbelsäuleninstrumente. Das System bestand aus einer Kompressionsstange mit Gewinde und einer Distractionsstange, die durch Haken das Wirbelsäulenprofil korrigieren sollten (Heary und Madhavan 2008). Eingesetzt wurde diese Instrumentierung bei der Operation von Skoliose-Patienten. Diese Operationstechniken führten allerdings erst nach zusätzlicher dorsaler Fusion mit Knochentransplantaten zu langfristigen Erfolgen (Harrington 1962; Harrington 1988). Roy-Camille et al. (1986) gingen noch einen Schritt weiter und beschrieben die erstmalige Anwendung einer mit Pedikelschrauben befestigten posterioren Platte, eine Technik, die sie bereits seit 1963 anwandte. Sie berichteten über Fusionsraten von fast 100 % und legten damit den Grundstein für die Pedikelschraubeninstrumentierung sowie für die modernen Fusionstechniken (Talia et al. 2015).

1.3.2 Historie der verschiedenen Fusionstechniken

Seit den Anfängen der Fusionschirurgie Ende des 19. Jahrhunderts sind viele verschiedene Techniken der Spondylodese entwickelt worden, um Patienten mit diversen Wirbelsäulenpathologien zu behandeln. Die heute zu Verfügung stehenden Operationstechniken unterscheiden sich in der Art des Zugangs (anterior, posterior, lateral oder oblique) und in der verwendeten Instrumentierung (siehe Abb. 2). Jede Technik verfügt über individuelle Vor- und Nachteile.

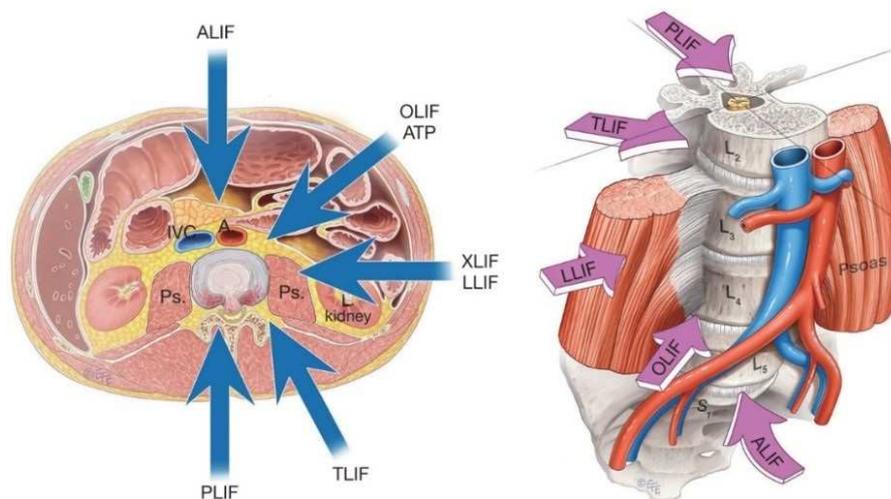


Abb. 2: Chirurgische Ansätze für Fusionstechniken (modifiziert nach Mobbs et al. 2015)

Als Erstes präsentierte Burns (1933) die Anterior Lumbar Interbody Fusion (ALIF) zur Therapie einer fortgeschrittenen Spondylolisthesis. Sie ermöglicht eine direkte Mittellinienansicht des Bandscheibenfachs und eine effiziente Ausräumung des Bandscheibenraums. Außerdem schont sie die paravertebrale Muskulatur und posterioren Bandstrukturen der Wirbelsäule (Hee et al. 2001; Mobbs et al. 2015; Talia et al. 2015). Allerdings besteht bei dieser Technik ein erhöhtes Risiko für Gefäß- und Nervenverletzungen (Baker et al. 1993; Talia et al. 2015). Darüber hinaus ist wie bei jeder Bauchoperation mit Narbenhernien, Atonien der vorderen Bauchmuskulatur und viszeralen Komplikationen wie Darmperforationen zu rechnen (Brian M Jurbala et al. 1997; Talia et al. 2015).

Cloward (1953) beschrieb die Technik der Posterior Lumbar Interbody Fusion (PLIF). Der posteriore Zugang vermeidet, im Vergleich zur ALIF-Technik, große vaskuläre Verletzungen und ermöglicht eine bilaterale Dekompression sowie

eine 360°-Fusion zwischen den Wirbelkörpern mit nur einer Inzision (Isiklar et al. 1996; Rajaraman et al. 1999; Sasso et al. 2003). Studien berichten allerdings von neurologischen Komplikationsraten zwischen 9,0 % bis 24,6 % (Okuda et al. 2006; Cheung et al. 2013). Aufgrund der Verletzungsgefahr des Conus medullaris kann die PLIF-Technik außerdem nur an der Lendenwirbelsäule angewendet werden (Provaggi et al. 2018).

Die Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (TLIF), eine modifizierte und unilaterale Operationstechnik der PLIF, wurde erstmals von Harms und Rolinger (1982) beschrieben. Sie erfordert keine anteriore Exposition und vermeidet daher alle vaskulären, abdominellen und neurologischen Komplikationen der ALIF-Technik (Rajaraman et al. 1999; Humphreys et al. 2001; Sasso et al. 2003). Da die Retraktion neuronaler Strukturen geringer ist als bei der PLIF-Technik, ist eine Durchführung oberhalb von L2 möglich. Dorsale Bandstrukturen, die zur Wiederherstellung der biomechanischen Stabilität des Segments und benachbarter Strukturen beitragen, werden ebenfalls geschont (Hsieh et al. 2007; Audat et al. 2012; Phan und Mobbs 2015). Die unilaterale Resektion der Facettengelenksfortsätze vergrößert außerdem die Fusionsfläche auf der kontralateralen Seite. Dementsprechend wurden mit dieser Technik Fusionsraten von ca. 90 % erreicht (Rickert et al. 2015). Zu den Einschränkungen der TLIF zählen die signifikante Muskelretraktion und -sektion, die langfristig zu postoperativen Schmerzen, verzögerter Rehabilitation und Bewegungseinschränkungen der Wirbelsäule führen können (Seng et al. 2013). Neuere minimal-invasive Varianten dieser Technik konnten bereits entwickelt werden, ohne jedoch eine höhere Fusionsrate oder eine geringere Komplikationsrate zu erzielen (Schwender et al. 2005; Peng et al. 2009).

Bei der Lateral Lumbar Interbody Fusion (LLIF) oder Extreme Lateral Interbody Fusion (XLIF) handelt sich um eine minimalinvasive Modifikation der ALIF-Technik, die durch einen direkten lateralen retroperitonealen Zugang zu den Lendenwirbeln gekennzeichnet ist (Ozgur et al. 2006). Durch den transpsoatischen Zugang werden zum einen Manipulationen der Aorta und Vena cava, zum anderen Verletzungen von neurologischer Strukturen und paraspinalen Muskeln vermieden (Baker et al. 1993; Chang et al. 1999). Einer der größten Nachteile des

transpsoatischen Zugangs ist das Risiko, beim Teilen des Musculus psoas den Plexus lumbalis zu verletzen und damit die nervale Versorgung der unteren Extremitäten zu schädigen (Knight et al. 2009).

Die Oblique Lumbar Interbody Fusion (OLIF)/ Anterior To Psoas (ATP), erstmals von Mayer (1977) beschrieben, definiert einen weiteren minimalinvasiven Operationszugang zwischen dem Peritoneum und dem Musculus psoas. Ähnlich dem LLIF-Ansatz erfordert die OLIF keine posteriore Operation, Laminektomie, Facetektomie oder Mobilisierung der spinalen oder paraspinalen Muskulatur. Im Gegensatz zum lateralen Transpsoas-Ansatz findet bei der OLIF-Technik die Dissektion vor dem Musculus psoas statt (Mobbs et al. 2015). Zu den potenziellen Risiken einer OLIF-Operation zählen, wie auch bei der ALIF-Technik, sympathische Dysfunktion und Gefäßverletzungen (Phan und Mobbs 2015). Allerdings treten Gefäßverletzungen seltener auf als bei der ALIF (Shimer 2016).

1.4 Cage-Implantate

1.4.1 Geschichte der Cage-Implantate

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts beinhaltete der Bandscheibenersatz autologe oder homologe Knochentransplantate, beispielsweise Rippen oder Beckenkammspäne, ohne eine unterstützende Matrix (Cotler et al. 1985). Diese zeigten zu einer Komplikationen wie eine verlängerte Heilungsdauer, einen vermehrten Blutverlust und Nervenverletzungen, zum anderen traten Transplantatabstoßungen, Implantateinbrüche und -verschiebungen auf, wodurch die Zwischenwirbelkörperhöhe nicht aufrechterhalten werden konnte (Cloward 1985; Brantigan 1994; Gertzbein et al. 1996). Diskutiert wurde deshalb über die Entwicklung von synthetischen Implantaten, sogenannte Cages, die eine hohe Primär- und Langzeitstabilität sowie geringe Dislokationstendenz ermöglichen und zugleich die bestmöglichen biologischen Voraussetzungen bieten sollten, um eine solide Knochenfusion zu gewährleisten (Rickert et al. 2015; Tarhan et al. 2015).

Bagby (1988) entwickelte deshalb Mitte der 1970er und Anfang der 1980er Jahre den ersten intervertebralen Cage, mit dem er cervikale Wirbelsäuleninstabilitäten

bei Pferden mit dem Wobbler Syndrom, einer Form der spondylarthrotischen Myelopathie, behandelte. Bei dem Bagby-Basket handelte es sich um einen 30 x 25 mm großen, hohlen, stark fenestrierten Zylinder aus rostfreiem Stahl (siehe Abb. 3). Mit diesen Implantaten erreichten er und sein Team eine Fusionsrate von 88 % (Bagby 1988; Kuslich et al. 1998). Durch die größere Dimensionierung und die Möglichkeit, autologe Spongiosa in und um den Cage anzulagern, konnte damit nicht nur eine hohe Fusionsrate erreicht werden, sondern auch die normale Bandscheibenhöhe erhalten bleiben. Ein Problem stellte das Elastizitätsmodul des Cages dar. Dieses unterschied sich deutlich von dem des physiologischen Knochens, was Instabilitäten und die Sinterung des Implanats begünstigte (Bagby 1988; Kuslich et al. 1998; Rickert et al. 2015).

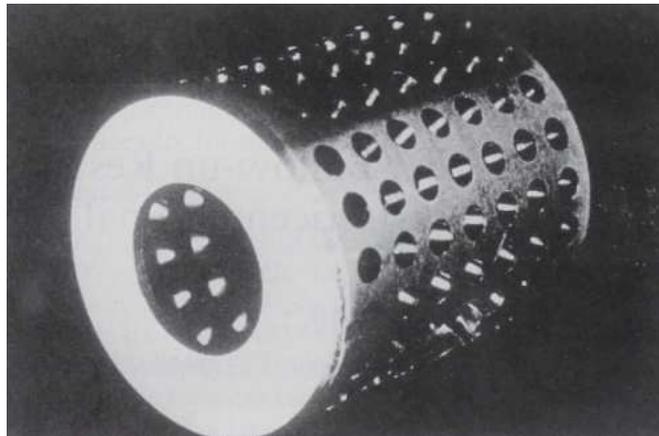


Abb. 3: Der Bagby-Basket (modifiziert nach Kuslich et al. 1998)

Durch bestimmte Modifizierungen des Materials und der physikalischen Charakteristika des Bagde-Cage entstanden in den 1990ern (Kuslich et al. 1998) die Bagby- und Kuslich-Implantate (BAK). Es handelte sich dabei um einen hohlen, porösen, zylindrischen, leicht konischen Titankorb mit einem äußeren Vierkantgewinde (siehe Abb. 4). Tests von Kuslich et al. (1998) zeigten, dass die Vorrichtung ausreichend starr war, um Wirbelsäulenkräften ohne Verformung oder Bruch standzuhalten und gleichzeitig porös genug, um das Durchwachsen von Spongiosa zu ermöglichen. Weiteren Stabilitätswachst ermöglichten die Gewinde, da sie beim Einbringen gut in Kontakt mit den knöchernen Endplatten traten (Rickert et al. 2015).



Abb. 4: Der Bagby- und Kuslich-Cage (modifiziert nach Kuslich et al. 1998)

Im Jahr 1992 wurde der BAK-Cage das erste Mal bei einem Menschen angewandt und 1996/97 für anteriore und posteriore interkorporelle Fusionen sowie dem laparoskopischen Zugangsweg zugelassen (Kuslich et al. 1998). Die folgenden Jahre zeigten hohe Fusionsraten und gute Ergebnisse der PLIF-Prozedur unter Anwendung des BAK-Cages ebenso wie Fortschritte in der Entwicklung der Implantate und Setzinstrumente (Ray 1997; Kuslich et al. 1998).

Harms entwickelte 1986 einen zylindrisch geformten, höhenverstellbaren Meshcage aus Titan (siehe Abb. 5). Durch die schmale Kontaktfläche des Cages zu den Endplatten ist das Fusionsareal vergrößert und ermöglicht damit durch Einbringen des Knochenmaterial eine maximale Kontaktfläche für eine erfolgreiche Fusion (Rickert et al. 2015; Tarhan et al. 2015). Allerdings wird hierbei ein Kompromiss eingegangen, da durch die Minimierung des Kontaktbereiches mit der knöchernen Endplatte das Risiko für eine Sinterung des Implantats besteht (Steffen et al. 2000). Als weiterer Vorteil erweist sich das Elastizitätsmodul des Harms-Cages, welches im Vergleich zu seinen Vorgängern deutlich näher an dem des physiologischen Knochens liegt (Rickert et al. 2015). Auch wenn dieses Titandrahtgeflecht eine deutlich höhere Stabilität besitzt (Kandziora 2003), sollte zusätzlich immer eine posteriore Instrumentierung erfolgen, damit Scher- und Biegekräfte vermieden werden (O'Brien et al. 1986; Rickert et al. 2015). Initial als Implantat für den Wirbelkörperersatz entworfen,

wird der Harms-Cage noch heute in der Fusionschirurgie angewandt, seit 1991 zusätzlich bei der interkorporellen Fusion (Rickert et al. 2015; Tarhan et al. 2015).

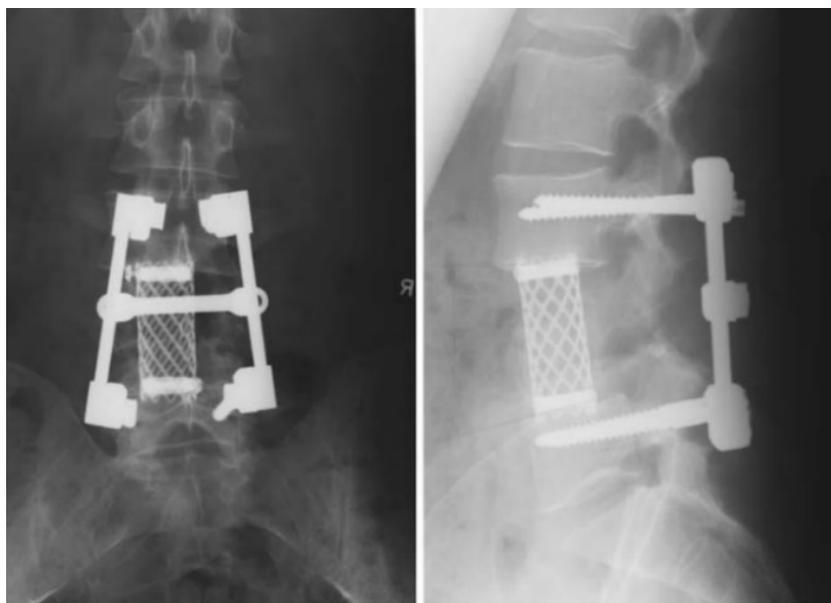


Abb. 5: Harms-Cage in postoperative Röntgenaufnahmen (modifiziert nach Klezl et al. 2007)

1999 wurde der Brantigan-Cage, ein hohles rechteckiges Implantat aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, zur Behandlung von degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen entwickelt (siehe Abb. 6). Dieser Carbon-Fiber-Reinforced-Polymer-Cage (CFRP) besteht aus Polyetherketonetherketonketon (PEKEKK) und ist mit Carbon-Fasern verstärkt (Brantigan et al. 2000). Der Cage ist mit "Zähnen" ausgestattet, um sich einer Retropulsion widersetzen zu können. Er besitzt Querstreben, um den statischen und dynamischen Belastungen standzuhalten und einen Hohlraum, um mit autologem Knochen-Transplantat befüllt werden zu können (Brantigan et al. 2000; Rickert et al. 2015). Dabei hat das Kohlenstoffmaterial zwei Vorteile gegenüber Implantaten aus Titan oder anderen Metallen. Einerseits ist der Kohlenstofffaserverbund strahlendurchlässig, sodass normale Röntgenverfahren eine Knochenheilung ohne die verdeckenden Schatten von eingebrachten Objekten aus Metall darstellen können. Andererseits hat die Struktur ein Elastizitätsmodul, das nahezu mit dem von kortikalem Knochen identisch ist, wodurch es zu einer besseren Last- und Spannungsverteilung kommt sowie die zu erwartende Einbruchrate verringert (Brantigan und Steffee 1993; Brantigan et al. 2000; Brantigan et al. 2004) .



Abb. 6: CFRP-Cage aus PEKEKK (modifiziert nach Brantigan et al. 2004)

Polyetheretherketon (PEEK) findet seit 1997 Anwendung als Cagematerial bei Stabilisierungsoperationen (Rickert et al. 2015). Aufgrund seines knochenähnlichen Elastizitätsmoduls, zehnmal niedriger als Titan, verkleinert es das Risiko der Cage-Sinterung. Dadurch ist ein geringeres Implantatversagen und eine verbesserte Fusionsrate zu erwarten (Cutler et al. 2006; Niu et al. 2010; Rao et al. 2014; Rickert et al. 2015). PEEK besitzt außerdem eine hohe Röntgentransparenz, was eine einfachere Visualisierung des Knochenwachstums ermöglicht (Cutler et al. 2006; Niu et al. 2010). Neben PEEK zählen Titan und Carbon zu den etablierten Cagematerialien der Fusionschirurgie, da Studien ebenfalls zeigen konnten, dass beim Einsatz von PEEK Implantaten gerade aufgrund der sehr hohen Elastizität ein erhöhtes Risiko für die Entstehung von Pseudarthrosen existiert (Schimmel et al. 2016; Fatima et al. 2020).

1.4.2 Cage-Design

Alle bis heute entwickelten Cageformen können in drei Modelle unterteilt werden: Vertical-Ring-, Horizontal-Cylinder- und Open-Box-Cages (Weiner und Fraser 1998). Aufgrund ihrer Größe werden die Vertical-Ring-Cages nur bei ventralen Zugängen (ALIF) eingesetzt. Die Horizontal-Cylinder-Cages, wie beispielsweise der BAK-Cage, ermöglichen eine Wiederherstellung der Bandscheibenhöhe und können aufgrund ihrer horizontalen Form durch ein kleines Fenster implantiert werden, wodurch die postoperative Instabilität verringert wird (Weiner und Fraser

1998). Es wurde gezeigt, dass diese Cages das neuroforaminale Volumen bis zu 22,9 % und die neuroforaminale Fläche bis zu 45,1 % vergrößern. Außerdem bieten sie hervorragende Stabilität und Beständigkeit gegen Druckbelastungen (Chen et al. 1995). Allerdings kann durch die zylindrische Form deutlich weniger Knochenmaterial in den Cage eingebracht werden, wodurch die maximale Kontaktfläche zu den angrenzenden Endplatten im Vergleich zu den Open-Box-Cages stark verkleinert ist (Weiner und Fraser 1998; Steffen et al. 2000). Diese Faktoren haben einen bedeutenden Einfluss auf das Ergebnis einer soliden Fusion. Open-Box-Cages sind zur Stabilisierung mit Antirutschdornen oder einer gewellten Kontaktfläche versehen. Sie zeigten in Verbindung mit zusätzlicher Pedikelschraubeninstrumentierung sehr gute Fusionsraten und einen konstanten Erhalt der Bandscheibenhöhe (Brantigan et al. 2000). Bis heute werden diese Cages in den verschiedensten Formen (flach und gerade, bikonvex oder bananenförmig etc.) hergestellt und eingesetzt (Cho et al. 2008).

Um mit den Implantaten die physiologische Lendenlordose und sagittale Balance der Wirbelsäulen wiederherzustellen, empfiehlt es sich, diese geometrischen Gegebenheiten in der Cageform, beispielsweise durch eine größere Höhe anterior als posterior, zu berücksichtigen (Weiner und Fraser 1998). Obwohl initiale Cage-Modelle an dieser Zielsetzung scheiterten, haben es neuere Cages mit keilförmigem Design geschafft, gute Resultate zu erzielen (Gödde et al. 2003; Sembrano et al. 2017)

1.5 Sagittales Alignment

1.5.1 Definition und klinische Bedeutung

Aufgrund der positiven Entwicklungen in der Fusionschirurgie versucht die klinische Forschung immer mehr Erkrankungen der Wirbelsäule ganzheitlich zu betrachten, anstatt den Hauptfokus auf den pathologischen Lokalbefund zu richten. Dabei gewinnt in wissenschaftlichen Arbeiten vor allem der Begriff des Sagittalen Alignments (SA) immer mehr an Bedeutung (Diebo et al. 2015). Das SA, in der Literatur oftmals als sagittales Profil oder sagittale Balance bezeichnet, beschreibt die ideale Ausrichtung in der sagittalen Ebene, die sich aus dem

Zusammenspiel verschiedener Faktoren ergibt. Jede Wirbelsäulenpathologie, die dieses Gleichgewicht verändert, verursacht eine sagittale Fehlstellung und deren Kompensationsmechanismen (Diebo et al. 2015). In der Literatur werden verschiedene radiologische Parameter zur Beurteilung des SA beschrieben. Dazu zählen vor allem die Sagittal Vertical Axis (SVA), die den Abstand zwischen einem von C7 gefällten Lot zur Hinterkante der sakralen Endplatte beschreibt, die Pelvic Incidence (PI), die den Winkel zwischen der Senkrechten zur SWK1-Endplatte und der Linie vom Zentrum der Femurköpfe zum Mittelpunkt der sakralen Endplatte darstellt, der Sacral Slope (SS), der den Winkel zwischen der Horizontalen Linie und der sakralen Endplatte definiert und der Pelvic Tilt (PT), der den Winkel zwischen der Vertikalen und einer Linie vom Femurkopfzentrum zum Mittelpunkt der sakralen Endplatte kennzeichnet (Diebo et al. 2015; Aichmair et al. 2019). Diese beckenspezifischen Parameter spielen eine besondere Rolle in der Betrachtung des sagittalen Profils, da die Beckenform des Menschen, in Zusammenspiel mit der zervikalen und lumbalen Lordose, überhaupt erst einen balancierten aufrechten Gang ermöglicht (Diebo et al. 2015; Aichmair et al. 2019).

Roussouly et al. (2005) analysierten und klassifizierten häufige Variationen im sagittalen Profil der Wirbelsäule sowie spezifische Parameter des Kreuzbeins und Beckens (siehe Abb. 7). Sie definierten vier verschiedene Haltungstypen (Laouissat et al. 2018; Aichmair et al. 2019):

- Typ 1 hat eine geringe PI, LL und SS ($<35^\circ$), somit ein weniger tief stehendes Becken. Der Lordoseapex liegt im Zentrum des LWK5 und die thorakale Kyphose (TK) hat einen langbogigen Verlauf.
- Typ 2 hat ebenfalls kleine Beckenparameter (PI, SS). Die LL und TK sind relativ flach und der Inflektionspunkt dazwischen ist im Vergleich zu Typ 1 höher und weiter anterior. Der Lordoseapex liegt in der Mittel von L4.
- Typ 3 beschreibt den Normaltyp bezüglich der PI, SS, LL und TK und ist damit gut ausbalanciert. Der Apex der Lordose liegt im Zentrum von L4.
- Typ 4 hat einen großen SS ($>45^\circ$) und damit eine große PI. Das tiefe Becken stützt die ausgeprägte LL und TK. Der Apex der Lordose ist in der Mitte von L3 oder höher lokalisiert (Laouissat et al. 2018; Aichmair et al. 2019).

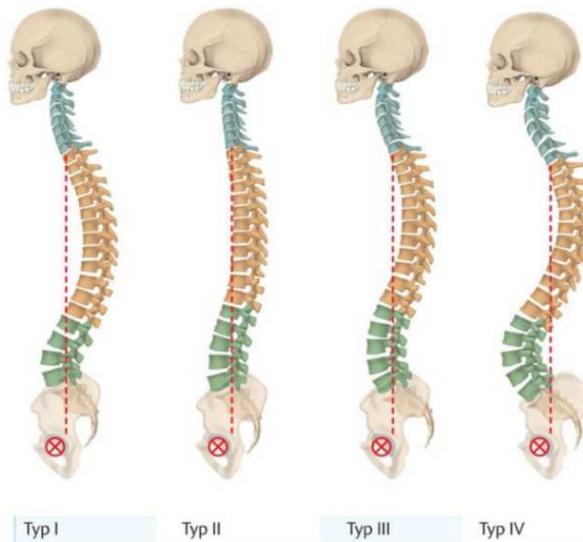


Abb. 7: Vier Haltungstypen nach Roussouly (modifiziert nach Aichmair et al. 2019)

Die verschiedenen physiologischen Haltungstypen haben biomechanische Konsequenzen für das sagittale Profil der Wirbelsäule und die segmental wirkenden Kräfte (Legaye und Duval-Beaupere 2008; Aichmair et al. 2019).

Bei einer großen LL verläuft die Schwerelinie hauptsächlich dorsal der LL-Kurve. Das hat zur Folge, dass die Facettengelenke mehr kompressionsbelastet sind als die lumbalen Bandscheiben und dadurch ein hoher Biegestress auf der Pars interarticularis des kaudalen Wirbels entsteht. In Kombination mit den Scherkräften, die bei einem großen SS auftreten, besteht vor allem für Typ 4 ein erhöhtes Risiko für einer isthmischen Spondylolisthesis und Spondylolyse (Labelle et al. 2011; Aichmair et al. 2019).

Durch die weiter nach anterior verlagerte Schwerelinie bei Typ 1 und 2 werden die horizontal aufeinander stehenden Bandscheibenfächer stärker belastet. Das frühe Entstehen von degenerativen Bandscheibenerkrankungen wird dadurch begünstigt (Rajnic et al. 2002; Aichmair et al. 2019).

Der spinopelvine Morphotyp sowie das gesamte Wirbelsäulenprofil des Patienten sollte ebenfalls bei korrigierenden Eingriffen berücksichtigt werden (Aichmair et al. 2019). Als Zielvorgabe für das Erreichen guter klinischer Ergebnisse nach operativen Eingriffen können folgende Kriterien eingesetzt werden: Erstens sollte die SVA nicht weiter als 5 cm vor der Hinterkante des SWK1 fallen; zweitens

sollte der PT kleiner als 20 Grad bleiben; drittens sollte die Formel $LL = PI \pm 9^\circ$ erzielt werden (Schwab et al. 2010; Aichmair et al. 2019).

Schon bei kleinen Eingriffen an der Wirbelsäule und konservativen Behandlungen auf segmentaler Ebene sollten deshalb sagittale Fehlstellungen berücksichtigt und korrigiert werden (Diebo et al. 2015). Mehreren Studien beschreiben einen Zusammenhang zwischen radiologischen Parametern und der gesundheitsbezogenen Lebensqualität und stellen fest, dass Patienten im klinischen Outcome von einer Verbesserung der sagittalen Parameter profitierten (Blondel et al. 2012; Smith et al. 2013; Terran et al. 2013). Für an Osteoporose erkrankte Patienten ist die veränderte Biomechanik der Wirbelsäule einer der wichtigsten Risikofaktoren, der zur Entstehung von kompressionsbedingten Frakturen beiträgt (Baek et al. 2015). Im Gegensatz dazu ermöglicht eine Optimierung des sagittalen Profils eine Verbesserung der Lebensqualität bei Osteoporose und anderen Wirbelsäulenpathologien, wie beispielsweise Skoliose (Lida et al. 2015; Miyakoshi et al. 2015).

Nach dorsalen Fusionsoperationen spielt die korrekte Ausrichtung der sagittalen Ebene eine besonders wichtige Rolle. Bei Patienten mit sagittalen Anomalien nach dorsaler Fusionsoperation aufgrund von Osteochondrose zeigt sich postoperativ eine erhöhte Inzidenz für Degeneration der angrenzenden lumbalen Segmente. Eine Retrolisthesis tritt dabei am häufigsten auf (Kumar et al. 2001).

Außerdem zeigen Studien, dass die fehlerhafte Korrektur von PT und LL zur Schmerzentstehung im Iliosakralgelenk und Hüftgelenk beiträgt. Deshalb sollte bei großen chirurgischen Eingriffen an der Wirbelsäule nicht nur auf eine stabile Fusion geachtet werden, sondern auch die lumbopelvine sagittale Balance berücksichtigt werden (Lazennec et al. 2000; Shin et al. 2013).

1.5.2 Cage-Geometrie und sagittales Profil

Um während der Operation vorhandene Fehlstellungen zu korrigieren und neue Dysbalancen zu vermeiden, haben Operateure die Möglichkeit über die Geometrie der modernen Cages das sagittale Profil zu beeinflussen. Die keilförmigen (lordosierten) Cages haben sich dabei als besonders nützlich erwiesen, insbesondere um die LL zu korrigieren. Gödde et al (2003) stellten bei postoperativen

Analysen nach PLIF fest, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen rechteckigen und keilförmigen Cages gibt. Während die SL in der rechteckigen Gruppe von 10° auf 2° abnahm, stieg die SL in der keilförmigen Gruppe von 2° auf über 16° an. Auch die Ergebnisse der LL zeigten einen inversen Verlauf. Die Gruppe mit den rechteckigen Cages verzeichnete einen Abfall von 55° auf 48° , die Gruppe der keilförmigen Cages einen Anstieg um 8° , von 45° auf 53° (Gödde et al. 2003).

Sembrano et al. (2017) zeigten bei radiographischen Analysen nach LLIF ähnliche Ergebnisse. Durch den lordotischen Winkel des Cages stieg die SL postoperativ um $2,8^\circ$ ($p = 0,01$) an. Die nicht-lordosierten Cages konnten im Gegensatz dazu nur einen Lordosezuwachs von $0,6^\circ$ ($p = 0,71$) verzeichnen. Außerdem war auch ein signifikanter Unterschied ($p < 0,01$) bei der anterioren und posterioren Bandscheibenhöhe nachzuweisen, was eine direkte Dekompression der Wirbelsäule ermöglichte (Sembrano et al. 2017).

Beide empfahlen, dem lordosierten Cage bei dorsaler Fusionsoperation, aufgrund seines vorteilhaften Effekts auf die sagittale Balance und deren Kompensationsmechanismen bei pathologischen Situationen, den Vorzug zu geben.

1.6 Fragestellung

Durch die Entwicklung der intervertebralen Implantate hat sich in den letzten Jahrzehnten die Anwendungshäufigkeit von interkorporellen Fusionsoperationen stark gesteigert (Deyo et al. 2005). Bereits Anfang des 21. Jahrhunderts erreicht jede der zugelassenen Fusionstechniken durch Unterstützung der verschiedenen Cage-Modelle zufriedenstellende Fusionsraten von bis zu 100 % (Fritzell et al. 2002; Bono und Lee 2004; Niemeyer et al. 2004; Hackenberg et al. 2005; Houten et al. 2006). Aufgrund dieser Entwicklung ist es der Forschung heutzutage möglich, neben den lokalen Fusionsergebnissen auch eine ganzheitliche Betrachtungsweise für die Ergebnisse der lumbalen Wirbelsäulenoperationen zu entwickeln. Dabei wurde in den letzten Jahren ein besonderes Augenmerk auf die postoperative Veränderung verschiedener radiologischer Parameter gerichtet, mit der primären Zielsetzung eine optimale sagittale Balance zu ermöglichen. Es existieren viele Studien, die eine Verbesserung der radiologischen Parameter (LL und SL) durch die Implantation von lordotischen Cages erzielten. Es gibt jedoch keine dem Autor bekannte Studie, die untersuchte, auf welche Art und Weise sich diese Veränderungen der radiologischen Parameter nach TLIF auch im klinischen Outcome widerspiegelt.

Ziel der Studie ist es deshalb herauszufinden, in welchem Ausmaß die Geometrie des Cages nach dorsaler Spondylodese mit Hilfe der TLIF-Technik die klinischen Ergebnisse beeinflusst. Im Zuge dessen soll diese Arbeit die Beantwortung folgender zentraler Fragestellungen ermöglichen:

1. Führen die lordotischen Cages mit der TLIF-Technik zu einer Verbesserung der radiologischen Parameter (LL, SL und PT) und Rekonstruktion des sagittalen Alignments im Sinne einer Re-Lordosierung der Lendenwirbelsäule?
2. Ermöglichen die prognostizierten radiologischen Verbesserungen auch bessere klinische Ergebnisse, die sowohl durch die klinische Untersuchung als auch durch die Fragebogenevaluationen erhoben wurden?

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

An der Studie nahmen 77 Patienten¹ teil, die im Zeitraum vom 17.11.2014 bis 03.02.2017 mittels TLIF in der orthopädischen Universitätsklinik Tübingen operiert wurden. Der retrospektive Anteil dieser Arbeit befasste sich mit der Analyse der prä- und postoperativen Röntgenaufnahmen der Studienteilnehmer unter Berücksichtigung verschiedener radiologischer Parameter. Der prospektive Anteil beinhaltete sowohl eine dreiteilige Fragenbogenevaluation als auch eine klinisch-orthopädische Untersuchung der Wirbelsäule. Die Erhebung der klinischen Parameter erfolgte im Rahmen einer Nachuntersuchung durchschnittlich 3,84 Jahre (SD 0,9) nach der Operation.

Die Teilnahme der Probanden an dieser Studie unterlag folgenden Kriterien:

1. Die Versorgung mit einer TLIF fand während der letzten zehn Jahre statt.
2. Die operative Behandlung erfolgte mono- oder bisegmental sowie ausschließlich an der Lendenwirbelsäule.
3. Der Operationsindikation lag eine degenerative Wirbelsäulenerkrankung (Spondylolisthesis oder Osteochondrosis) zugrunde.
4. Eine unterschriebene Einverständniserklärung (nach Aufklärung) zur Studie lag vor.

Unter folgenden Kriterien durften Probanden nicht an der Studie teilnehmen:

1. Der Operationsindikation war auf eine infektiöse oder tumoröse Wirbelsäulenerkrankung zurückzuführen.
2. Die TLIF fand über mehr als zwei Segmente und nicht ausschließlich an der Lendenwirbelsäule statt.
3. Bei Teilnahme an anderen klinischen Studien zur Prüfung von Pharmazeutika, biologischen Substanzen oder sonstigen Medizinprodukten.

¹ In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit die männliche Form verwendet. Sie bezieht sich aber auf Personen beider Geschlechter.

Das Studiendesign entsprach den Vorgaben der Ethik-Kommission an der Medizinischen Fakultät der Eberhard Karls Universität und am Universitätsklinikum Tübingen. Die Zulassung dieser Studie erfolgte am 05.08.2019 unter dem Zeichen 283/2019BO2. Gemäß der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) erfasste die Studie keine personenbezogenen Daten, wie beispielsweise Name und Geburtsdatum.

2.2 Operationstechnik der TLIF

Die Operationstechnik dieser Studie orientierte sich hauptsächlich an der 1998 veröffentlichten Publikation von Jürgen G. Harms und Dezö Jeszenszky zur TLIF (Harms und Jeszenszky 1998). Zur Optimierung der Methode wurden in den letzten Jahren nur wenige Schritte modifiziert.

Die Positionierung des Patienten fand in entlordosierender Bauchlagerung auf einem strahlendurchlässigen Wirbelsäulentisch statt. Zuerst stellte der Operateur das zu operierende Segment mittels C-Bogen dar. Nach dreimaliger Desinfektion und anschließendem sterilen Abdecken des OP-Gebiets begann der Operateur mit einer longitudinalen Mittellinieninzision über dem betroffenen Segment, wobei er Cutis und Subkutis durchtrennte. Nach paraspinöser Inzision der Thorakolumbalfaszie löste der Operateur diese von der Mittellinie ab und mobilisierte anschließend mit dem scharfen Raspatorium subperiostal die autochthone Rückenmuskulatur. Der Operateur entfernte mit Meißel und Luer sowohl die untere Gelenkfacette des kranialen Wirbels als auch die obere Gelenkfacette des kaudalen Wirbels, was den Zugang zum Foramen intervertebrale eröffnete. Nach röntgenradiologischer Überprüfung der Pedikelhöhe und der Pedikeleingangsebene setzte der Operateur Bohrkanäle und kontrollierte mit dem Pedikeltaster die exakte Lage. Nach sicherer Bestimmung der allseitigen knöchernen Begrenzung erfolgte die Vermessung der Schraubenlänge (polyaxial) und des Schraubendurchmessers sowie das anschließende Eindrehen der Pedikelschrauben in die Bohrkanäle. Die nachfolgende Kontrolle und Dokumentation der Schraubenlage fand mittels Bildverstärker in seitlichem und anterior-posteriorem (a. p.) Strahlengang statt. Bei zu geringer Bandscheibenhöhe setzte der Operateur einen Osteotomiespreizer zwischen die Dornfortsätze, um eine Distraction zu erreichen.

Anschließend erfolgte zum einen die Identifizierung der Segmentbandscheibe, zum anderen die sukzessive Darstellung und Dekompression der Nervenwurzel sowie die Medialisierung des Duralsacks mittels Dissektor. Durch eine Inzision im Anulus fibrosus entfernte der Operateur daraufhin das Bandscheibenmaterial mittels Küretten und Raffeln verschiedener Größen ohne dabei die Dura und Nervenwurzel zu verletzen. Die Grund- und Deckplatten der direkt angrenzenden Wirbel wurden ebenfalls von Knorpel befreit und kürettiert. Im Anschluss daran folgte die Bestimmung der Cage-Größe durch die Einlage eines Probe-Cages. Den mit angefallener Eigenspongiosa und Hydroxylapatit-Knochenersatzmaterial (Ostim®) befüllte Cage implantierte der Operateur unter Bildwandlerkontrolle in das Bandscheibenfach. Durch das Einbringen zweier Stäbe in vertikaler Richtung wurden die Pedikelschrauben miteinander verbunden und ermöglichten so eine leichtere Reposition und Stabilisierung (Harms und Rolinger 1982; Salehi et al. 2004). Wenn unter Berücksichtigung der segmentalen Lordose und des Wirbelsäulenprofils die Positionierung des TLIF-Cages und der Pedikelschrauben in der perioperativen Röntgen-Kontrolle erfolgreich war, beendete der Operateur die Instrumentierung. Hierauf erfolgte die Dekortikation mithilfe eines Meisels und die Anlagerung der restlichen Eigenspongiosa zur Induktion der knöchernen Spondylodese. Gelita, ein lokales Hämostatikum, wurde ebenfalls über den dekomprimierten Arealen eingelegt. Der ausgiebigen Spülung, Blutstillung und Drainageeinlage schloss sich eine transossäre Refixation der Muskulatur, gefolgt vom schichtweisen Verschluss der Wunde (Fasziennaht, Subkutannaht, Subkutandrainage und Hautnaht) und röntgenradiologische Dokumentation des Operationsergebnisses in zwei Ebenen, an.

2.3 Implantate

Zur Anwendung kamen DEVEX™-Cages der Firma DePuy International Ltd. (Raynham, MA, U.S.) aus Titan (siehe Abb. 8). Für die Implantation standen Cage-Systeme mit verschiedenen Lordosewinkeln zur Auswahl, wobei 0° einem nicht-lordotischen/parallelen und 5° einen lordotischen/keilförmigen Cage entspricht. Bei der Studienpopulation kamen beide Varianten zum Einsatz. Da die lordotischen Cages erst später zur Verfügung standen, erfolgte die Implantation zu

einem späteren Zeitpunkt. Deshalb wurde darauf geachtet, Patienten in die Studie einzubinden, deren Operationen möglichst nahe am Zeitraum der Umstellung (2015/2016) lagen, um einen vom Operationszeitpunkt abhängigen Bias möglichst gering zu halten. Alle Cages standen in verschiedenen anterioren Höhen (7, 9, 11 und 13 mm) zur Verfügung, die der Operateur gemäß der individuellen Bandscheibenhöhe patientenspezifisch selektierte. Bei den lordotischen Cages war die posteriore Höhe 2 mm kleiner als die anteriore Höhe, während sie bei den nicht-lordotischen Cages gleich war. Die Breite (10mm) und Länge (28mm) beider Cages waren identisch.

Die dorsale Spondylodese erfolgte mit dem Schrauben-Stangen-System der Firma Depuy-Synthes unter Verwendung von Expedium Polyaxialschrauben.



Abb. 8: DEVEK-Cages der Firma Depuy Synthes

2.4 Radiologische Untersuchung

2.4.1 Röntgenologische Untersuchungstechnik

Die konventionellen Röntgenaufnahmen der Lendenwirbelsäule wurden in zwei Ebenen (seitlich und a. p.) für alle Studienteilnehmer prä- und postoperativ angefertigt und vermessen. Die Studie inkludierte nur Bilder in stehender Position, um die Auswirkungen des Fusionsverhaltens auf das sagittale Profil und die Lendenlordose optimal beurteilen zu können. Die Aufnahmen erfolgten standardisiert mit

einem Fokus-Film-Abstand (FFA) von 115 cm in der a.p.- und seitlichen Projektion. Anschließend erfolgte die Vermessung der digitalisierten Bilder mithilfe des Picture Archiving and Communication Systems (Version 4.0 SP11, General Electric, Boston, MA, USA). In den durchgeführten Röntgenaufnahmen wurden bei allen Patienten die LL, die SL, der PT, der SS und die PI prä- und postoperativ gemessen.

2.4.2 Lumbale und segmentale Lordose

Die Bestimmung der Gesamtlordose (siehe Abb. 9) fand mit Hilfe des Cobb-Winkels zwischen einer Linie an der Deckplatte von S1 und einer Linie an der Deckplatte von L1 statt, dessen Normalwert 26 bis 76° beträgt (Aichmair et al. 2019). Die Messung der segmentalen Lordose erfolgte über den Cobb-Winkel zwischen einer an der Grundplatte des kranialen Wirbelkörpers angelegten Linie und einer an der Deckplatte des kaudalen Wirbelkörpers angelegten Linie (siehe Abb. 9). Im Falle einer bisegmentale Fusion wurde zur besseren Vergleichbarkeit die SL beider fusionierten Segmente gemessen und daraus das arithmetische Mittel gebildet.

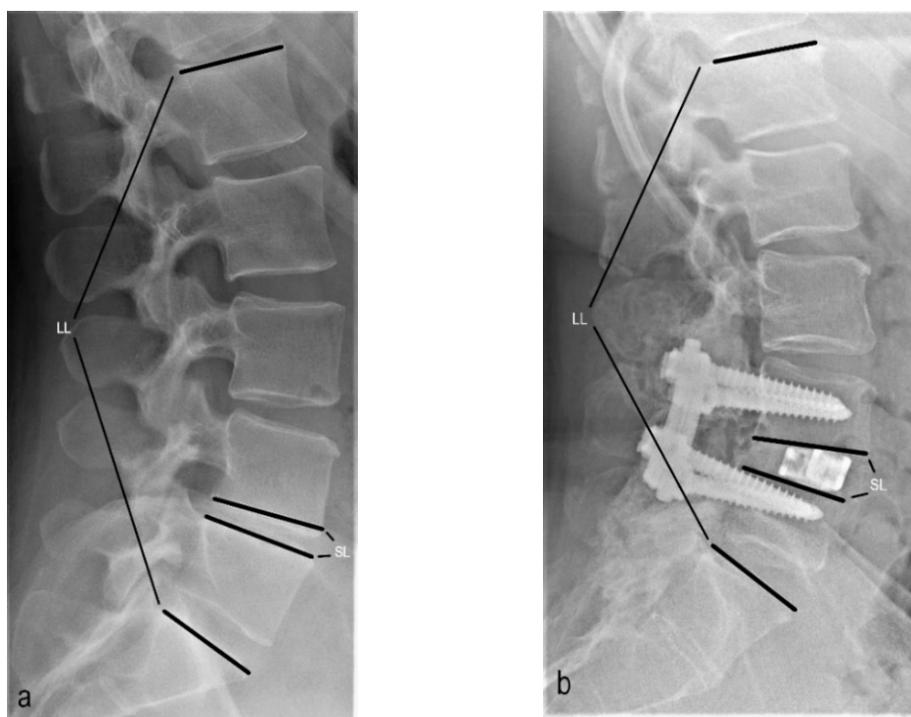


Abb. 9: Bestimmung der lumbalen und segmentalen Lordose präoperativ (a) und postoperativ (b).

2.4.3 Spinopelvine Parameter

Die PI (siehe Abb. 10 und 11) beschreibt den Winkel zwischen einer Linie vom Zentrum des Hüftkopfes zum Mittelpunkt der sakralen Endplatte (\overline{oa}) und einer Linie senkrecht zur Mitte des ersten Sakralwirbelkörpers (SWK1). Die sakrale Endplatte ist durch die Linie (\overline{bc}) definiert, die zwischen der hinteren oberen Kante des Os sacrum und der vorderen Spitze der S1-Endplatte am Promontorium ossis sacri verläuft. Wenn die Femurköpfe nicht perfekt überlagert sind (siehe Abb. 10 und 11), wird die Mitte jedes Femurkopfes markiert und der Mittelpunkt (o) der Verbindungslinie (\overline{pq}) zwischen den Femurköpfen verwendet (O'Brien et al. 2008; Aichmair et al. 2019). Bei Männern liegen die physiologischen Werte bei $53^\circ \pm 10^\circ$ und bei Frauen bei $48^\circ \pm 7^\circ$ (Legaye et al. 1998).

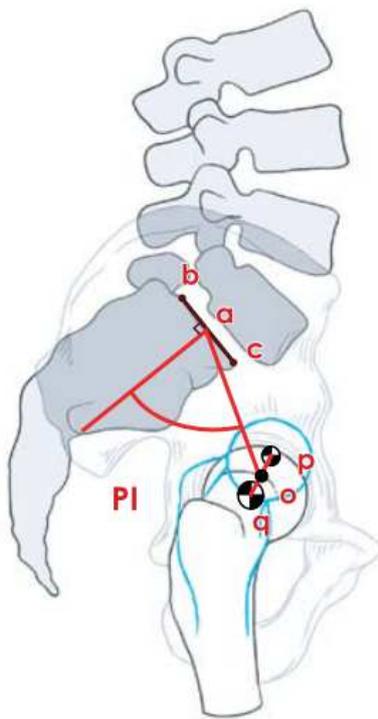


Abb. 10: Schematische Bestimmung der Pelvic Incidence (modifiziert nach O'Brien et al. 2008)

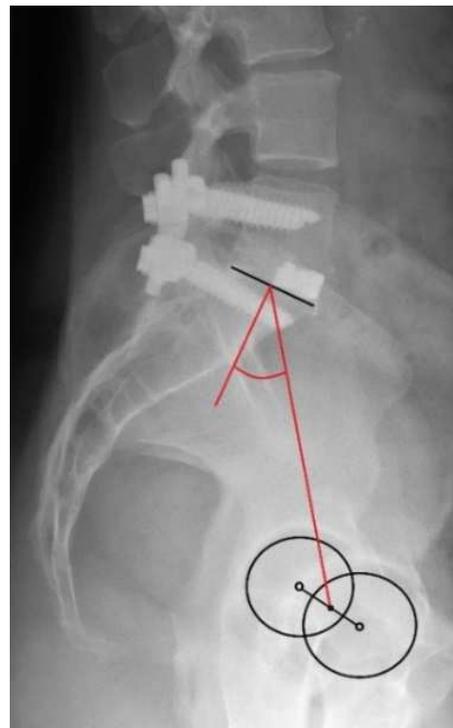


Abb. 11: Bestimmung der Pelvic Incidence

Der PT (siehe Abb. 12 und 13) definiert den Winkel zwischen der vertikalen Referenzlinie (VRL) und einer Linie (\overline{oa}), die zwischen dem Mittelpunkt der Deckplatte von SWK1 (a) und dem Femurkopfbereich (o) verläuft. Die PI beeinflusst

den PT, weil sie sich die Linie \overline{oa} und die sakrale Endplatte als gemeinsame Referenzlinie teilen. Der PT besitzt entweder einen positiven Wert, falls die Linie \overline{oa} hinter der VRL liegt, oder einen negativen Wert, wenn die Linie \overline{oa} vor der VRL liegt (O'Brien et al. 2008; Aichmair et al. 2019). Die physiologischen Werte des PT liegen bei Männern bei $12^\circ \pm 7^\circ$ und bei Frauen bei $10^\circ \pm 5^\circ$ (Legaye et al. 1998).

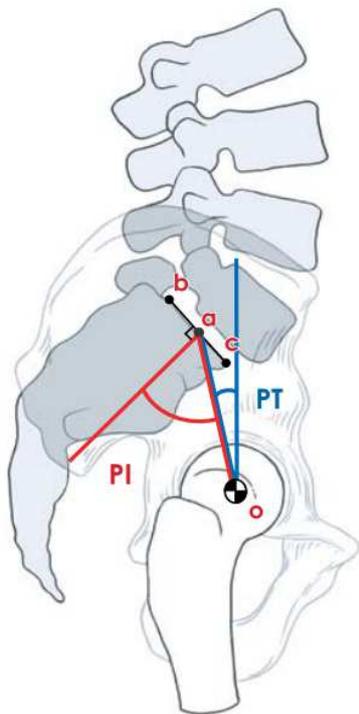


Abb. 12: Schematische Bestimmung des Pelvic Tilt (modifiziert nach O'Brien et al. 2008)

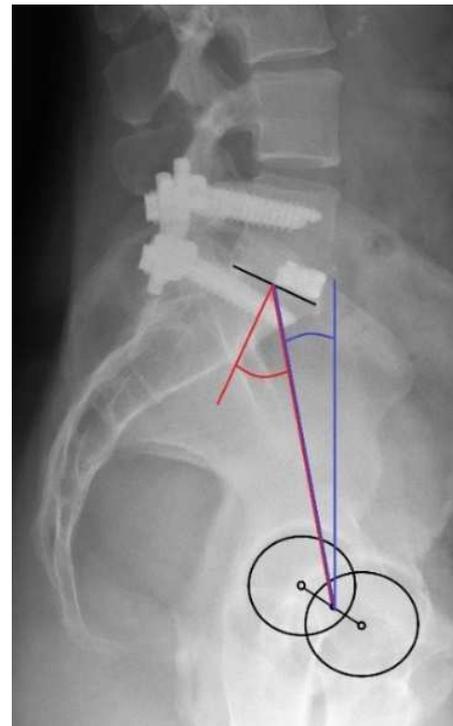


Abb. 13: Bestimmung des Pelvic Tilt

Der SS (siehe Abb. 14 und 15) definiert den Winkel zwischen einer horizontalen Referenzlinie und der Linie über der sakralen Endplatte (\overline{bc}). Der SS steht in Beziehung zu PI und PT, da sie eine gemeinsame Referenzlinie \overline{bc} entlang der Deckplatte SWK1 aufweisen (O'Brien et al. 2008; Aichmair et al. 2019). Die physiologischen Werte liegen bei Männern bei $42^\circ \pm 9^\circ$ und bei Frauen bei $38^\circ \pm 8^\circ$ (Legaye et al. 1998).

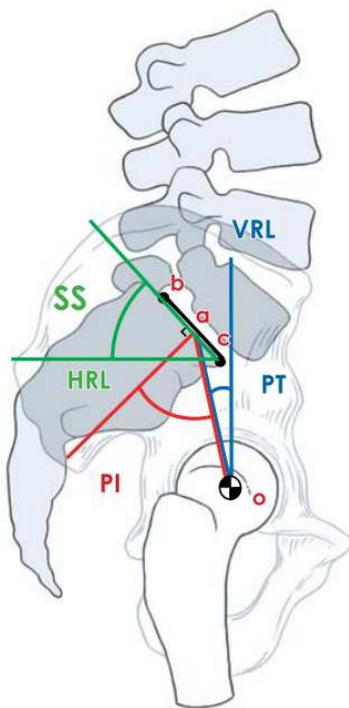


Abb. 14: Schematische Bestimmung des Sacral Slope (modifiziert nach O'Brien et al. 2008)



Abb. 15: Bestimmung des Sacral Slope

Mit der Gleichung $PI = PT + SS$ besteht die Möglichkeit, einen der Parameter aus den anderen zu berechnen (O'Brien et al. 2008). Die PI wird aus statisch, anatomischen Strukturen gemessen und ist damit konstant. PT und SS hängen dagegen von der Winkelposition des Kreuzbeins/Beckens in Bezug auf die Femurköpfe ab, die sich beim Stehen, Sitzen und Liegen ändern. Des Weiteren sind diese Parameter durch Beugung und Streckung im lumbosakralen Bereich beeinflussbar. Deshalb ist es zielführend, die Aufnahmen möglichst einheitlich und leicht reproduzierbar in stehender und aufrechter Position durchzuführen. (O'Brien et al. 2008).

2.5 Fragebogenevaluation

Im Rahmen der Nachuntersuchung beantworteten die Patienten drei Fragebögen (siehe Anhang) zur Evaluierung ihres aktuellen Gesundheitszustandes. Dabei lag der primäre Fokus auf der präexistierenden Wirbelsäulenpathologie. Als standardisierte und etablierte Verfahren zur Erfassung von Schmerz- und

Funktionsstatus bei Patienten mit chronischen Rückenschmerzen kamen der Oswestry Disability Index (ODI), der Roland and Morris Score (RMS) und die Visuelle Analoge Skala (VAS) zur Anwendung. Ziel war es, die mit verschiedenen Cages fusionierten Gruppen in ihrem postoperativen klinischen Outcome zu vergleichen und eventuelle Unterschiede zu analysieren.

2.5.1 Oswestry Disability Index

Der ODI ist einer der am häufigsten empfohlenen Schmerzfragebogen für Wirbelsäulenerkrankungen. Dieser Fragebogen berücksichtigt die Einschränkungen und Schmerzintensitäten der Patienten in vielen Alltagssituationen, bei gesellschaftlichen Aktivitäten und in ihrer Freizeitgestaltung. Er findet Anwendung bei Patienten mit chronischen Rückenschmerzen jeglicher Genese und dient zusätzlich der Evaluation von postoperativen Ergebnissen der Wirbelsäulen Chirurgie (Little und MacDonald 1994).

Der deutsche ODI umfasst die folgenden zehn Funktionsgebiete: Schmerzstärke, Körperpflege (Waschen, Anziehen etc.), Heben, Gehen, Sitzen, Stehen, Schlafen, Sexualleben, Sozialleben, Reisen. Die Patienten beurteilen mit dem ODI ihre subjektive Einschränkung in diesen unterschiedlichen Bereichen mit einer von sechs Antwortmöglichkeiten (0-5 Punkte). Je größer die empfundene Einschränkung in dem jeweiligen Gebiet ist, desto höher sollte die vergebene Punktzahl sein (z. B. 0 = Ich habe momentan keine Schmerzen, 5 = Die Schmerzen sind momentan so schlimm wie nur vorstellbar).

Die Berechnung des ODI-Kennwerts erfolgt durch die Addition aller Punkte der einzelnen Abschnitte, dividiert durch die mögliche Punktzahl, multipliziert mit 100. Das Ergebnis wird in Prozent angegeben. Beispielsweise beantwortet ein Patient 8 Fragen, wobei die erreichte Gesamtpunktzahl im Zähler 16 beträgt. Die maximal erreichbare Punktzahl (Nenner) ist in diesem Beispiel 40.

Für den Prozentrang jedes Patienten kann nun eine Zuordnung zu einer von fünf Gruppen erfolgen, die den Grad der Behinderung angeben (Fairbank et al. 1980; Davidson und Keating 2005; Sirvanci et al. 2008):

- Gruppe 1 (0 – 20 %): minimale Behinderung
- Gruppe 2 (21 – 40 %): moderate bzw. mäßige Behinderung
- Gruppe 3 (41 – 60 %): starke Behinderung
- Gruppe 4 (61 – 80 %): lähmende Beschwerden
- Gruppe 5 (81 – 100 %): schwerste Form der Behinderung

2.5.2 Roland Morris Score

Der Roland & Morris Disability Questionnaire (RMDQ) ist ein Fragebogen zur Beurteilung physischer Einschränkungen aufgrund von Schmerzen im unteren Rückenbereich (Roland und Morris 1983). In dieser Studie kam der RMS, eine validierte Version des RMDQ in deutscher Übersetzung, zur Anwendung (Wiesinger et al. 1999; Exner und Keel 2000). Er wurde aus dem Sickness Impact Profile (SIP) abgeleitet, einem Fragebogen aus 136 Items, der alle Aspekte der körperlichen und geistigen Funktion abdeckt (Bergner et al. 1981). Die ursprünglichen Autoren wählten 24 Elemente aus dem SIP aus, da sich diese speziell auf körperliche Funktionen bezogen, die wahrscheinlich von Schmerzen im unteren Rückenbereich resultierten (Wiesinger et al. 1999). „Wegen meiner Rückenschmerzen“ wurde an den Satzanfang jeder einzelnen Aussage gestellt, um eine Behinderung durch Rückenschmerzen von einer Behinderung aufgrund anderer Ursachen zu unterscheiden (Wiesinger et al. 1999). Der Studienteilnehmer sollte die 24 Aussagen lesen und dort ein Kreuz setzen, wo er der Meinung war, dass diese Aussage auf ihn zutraf. Die Summe aller einzelnen Kreuze ergab den endgültigen Score. Eine hohe Punktzahl sprach dabei sowohl für eine starke Schmerzbelastung des Patienten als auch eine große Einschränkung im alltäglichen Leben durch das Rückenleiden.

2.5.3 Visuelle Analogskala

Die VAS von Huskisson ist eine valide und verlässliche Skala zur Messung von chronischer Schmerzintensität (Huskisson 1974; Downie et al. 1978; McCormack

et al. 1988; Bijur et al. 2001). Auf einer 10 cm langen Linie (Werte von 0 bis 10) gibt der Patient sein subjektives Schmerzempfinden an, indem er an der Stelle einen Punkt markiert, der seinen aktuellen Gesundheitszustand am besten widerspiegelt. Dabei repräsentiert die 0 "kein Schmerz" und die 10 "stärkster vorstellbarer Schmerz". Die jeweiligen Enden dieser Linie sind durch einen lachenden bzw. weinenden Smiley als Beantwortungsextreme begrenzt. Der Gesamtscore berechnet sich aus dem Mittelwert aller beantworteten Fragen. Er kann Werte zwischen 0 und 10 annehmen. In dieser Studie wurde mithilfe dieser Skala ein Wert für die wirbelsäulenspezifische Schmerzsituation bei körperlicher Belastung, in Ruhe und während der Nacht eruiert.

2.6 Klinisch körperliche Untersuchung

Im Rahmen der postoperativen Kontrolltermine fand eine körperliche Nachuntersuchung statt. Dabei wurde zum einen anamnestisch die wirbelsäulenspezifische Beschwerdesituation erfragt, zum anderen eine detaillierte klinische Untersuchung mit Fokussierung auf die Lendenwirbelsäule durchgeführt.

Anamnestisch befragte man die Studienteilnehmer nach ihrer aktuellen Schmerzsymptomatik, nach weiterhin vorhandenen oder neu aufgetretenen Sensibilitätsstörungen sowie motorischen Defiziten. Ergänzend zu den anamnestischen Aussagen wurde während der körperlichen Untersuchung die periphere Durchblutung, Motorik und Sensibilität an den unteren Extremitäten geprüft. Die Untersuchung der Motorik inkludierte sowohl die Kraftgrade nach Janda als auch den Zehen- und Hackengang.

Die Inspektion fand am bis auf die Unterwäsche entkleideten Patienten statt. In ganzheitlicher Betrachtung wurde das sagittale Profil der Wirbelsäule beurteilt. Zusätzlich erfolgte eine Beurteilung der Wirbelsäule in frontaler Ebene und eine Dokumentation von skoliotischen Veränderungen (Rippenbuckel oder Lendenwulst).

Eine Teilsequenz der Untersuchung beinhaltete die Palpation der Processus spinosi der Brust- und Lendenwirbelsäule, der paravertebralen Muskulatur und der Iliosakralgelenken. Die Patienten wurden ebenfalls auf Klopfdolenz untersucht,

da diese ein Anzeichen für eine Fraktur oder Implantatlockerung darstellen könnten.

Die Beurteilung des Bewegungsumfangs der Brust- und Lendenwirbelsäule erfolgte standardisiert nach der Neutral-0-Methode (Pjontek et al. 2016). Die Untersuchung beinhaltete die Messung der Flexion/Extension ($120^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$), Lateralflexion ($40^{\circ}/0^{\circ}/40^{\circ}$) und Rotation ($45^{\circ}/0/45^{\circ}$). Hierbei wurde die Bewegungsfreiheit als maximale Auslenkung von der Neutralstellung in Grad angegeben. Der Schober-Test quantifiziert als spezifischer Funktionstest die Beweglichkeit der Lendenwirbelsäule (siehe Abb. 16). Nach Tasten des Dornfortsatzes von SWK1 wurde an dieser Stelle und 10 cm kranial jeweils einen Punkt markiert. Bei maximaler Vorwärtsneigung sollte der Abstand dieser beiden Punkte mindestens 13 cm weiter voneinander entfernt sein und beim Rückwärtsneigen mindestens 8 cm beieinander sein. Der sogenannte Ott-Test (Ottsches Maß) dient der Beurteilung der Inklinationsfähigkeit der Brustwirbelsäule (siehe Abb. 16). Nach Palpation des Processus spinosus des 7. HWK wurde eine Markierung 30 cm kaudal des Dornfortsatzes platziert. Bei maximaler Anteflexion sollte sich die Strecke mindestens um 2 bis 4 cm verlängern, bei maximaler Reklination um 1 bis 2 cm verkürzen (Buckup und Buckup 2012; Pjontek et al. 2016).

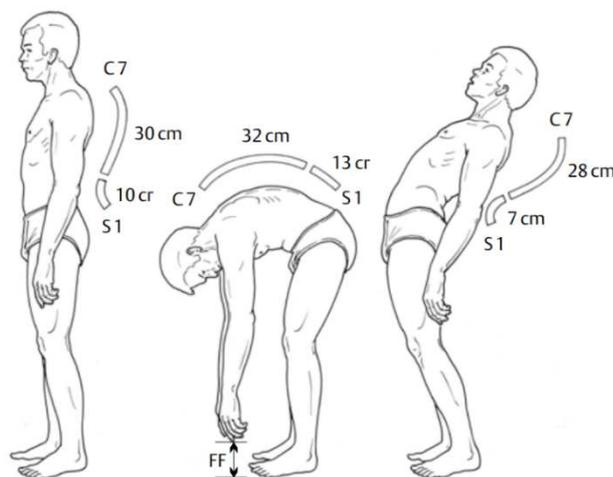


Abb. 16: Schober und Ott-Zeichen (modifiziert nach Buckup und Buckup 2012)

Der Finger-Boden-Abstand (FBA) wurde als Test zur Beweglichkeitseinschätzung der Wirbelsäule verwendet. Seine Aussagekraft lässt sich allerdings nicht isoliert auf die Wirbelsäule anwenden. Hüft- und Beckenbeweglichkeit sowie

mögliche Verkürzungen der ischiocruralen Muskulatur beeinflussen ebenfalls das Ergebnis. Physiologisch beträgt der FBA zwischen 0 und 10 cm.

Beim Lasègue-Zeichen wurde das gestreckte Bein des Patienten in Rückenlage angehoben (siehe Abb. 17). Traten bei dieser passiven Bewegung bis in die Wade oder den Fuß ausstrahlende Schmerzen auf, galt der Test als positiv. Ursache hierfür ist die Dehnung im Bereich der Spinalnervenzwurzeln L4-S2 und des Nervus ischiadicus. Verwechslungsgefahr besteht beim Auftreten eines Muskeldehnungsschmerzes durch Verkürzungen der ischiocruralen Muskulatur oder bei Irritationen und Blockierungen der Iliosakralgelenke (Pseudo Lasègue). Eine zusätzliche Dorsalflexion des Fußes erhöhte die Nervendehnung und führte in der Regel zu einer gesteigerten Schmerzintensität, entsprechend dem Bragard-Zeichen (siehe Abb. 18).

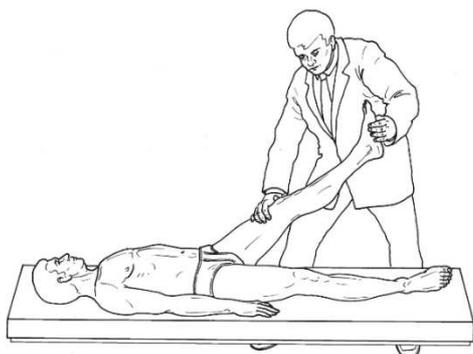


Abb. 17: Lasègue-Zeichen (modifiziert nach Buckup und Buckup 2012)



Abb. 18: Bragard-Zeichen (modifiziert nach Buckup und Buckup 2012)

Der Kernig-Brudzinski-Test diente im Rahmen einer neurologischen Untersuchung ebenfalls dem Nachweis von Nervendehnungsschmerzen. Hier erfolgte die Provokation durch passive Extension im Kniegelenk bei 90° flektiertem Hüftgelenk (siehe Abb. 19).

Der Mennell-Test wurde zur Untersuchung des Iliosakralgelenks genutzt (siehe Abb. 20). In Bauch- oder Seitenlage erfolgte nach Fixierung des Beckens durch Druck auf das Os sacrum eine Hyperextension des Beines auf der ipsilateralen Seite. Traten Schmerzen bei dieser Provokation auf, war das Mennell-Zeichen positiv.

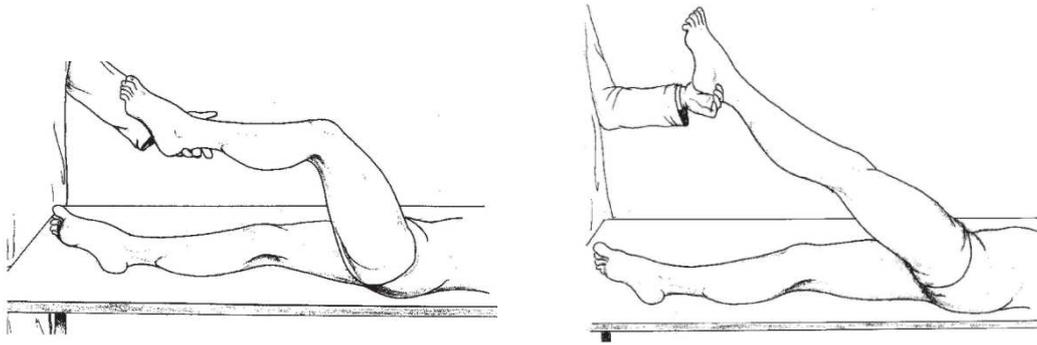


Abb. 19: Kernig-Brudzinski-Test (modifiziert nach Buckup und Buckup 2012)

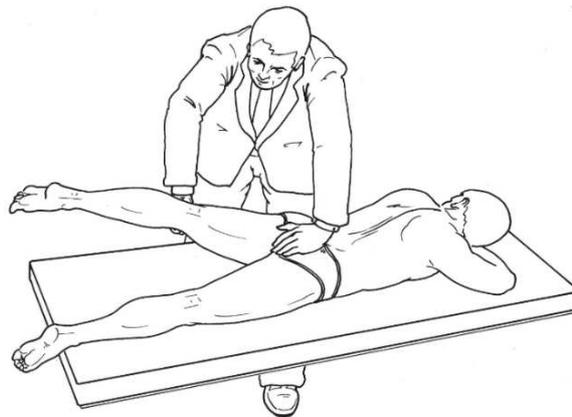


Abb. 20: Mennell-Test (modifiziert nach Buckup und Buckup 2012)

2.7 Statistische Methoden

Die erhobenen Daten wurden in einer Tabelle mittels Microsoft Office Excel (Version 14.0.7, Microsoft Office 2010, Microsoft Redmond, WA, USA) festgehalten und zur weiteren Analyse in SPSS (Version 25.0.0.1, IBM, Armonk, New York, USA) übertragen.

Bei kategorialen Werten erfolgte die Bestimmung der absoluten und relativen Häufigkeit, bei ordinal skalierten Werten wurde der arithmetische Mittelwert (MW) und die Standardabweichung (SD) angegeben, falls diese normalverteilt waren. Zusätzlich wurden Minima und Maxima beschrieben. Die Beurteilung der Normalverteilung erfolgte initial mit Hilfe von Histogrammen und wurde anschließend durch Schiefe und Kurtosis sowie dem Kolmogorov-Smirnov-Test bestätigt. Da bei allen Probandengruppen eine Normalverteilung vorlag, konnte die weitere Auswertung mit Hilfe des t-Tests erfolgen. In der vergleichenden Analyse der

verschiedenen Cage-Implantate kam der -Test für unabhängige Stichproben, mit einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$, zur Anwendung. Um eine Alphafehler-Kumulierung zu vermeiden, lag der Fokus der statistischen Analyse auf den radiologischen (LL, SL und PT) sowie den klinischen (VAS, ODI und RMS) Parametern. Ergänzend erfolgte eine Bonferroni-Korrektur, um einer Alphafehler-Inflation entgegenzuwirken. Die p-Werte wurden dabei mit der Anzahl der durchgeführten Tests multipliziert ($n = 6$), wodurch sich ein adjustierter p-Wert (p_{adj}) ergab. Um den Gruppenvergleich zu vereinfachen, diente bei der LL, SL, PT und VAS die Differenz zwischen prä- und postoperativen Werten als Analysegrundlage. Für den Gruppenvergleich von ODI und RMS wurden die bei der Nachuntersuchung ermittelten Werte verwendet.

Mittels einer multivariaten Varianzanalyse (MANOVA) wurde außerdem untersucht, ob verschiedene Einflussfaktoren die postoperativen Ergebnisse des ODI und RMS signifikant beeinflussten. Als relevante Faktoren inkludierte die statistische Analyse das Alter, das Geschlecht, den BMI, die Cage-Form, die präoperative SS und den postoperativen PT. Im Zuge dessen erfolgte eine Kategorisierung der Parameter bezüglich des Alters in jünger als 60 Jahre und älter als 60 Jahre, des BMI in kleiner 25, 25 bis 35 und größer als 35, des postoperativen PT in kleiner als 12° , 12° bis 20° und größer als 20° und des präoperativen SS in kleiner als 35° , 35° bis 45° und größer als 45° . Auch hier wurde die Signifikanz mit $p < 0,05$ festgesetzt. Auch hier wurde die Signifikanz mit $p < 0,05$ festgesetzt. Sowohl Populationscharakteristika als auch die klinische Untersuchung wurden rein deskriptiv in die Analyse mit aufgenommen. Aufgrund von Rundungen ergab die Summe der Einzelwerte nicht immer genau 100 %.

3 Ergebnisse

3.1 Populationscharakteristika

Das Studienkollektiv umfasste 77 Patienten. 37 dieser Patienten wurden mit einem nicht-lordotischen Cage (0°) und 40 Patienten mit einem lordotischen Cage (5°) versorgt.

Bei 41 (53,2 %) männlichen und 36 (46,8 %) weiblichen Patienten betrug das Durchschnittsalter zum Operationszeitpunkt 61,8 Jahre (SD 13,3), wobei der jüngste Patient 27 Jahre und der älteste Patient 85 Jahre alt war (siehe Abb. 21). In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" waren 21 (56,8 %) Männer und 16 (43,2 %) Frauen vertreten. Sie waren zum Zeitpunkt der Operation im arithmetischen Mittel 60,8 Jahre (SD 13,6, n = 37) alt. Die "Gruppe lordotische Cages" umfasste 20 (50 %) Männer und 20 (50 %) Frauen mit einem Durchschnittsalter von 62,7 Jahren (SD 13,16, n = 40).

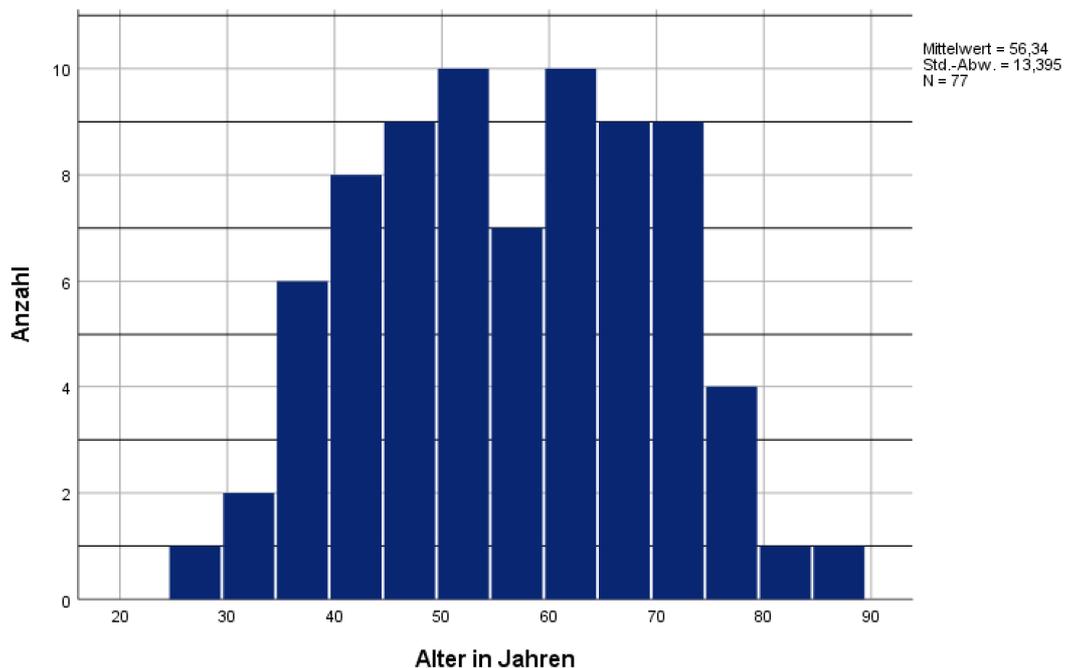


Abb. 21: Altersverteilung des Patientenkollektivs bei Operation

Der Body-Mass-Index (BMI) der Gesamtkohorte lag bei einem durchschnittlichen Wert von 27,82 kg/m² (SD 4,19, n = 64). Die "Gruppe nicht-lordotische Cages" zeigte einen mittleren BMI von 28,75 kg/m² (SD 4,42, n = 29), während die "Gruppe lordotische Cages" einen durchschnittlichen BMI von 27,06 kg/m² (SD 3,89, n = 35) aufwies.

In der Studienpopulation bestand bei 43 (55,8 %) Patienten eine Operationsindikation aufgrund einer Osteochondrosis. Bei 34 (44,2 %) Patienten ließ sich eine Spondylolisthesis (Meyerding Grad I) diagnostizieren. Von den in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" operierten Patienten hatten 22 (59,5 %) eine Osteochondrosis als präoperative Diagnose und 15 (40,5 %) Patienten eine Spondylolisthesis. Die operative Indikation wurde in der "Gruppe lordotische Cages" bei 21 (52,5 %) Patienten aufgrund einer Osteochondrosis und in 19 (47,5 %) Fällen aufgrund einer Spondylolisthesis gestellt.

Das durchschnittliche Nachuntersuchungsintervall betrug in der gesamten Kohorte 4,9 Jahre (SD 1,1, n = 60). Die späteste Nachuntersuchung fand dabei nach 6,04 Jahren, die früheste nach 2,75 Jahren statt. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" bekamen die Patienten im arithmetischen Mittel nach 5,7 Jahren (SD 0,75, n = 26) ihre Nachuntersuchung, in der "Gruppe lordotische Cages" nach 4,2 Jahren (SD 0,8, n = 34).

Vom Gesamtkollektiv wurden 48 (62,3 %) Patienten monosegmental und 34 (44,2 %) Patienten bisegmental fusioniert. In den beiden Subgruppen erfolgten eine vergleichbare Anzahl von Fusionsoperationen auf monosegmentaler und bisegmentaler Ebene. 23 Fusionen in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" und 25 Fusionen in der "Gruppe lordotische Cages" wurden auf einer Ebene durchgeführt. Eine bisegmentale Fusion fand bei 14 Patienten der "Gruppe nicht-lordotische Cages" und bei 15 Patienten der "Gruppe lordotische Cages" statt. Die detaillierte Verteilung der Cage-Implantationen auf die verschiedenen Segmente der Lendenwirbelsäule wurde in der Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Segmentale Versorgung der Gesamtpopulation und der einzelnen Gruppen

	Monosegmental				Bisegmental	
	L2/3	L3/4	L4/5	L5/S1	L3 bis L5	L4 bis S1
0°-Cage	23 (62,2)				14 (37,8)	
n (%)	0 (0,0)	2 (5,4)	11 (29,7)	10 (27,0)	3 (8,1)	11 (29,7)
5°-Cage	25 (62,5)				15 (37,5)	
n (%)	1 (2,5)	1 (2,5)	15 (37,5)	8 (20,0 %)	3 (7,5)	12 (30,0)
Gesamt	48 (62,3)				29 (37,7)	
n (%)	1 (1,3)	3 (3,9)	26 (33,8)	18 (23,4)	6 (7,8)	23 (29,9)

3.2 Klinische Untersuchung

An der orthopädisch orientierten Untersuchung nahmen 60 (77,9 %) Patienten aus der gesamten Studienpopulation teil. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" erfolgte diese Nachuntersuchung bei 26 (70,3 %) Patienten, in der "Gruppe lordotische Cages" bei 34 (85,0 %) Patienten.

Anamnese

Beim anamnestischen Gespräch berichteten 13 (21,7 %) Patienten, nach der Operation keine Schmerzen mehr im Bereich der Wirbelsäule zu haben. In neun (15,0 %) Fällen bestanden Schmerzen abseits des Operationsgebietes, an der Halswirbelsäule (HWS) oder Brustwirbelsäule (BWS). 28 (63,3 %) Patienten gaben weiterhin an, Schmerzen im Bereich der LWS zu verspüren. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" litten 17 (65,4 %) Patienten an Schmerzen im Bereich der LWS. 21 (61,8 %) Patienten waren in der "Gruppe lordotische Cages" von postoperativen Schmerzen an der Lendenwirbelsäule betroffen (siehe Abb. 22).

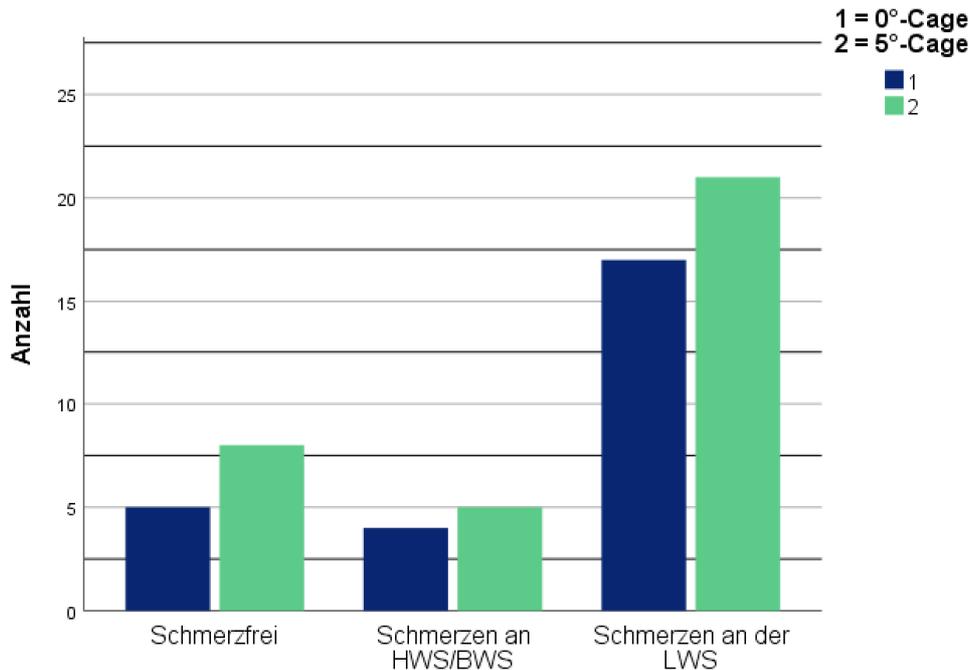


Abb. 22: Postoperative Schmerzlokalisierung der Cage-Formen im Vergleich

Wirbelsäulenprofil

Bei der klinischen Untersuchung zeigten vier (6,7 %) Patienten der gesamten Kohorte eine Lotabweichung in der frontalen Ebene. Dabei traten diese jeweils bei zwei (7,7 %) Patienten mit den nicht-lordotischen Cages und bei zwei (5,9 %) Patienten mit den lordotischen Cages auf. Bei einem (3,8 %) Patienten aus der "Gruppe nicht-lordotische Cages" und einem (2,9 %) Patienten aus "Gruppe lordotische Cages" ließen sich Seitabweichungen der Wirbelsäule in Form eines Rippenbuckels oder Lendenwulsts beobachten.

Palpation

Aus der Gesamtpopulation gaben 38 (63,3 %) Patienten an, keine Schmerzen bei Palpation der Dornfortsätze zu haben. Fünf (8,3 %) Patienten hatten Schmerzen bei der Palpation der Brust- oder Halswirbelsäule und 17 (28,3 %) Patienten verspürten Schmerzen bei Druckausübung auf die Lendenwirbelsäule. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" traten in 17 (65,4 %) Fällen keinerlei Schmerzen an den Dornfortsätzen der LWS auf, in vier (8,1 %) Fällen traten Schmerzen fernab der Lendenwirbelsäule auf und in sechs (16,2 %) Fällen traten Schmerzen an der LWS auf. 21 (61,8 %) Patienten zeigten sich dagegen in der "Gruppe

lordotische Cages“ schmerzfrei, zwei (5,9 %) gaben Schmerzen bei Palpation der HWS oder BWS an und bei elf (32,4 %) Patienten traten Druckschmerzen im Bereich der Dornfortsätze der LWS auf. An der paravertebralen Muskulatur berichtete ein (1,7 %) Patient aus der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ von Schmerzen bei der Palpation. 59 (98,3 %) Patienten der Gesamtpopulation hatten keine Schmerzen. Bei der Palpation des Iliosakralgelenks trat bei 14 der 60 (23,3 %) Patienten ein Druckschmerz auf, die sich aus vier (15,4 %) Patienten der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ und zehn (29,4 %) Patienten aus “Gruppe lordotische Cages“ zusammensetzten. 22 (84,6 %) Patienten mit nicht-lordotischen Cages und 24 (70,6 %) Patienten mit lordotischen Cages verspürten keinerlei Schmerzen bei der Palpation des Iliosakralgelenks.

Bewegungsumfang

Die Ergebnisse der Bewegungsumfanganalyse der Flexion/ Extension, Seitenneigung und Rotation wurden in Tab. 3 sowohl für die Gesamtkohorte als auch für die einzelnen Subgruppen detailliert dargestellt. Die durchschnittlichen Werte befanden sich sowohl in der Gesamtpopulation als auch in der nicht-lordotischen und der lordotischen Gruppe im physiologischen Normbereich.

Tab. 3: Bewegungsumfang in der Gesamtkohorte und den verschiedenen Gruppen

	Gesamt (n=60)	0°-Cage (n=26)	5°-Cage (n=34)
Flexion MW in Grad (SD)	96,17 (22,85)	97,31 (19,09)	95,29 (25,61)
Extension MW in Grad (SD)	25,42 (7,21)	27,69 (5,14)	23,68 (8,1)
Seitenneigung rechts MW in Grad (SD)	34,42 (8,29)	35,77 (7,03)	33,38 (9,11)
Seitenneigung links MW in Grad (SD)	35,25 (7,89)	36,54 (6,29)	34,26 (8,89)
Rotation r MW in Grad (SD)	39,92 (8,05)	40,38 (7,34)	39,56 (8,65)
Rotation l MW in Grad (SD)	40,25 (7,94)	40,77 (7,03)	39,85 (8,66)

Der FBA zeigte sich im Rahmen der Untersuchung bei 30 (50,0 %) Patienten pathologisch. In 14 (53,8 %) Fällen traf dies bei der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ zu, in 16 (47,1 %) Fällen bei “Gruppe lordotische Cages“. In der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ war es zwölf (46,2 %) der Patienten möglich, einen FBA

kleiner als 10 cm zu erreichen. In der "Gruppe lordotische Cages" schafften dies 18 (52,9 %) Patienten. Das Ott-Zeichen wurde bei 47 (78,3 %) Patienten der Gesamtpopulation als pathologisch dokumentiert, davon 22 (84,5 %) Patienten aus der "Gruppe nicht-lordotische Cages" und 25 (73,5 %) Patienten aus der "Gruppe lordotische Cages". Eine pathologische Flexionsfähigkeit der Lendenwirbelsäule erwies sich durch das Schober-Zeichen bei 24 (40,0 %) Patienten der Studienkohorte. Acht (30,8 %) Fälle traten bei Patienten mit nicht-lordotischen Cage und 16 (47,1 %) Fälle bei Patienten mit lordotischen Cage auf.

Klinische Testung

Das Lasègue-Zeichen zeigte sich bei 45 (75 %) Patienten negativ. Bei sieben (11,7 %) Patienten wurde einen positiven Befund festgestellt. In acht (13,3 %) Fällen konnte ein Pseudo-Lasègue in der Gesamtpopulation festgestellt werden. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" ließ sich bei zwei (7,7 %) Patienten ein positiver Lasègue und bei vier (15,4 %) Patienten ein Pseudo-Lasègue dokumentieren. Bei 20 (76,9 %) Patienten fiel der Test negativ aus. In 25 (73,5 %) Fällen konnte in der "Gruppe lordotische Cages" ein negatives Testergebnis dokumentiert werden. Bei fünf der 34 (14,7 %) Patienten trat ein positives Lasègue-Zeichen auf, bei vier (11,8 %) Patienten ein Pseudo-Lasègue. Bei 53 (88,3 %) Patienten bewies sich der Bragard-Test als negativ. In sieben (11,7 %) Fällen wurde ein positives Bragard-Zeichen dokumentiert. Zwei (7,7 %) dieser Fälle zeigten sich in der "Gruppe nicht-lordotische Cages", fünf (14,7 %) dieser Fälle traten in der "Gruppe lordotische Cages" auf. Beim Kernig-Test ließ sich bei sechs (10 %) Patienten ein positives Testergebnis feststellen, bei 54 (90 %) Patienten ein negatives Testergebnis. Von diesen sechs Patienten stammten zwei (7,7 %) Fälle aus der "Gruppe nicht-lordotische Cages" und vier (11,8 %) Fälle aus der "Gruppe lordotische Cages". Der Mennell-Test demonstrierte bei 21 (35 %) Patienten der Gesamtkohorte einen positiven Untersuchungsbefund. Davon wurden sieben (26,9 %) Patienten mit einem nicht-lordotischen Cage und 14 (41,2 %) Patienten mit einem lordotischen Cage versorgt.

Periphere Durchblutung, Motorik und Sensibilität

In 19 (31,77 %) Fällen wiesen Patienten motorische Defizite der unteren Extremitäten auf, 20 (33,3 %) Patienten berichteten von Sensibilitätsstörungen. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" wurden zehn (38,5 %) Fälle von motorischen Defiziten dokumentiert und neun (34,6 %) Fälle von Sensibilitätsausfällen. Bei neun (26,5 %) Patienten ließen sich in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" motorische Defizite an den unteren Extremitäten feststellen, bei elf (32,4 %) Patienten waren Sensibilitätsstörungen nachweisbar. Durchblutungsstörungen der unteren Extremitäten konnten bei keinem Patienten festgestellt werden.

3.3 Radiologische Ergebnisse

Bei allen 77 Patienten wurden sowohl präoperativ als auch bei der routinemäßigen Nachuntersuchung Röntgenaufnahmen angefertigt. Zwei (2,6 %) Patienten mussten von der röntgenradiologischen Beurteilung ausgeschlossen werden, weil keine präoperativen Aufnahmen in stehender Position zur Verfügung standen.

3.3.1 Gesamtpopulation

Lumbale Lordose

In der Gesamtpopulation (siehe Abb. 23) ergab sich ein durchschnittlicher Wert für die präoperative LL von $50,48^\circ$ (SD 11,56, n = 75) und ein durchschnittlicher postoperativer Wert von $52,82^\circ$ (SD 12,39, n = 75). Die minimal gemessene Gesamtlordose lag im gesamten Patientenkollektiv präoperativ bei $21,5^\circ$, die maximale Gesamtlordose bei $72,1^\circ$. In der postoperativen Auswertung wies die LL ein Minimum von $20,8^\circ$ und ein Maximum von $78,3^\circ$ auf. In 52 (69,33 %) Fällen vergrößerte sich die LL von prä- nach postoperativ. In einem (1,33 %) Fall blieb die LL konstant und in 22 (29,33 %) Fällen verkleinerte sich die LL.

Segmentale Lordose

Betrachtet man die SL im prä- und postoperativen Vergleich (siehe Abb. 23), so zeigt sich ein Lordose-Zuwachs von präoperativen $13,54^\circ$ (SD 4,9, n = 75) auf

16,29° (SD 5,11, n = 75). Das Minimum der SL wurde präoperativ bei 0,4° dokumentiert, das Maximum bei 24,7°. Postoperativ betrug die maximale SL 27,2°, die minimale SL 5,2°. Bei 17 (22,67 %) Patienten ließ sich eine postoperativ verkleinerte SL feststellen, bei 58 (77,33 %) vergrößerte sich die SL.

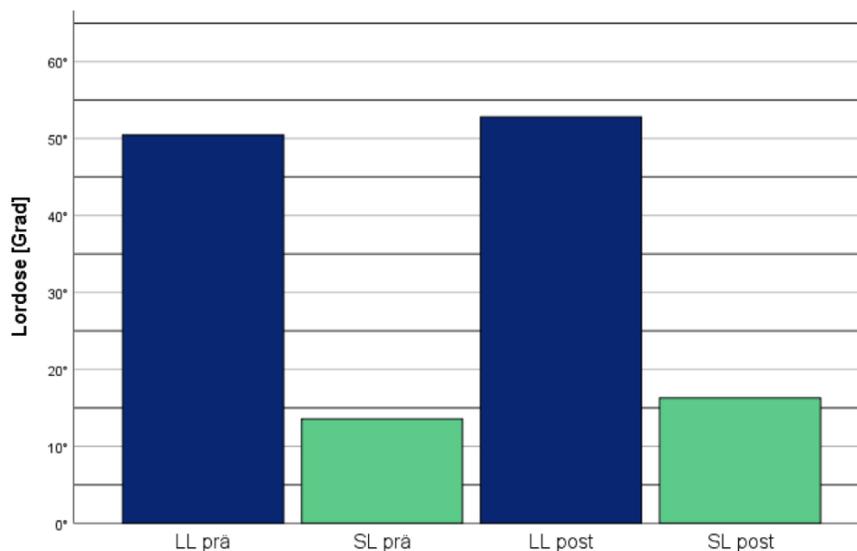


Abb. 23: Mittelwerte der LL und SL sowohl prä- als auch postoperativ im Gesamtkollektiv

Pelvic Tilt

Beim Vergleich der prä- und postoperativen Werte des PT zeigte sich ein postoperativer Verlust von einem Ausgangswert von durchschnittlich 20,3° (SD 7,39, n = 75) auf 19,76° (SD 6,9, n = 75). Präoperativ lag der minimale PT bei 2,8°, der maximale PT bei 33,7°. Postoperativ konnte ein Minimalwert von 1,6° und ein Maximalwert von 34,1° festgestellt werden. Bei 40 (53,33 %) Patienten verkleinerte sich der PT postoperativ, während er sich bei 35 (46,67 %) Patienten von prä- auf postoperativ vergrößerte.

Sacral Slope

Bei dem SS wurde präoperativ ein durchschnittlicher Wert von 35,24° (SD 9,03, n = 75) gemessen. Der Höchstwert lag präoperativ bei 56,2°, der Minimalwert bei 13,9°. Der SS betrug postoperativ im arithmetischen Mittel 35,79° (SD 8,91, n = 75). Das Maximum ergab für den postoperativen SS einen Wert von 55,2°, das Minimum belief sich auf 9,2°.

Pelvic Incidence

Bezüglich der PI ergab die statistische Auswertung einen Mittelwert von 56,22° (SD 12,1, n = 75) im gesamten Patientenkollektiv. Da es sich bei PI um einen konstanten Parameter handelt, ließen sich bei den prä- und postoperativen Aufnahmen identische Werte feststellen. Die minimal gemessene PI lag bei 25°, die maximal gemessene PI bei 84,8°.

3.3.2 Vergleich der Cage-Formen

Die retrospektive Analyse der radiologischen prä- und postoperativen Daten inkludierte 37 (48,05 %) Patienten in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" und 40 (51,95 %) Patienten in der "Gruppe lordotische Cages". Die statistische Auswertung schloss zwei (2,6 %) Patienten aus der "Gruppe nicht-lordotische Cages", aufgrund fehlender präoperativer Röntgenaufnahmen aus. Zusammenfassend wurden die Ergebnisse der radiologischen Vergleichsanalyse in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4: Radiologischen Ergebnisse der verschiedenen Gruppen

	0°-Cages (n=35)		5°-Cages (n=40)		p-/ p _{adj} -Wert
	Präoperativ	Postoperativ	Präoperativ	Postoperativ	
LL MW in Grad (SD)	49,77 (11,52)	48,5 (11,86)	51,1 (11,7)	56,6 (11,71)	
	- 1,26 (11,7)		+ 5,5 (2,43)		< 0,001 / < 0,001
SL MW in Grad (SD)	14,56 (4,6)	14,5 (4,66)	12,65 (5,04)	17,86 (5,02)	
	- 0,06 (1,92)		+ 5,21 (1,81)		< 0,001 / < 0,001
PT MW in Grad (SD)	19,58 (7,34)	20,3 (6,58)	20,94 (7,47)	19,28 (7,22)	
	+ 0,72 (4,16)		- 1,66 (3,42)		0,008 / 0,048

Lumbale Lordose

Die LL in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" betrug im arithmetischen Mittel $49,77^\circ$ (SD 11,52, n = 35) präoperativ und $48,5^\circ$ (SD 11,86, n = 35) postoperativ. Bei 22 Patienten (62,86 %) der "Gruppe nicht-lordotische Cages" verringerte sich die LL postoperativ, bei zwölf (34,29 %) Patienten vergrößerte sich die LL und bei einem (2,86 %) Patienten veränderte sich die LL nicht (siehe Tab. 4).

In der "Gruppe lordotische Cages" wurde die LL präoperativ bei einem Mittelwert von $51,1^\circ$ (SD 11,7, n = 40) und postoperativ bei einem Mittelwert von $56,6^\circ$ (SD 11,71 n = 40) dokumentiert. In 40 (100 %) Fällen zeigte sich postoperativ eine vergrößerte LL (siehe Tab. 4).

In vergleichender Betrachtung verkleinerte sich die LL in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" um durchschnittlich $1,26^\circ$ (SD 11,7, n = 35), während sich die LL in der "Gruppe lordotische Cages" um durchschnittlich $5,5^\circ$ (SD 2,43, n = 40) vergrößerte (siehe Abb. 24). Es zeigte sich damit ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Cage-Formen ($p < 0,001$). Auch nach der Bonferroni-Korrektur blieb der Gruppenunterschied signifikant ($p_{\text{adj}} < 0,001$).

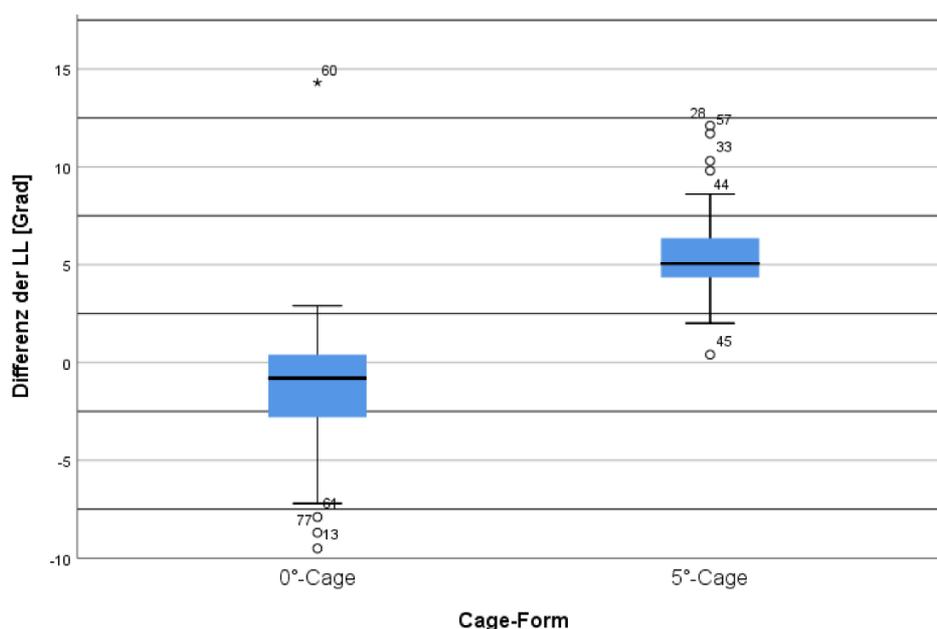


Abb. 24: Vergleich der LL zwischen den verschiedenen Cage-Formen

Segmentale Lordose

Die "Gruppe nicht-lordotische Cages" zeigte eine durchschnittliche präoperative SL von 14,56° (SD 4,6, n = 35) und eine postoperative SL von 14,5° (SD 4,66, n = 35). In 17 (48,57 %) Fällen konnte eine Verminderung, in 18 (51,42 %) Fällen eine Vergrößerung der SL bei den nicht-lordotischen Cages ermittelt werden (siehe Tab. 4).

Nach statistischer Analyse der SL-Werte aus der "Gruppe lordotische Cages", ergab sich eine SL von 12,65° (SD 5,04, n = 40) in den präoperativen Aufnahmen und eine SL von 17,86° (SD 5,02, n = 40) in den postoperativen Aufnahmen. Die SL war bei allen 40 (100 %) Patienten in den postoperativen Röntgenaufnahmen vergrößert (siehe Tab. 4).

Beim Vergleich der Lordose-Änderung zwischen den prä- und postoperativen Werten der verschiedenen Cages zeigte sich ein signifikanter Unterschied zugunsten der lordotischen Cages ($p < 0,001$). Die Lordose-Änderung blieb auch nach Bonferroni-Korrektur signifikant ($p_{\text{adj}} < 0,001$). Bei der "Gruppe nicht-lordotische Cages" verringerte sich die SL durchschnittlich um 0,06° (SD 1,92, n = 35), in der "Gruppe lordotische Cages" hingegen vergrößert sich die SL (siehe Abb. 25 und Tab. 4) im arithmetischen Mittel um 5,21° (SD 1,81, n = 40).

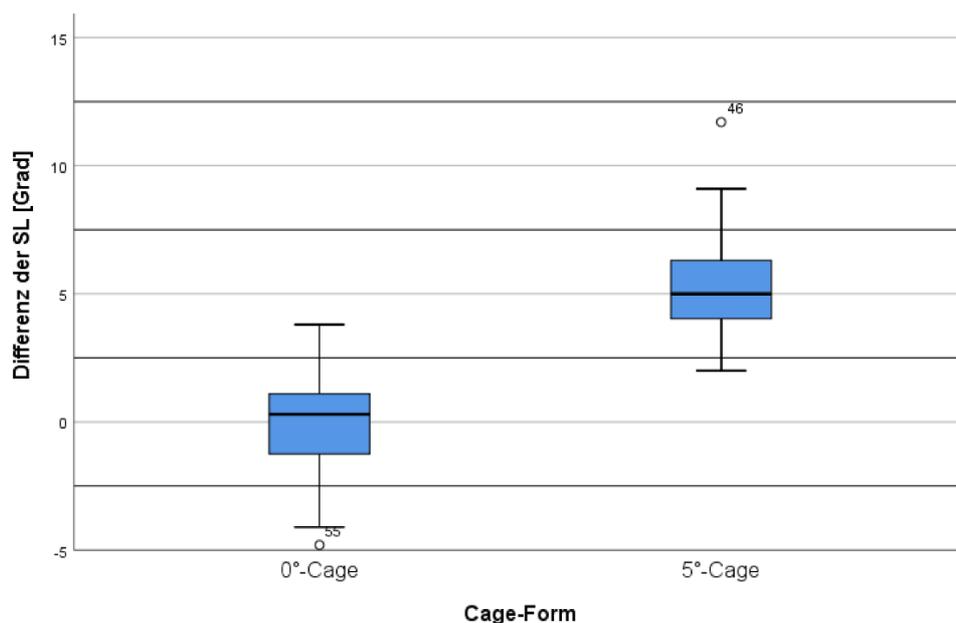


Abb. 25: Vergleich der SL zwischen den verschiedenen Cage-Formen

Pelvic Tilt

In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" wurde ein durchschnittlicher präoperativer PT von $19,58^\circ$ (SD 7,34, n = 35) und ein postoperativer PT mit einem Mittelwert von $20,3^\circ$ (SD 6,58, n = 35) festgestellt. Bei 14 (40 %) Patienten verkleinerte sich der PT von prä- auf postoperativ, in 21 (60 %) Fällen vergrößerte sich der PT postoperativ (siehe Tab. 4).

In der "Gruppe lordotische Cages" betrug der Mittelwert des präoperativen PT $20,94^\circ$ (SD 7,47, n = 40), postoperativ $19,28^\circ$ (SD 7,22, n = 40). Ein postoperativ verkleinerter PT konnte in 26 (65 %) Fällen nachgewiesen werden. Bei 14 (35 %) Patienten vergrößerte sich der PT von prä- auf postoperativ (siehe Tab. 4).

Die statistische Analyse zeigte eine durchschnittliche Vergrößerung des PT in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" um $0,72^\circ$ (SD 4,16, n = 35) und eine Verkleinerung des PT um einen Mittelwert von $1,66^\circ$ (SD 3,42, n = 40) in "Gruppe lordotische Cages" (siehe Abb. 26). Im Vergleich der verschiedenen Cage-Typen ist diese Veränderung sowohl ohne als auch mit der Bonferroni-Methode signifikant ($p = 0,008$, $p_{\text{adj}} = 0,048$).

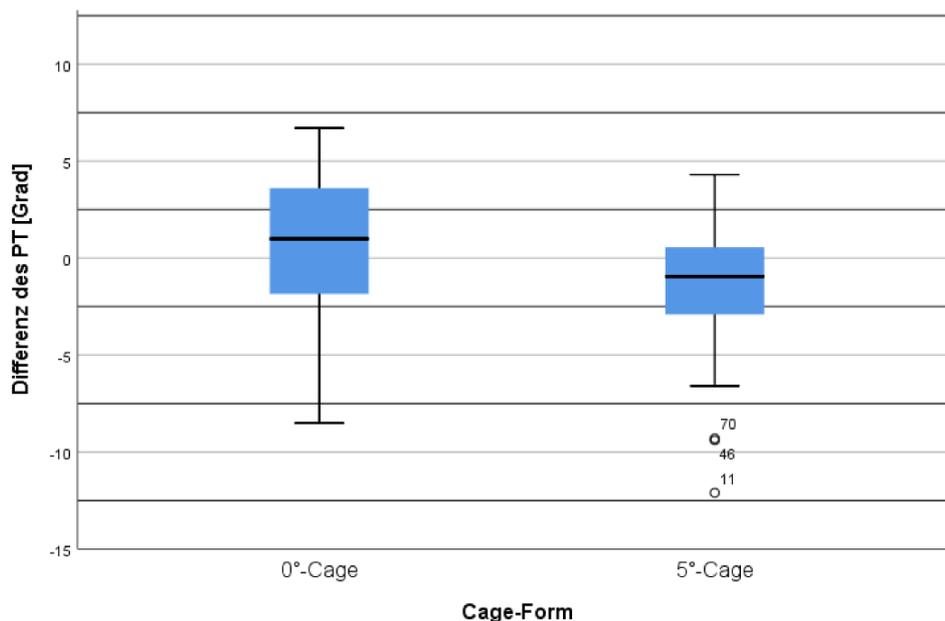


Abb. 26: Vergleich des PT zwischen den verschiedenen Cage-Formen

Im Endergebnis zeigte sich sowohl bei der LL ($p < 0,001$, $p_{adj} < 0,001$) als auch bei der SL ($p < 0,001$, $p_{adj} < 0,001$) und dem PT ($p = 0,008$, $p_{adj} = 0,048$) eine signifikante Verbesserung der radiologischen Parameter zugunsten der "Gruppe lordotische Cages".

3.4 Ergebnisse der VAS, des ODI und RMS

Von den 77 Patienten der Studienpopulation nahmen 64 (83,1 %) Patienten an der Fragebogenevaluation teil. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" beantworteten 29 von 37 (78,4 %) Patienten, in der "Gruppe lordotische Cages" 35 von 40 (87,5 %) Patienten die drei Fragebögen. Für die VAS lag, neben den in der Studie erhobenen postoperativen Daten, auch eine präoperative Fragebogenanalyse vor. Die Daten des ODI und RMS wurden postoperativ erhoben. Alle Ergebnisse der Fragebogenevaluation wurden in Tab. 5 dargestellt.

Tab. 5: Klinische Ergebnisse der Fragebogenevaluation in der Gesamtpopulation und den verschiedenen Gruppen

	Gesamt	0°-Cage (n=29)	5°-Cage (n=35)	p- / p_{adj}- Wert
VAS präoperativ MW (SD)	8,93 (1,17)	9,02 (1,17)	8,86 (1,17)	
VAS postoperativ MW(SD)	2,99 (2,12)	2,59 (1,82)	3,33 (2,32)	
VAS Differenz MW (SD)	- 5,94 (2,35)	- 6,43 (1,92)	- 5,53 (2,61)	0,128 / 0,768
ODI postoperativ MW(SD)	25,72 (19,54)	22,62 (16,86)	28,29 (21,42)	0,252 / > 0,99
RMS postoperativ MW (SD)	8,14 (6,4)	7,52 (5,31)	8,66 (7, 20)	0,482 / > 0,99

3.4.1 Gesamtpopulation

In der gesamten Patientenkohorte gaben 58 (90,6 %) Patienten an, mit dem postoperativen Ergebnis zufrieden zu sein und 60 Patienten (93,8 %) würden erneut einem operativen Eingriff zustimmen.

Bei der Auswertung der VAS zeigte sich präoperativ ein durchschnittlicher Ausgangswert von 8,93 Punkten (SD 1,17, n = 64) in der Gesamtpopulation. Postoperativ ergab die statistische Analyse einen Mittelwert von 2,99 Punkten (SD 2,12, n = 64). Die VAS wies damit in der Gesamtpopulation einen Punkteabfall von 5,94 (SD 2,35) auf (siehe Abb.27 und Tab. 5).

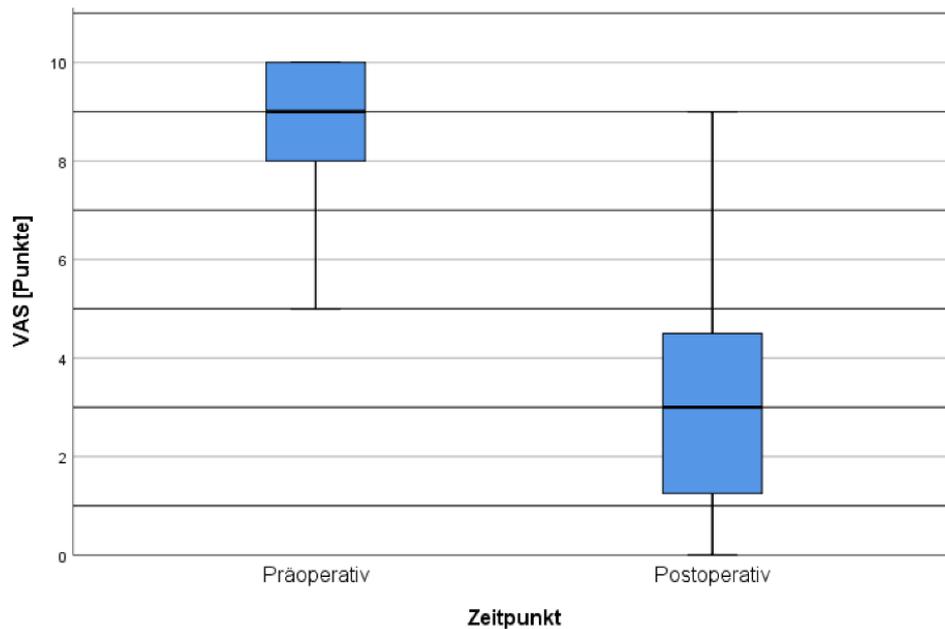


Abb. 27: Präoperative und postoperative Werte der VAS in der Gesamtpopulation

Bezüglich des ODI ergab sich ein postoperativer Mittelwert von 25,72 % (SD 19,54, n = 64) für die Studienkohorte, was einer moderaten bzw. mäßigen Behinderung entspricht (siehe Tab. 5). 34 (53,13 %) Patienten ließen sich nach dem ODI in die Gruppe der minimalen Behinderung einordnen, 16 (25 %) Patienten in die Gruppe der moderaten bzw. mäßigen Behinderung, neun (14,06 %) Patienten in die Gruppe der starken Behinderung und fünf (7,81 %) Patienten in die Gruppe 4 (lähmende Behinderung). Kein Patient des Gesamtkollektivs konnte postoperativ der Gruppe 5 mit dem schwersten Behinderungsgrad zugeordnet werden. Bei Korrelation der präoperativen SS mit dem postoperativen ODI zeigte sich, dass bei acht (12,5 %) Patienten mit einer SS größer als 45° der postoperative ODI mit 37,5 % (SD 26,2) deutlich vom Durchschnittswert der Gesamtpopulation abwich. Bei den 55 (85,94 %) Patienten mit einer SS kleiner als 45° lag der postoperative ODI bei durchschnittlich 24,25 % (SD 18,18).

Der durchschnittliche Wert für den RMS (siehe Tab. 5) belief sich postoperativ auf 8,14 Punkte (SD 6,4, n = 64).

3.4.2 Vergleich der Cage-Formen

Die statistischen Ergebnisse der VAS zeigten in der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ (9.0 Punkte, SD 1,12, n = 35) einen höheren präoperativen Mittelwert als in der “Gruppe lordotische Cages“ (8.9 Punkte, SD 1,12, n = 29). Die postoperativen Daten ergaben in der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ einen Durchschnittswert von 2,67 Punkten (SD 1,77, n = 29) und in der “Gruppe lordotische Cages“ einen mittleren Punktwert von 3,19 (SD 1,89, n = 35). Im Vergleich (siehe Abb. 28 und Tab. 5) ergab sich ein größerer Punkteabfall in der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ (6,43 Punkte, SD 1.92) als in der “Gruppe lordotische Cages“ (5,53 Punkte, SD 2,61). Dieser Unterschied ist jedoch nicht statistisch signifikant ($p = 0,128$, $p_{\text{adj}} = 0,768$).

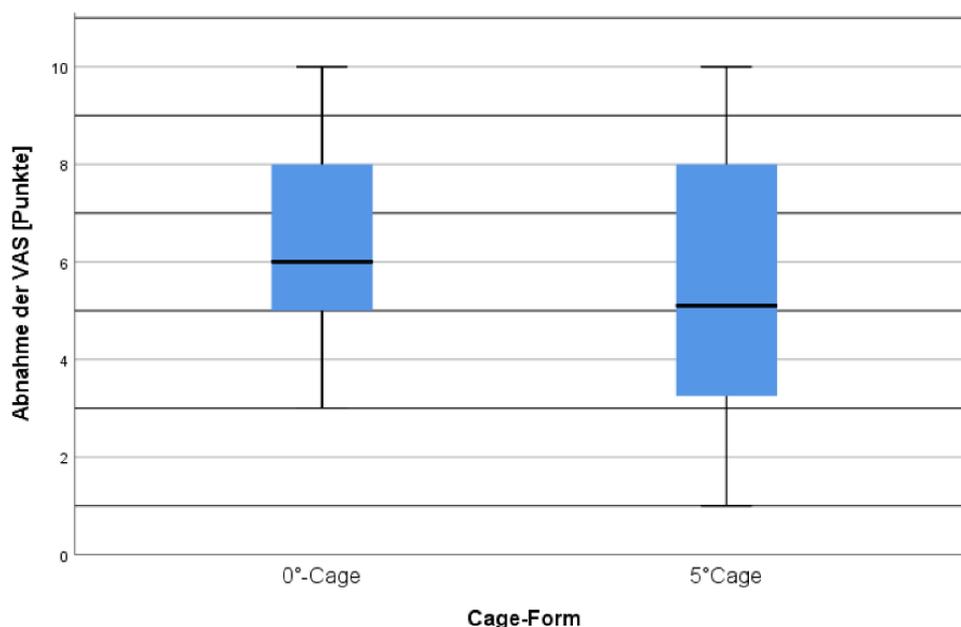


Abb. 28: Abnahme der VAS (prä- zu postoperativ) in den verschiedenen Cage-Gruppen

Bezüglich des ODI ergab sich in der “Gruppe lordotische Cages“ mit 28,29 % (SD 21,42, n = 35) ein leicht höherer Prozentrangwert als in der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ mit 22,62 % (SD 16,86, n = 29). Der Unterschied zwischen den beiden (siehe Abb. 29 und Tab. 5) ist allerdings nicht statistisch signifikant

($p = 0,252$, $p_{\text{adj}} > 0,99$). Beide Cage-Gruppen konnten anhand ihres durchschnittlichen Prozentrangs der Gruppe der moderaten bzw. mäßigen Behinderung zugeordnet werden. Die genaue Verteilung beider Cage-Formen auf die unterschiedlichen Behinderungsgrade ist in der Abb. 30 dargestellt.

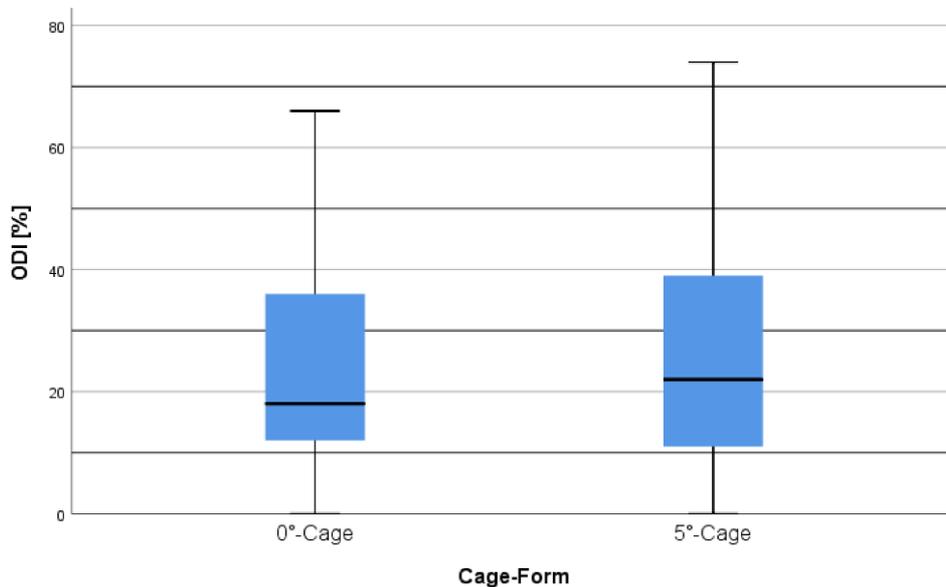


Abb. 29: Postoperative Ergebnisse des ODI in den verschiedenen Cage-Gruppen

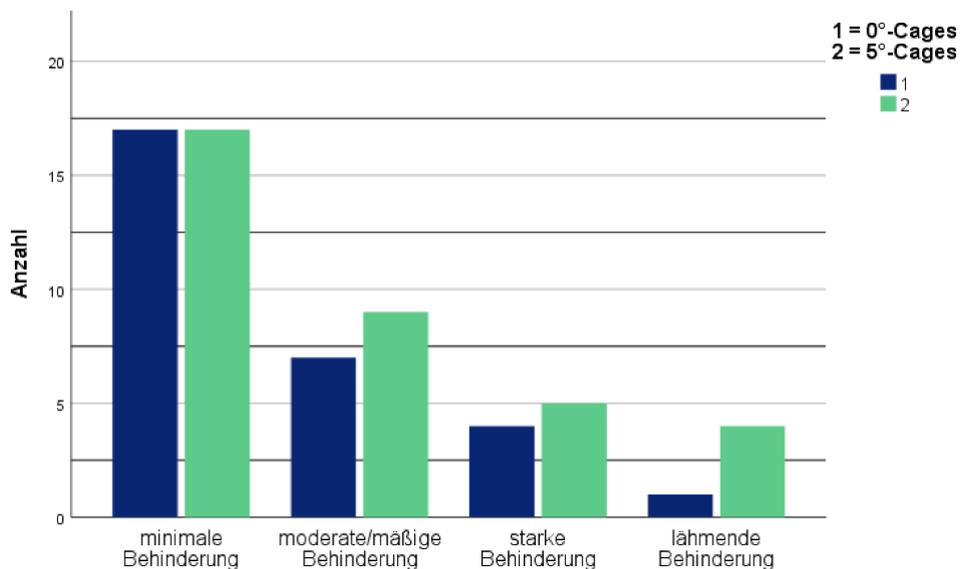


Abb. 30: Grad der Behinderung in den verschiedenen Cage-Gruppen

Der RMS zeigte postoperativ einen Mittelwert von 7,52 Punkten (SD 5,31, n = 29) in der “Gruppe nicht-lordotische Cages“ und einen Durchschnittswert von 8,66 Punkten (SD 7,20, n = 35) in der “Gruppe lordotische Cages“. Im Vergleich (siehe Abb. 31 und Tab. 5) der beiden Gruppen zeigte sich kein signifikanter Unterschied ($p = 0,482$). Auch der adjustierte p-Wert nach der Bonferroni-Korrektur war damit nicht signifikant ($p_{\text{adj}} > 0,99$).

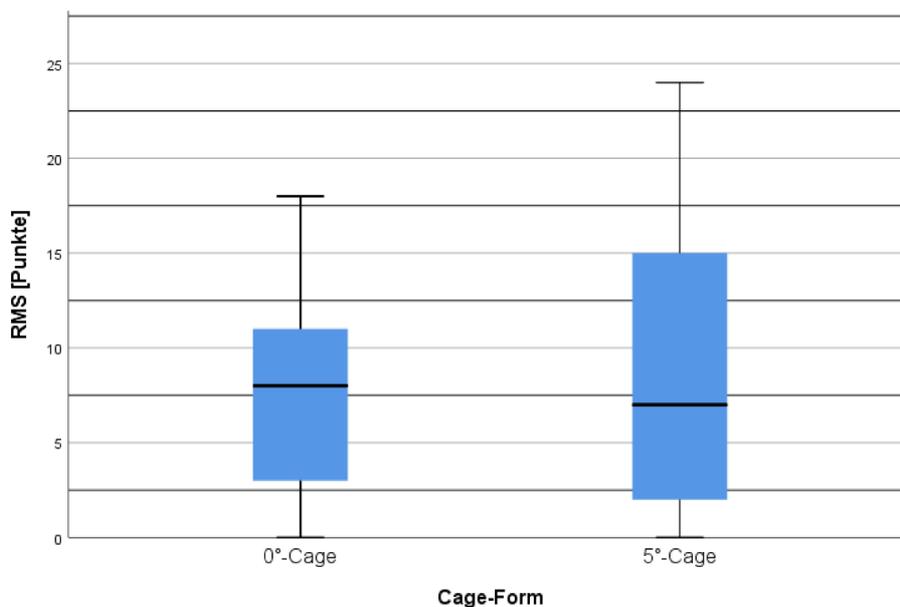


Abb. 31: Postoperative Ergebnisse des RMS in den verschiedenen Cage-Gruppen

3.4.3 Multivariate Varianzanalyse

Mit Hilfe der MANOVA erfolgte eine ergänzende Untersuchung, um Faktoren, welche die postoperativen Ergebnisse des ODI und RMS beeinflussen könnten, zu identifizieren. Das Alter, das Geschlecht, der BMI, der Cage-Typ sowie die präoperative SS und der postoperative PT wurden in die Analyse inkludiert. Die Ergebnisse der MANOVA zeigten einen signifikanten multivariaten Einfluss des BMI (Wilks $\lambda = 0,57$, $F(4, 44) = 3,61$, $p = 0,012$) und des präoperativen SS (Wilks $\lambda = 0,66$, $F(4, 44) = 2,54$, $p = 0,048$) auf alle Variablen. Alter, Geschlecht, Cage-Form und postoperativer PT hatten keinen signifikanten Einfluss auf die klinischen Ergebnisse des ODI und RMS ($p > 0,05$). In der folgenden univariaten Analyse stellte sich erneut ein signifikanter Einfluss des BMI auf den ODI ($F(2, 23) = 6,08$, $p = 0,008$) und den RMS ($F(2, 23) = 7,21$, $p = 0,004$) dar. Somit

konnte die statistische Analyse den BMI und die präoperative SS als eindeutige Einflussfaktoren auf das klinische Ergebnis aufzufindig machen.

Nach Unterteilung der Gesamtpopulation umfasste die erste Gruppe Patienten mit einem BMI kleiner 25 kg/m², die zweite Gruppe Studienteilnehmer mit einem BMI zwischen 25 und 32 kg/m² und die dritte Fraktion Patienten mit einem BMI größer 32 kg/m². Es konnte eine Verschlechterung der klinischen Ergebnisse in der Gruppe mit dem größeren BMI im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen festgestellt werden. Der ODI (siehe Abb. 32) lag in der Gruppe mit dem kleinsten BMI bei durchschnittlich 14,44 % (SD 3,52, n = 18), in der zweiten Gruppe bei einem Mittelwert von 28,52 % (SD 18,15, n = 31) und in der dritten Gruppe mit dem größten BMI bei durchschnittlich 39,67 % (SD 24,61, n = 12). Auch bezüglich des RMS zeigte sich im Vergleich der drei Gruppen ein zunehmend schlechteres Ergebnis mit zunehmendem BMI (siehe Abb. 33). Bei der Analyse der VAS wurde dokumentiert, dass die Punkte-Differenz in den Gruppen mit dem kleineren BMI deutlich größer war. Gruppe 1 konnte eine Schmerzreduktion von durchschnittlich 6,69 Punkten (SD 2,09, n = 18) aufweisen, während in der dritten Gruppe eine Punktereduktion von durchschnittlich 5,01 Punkten (SD 1,83, n = 12) vorlag (siehe Abb. 34).

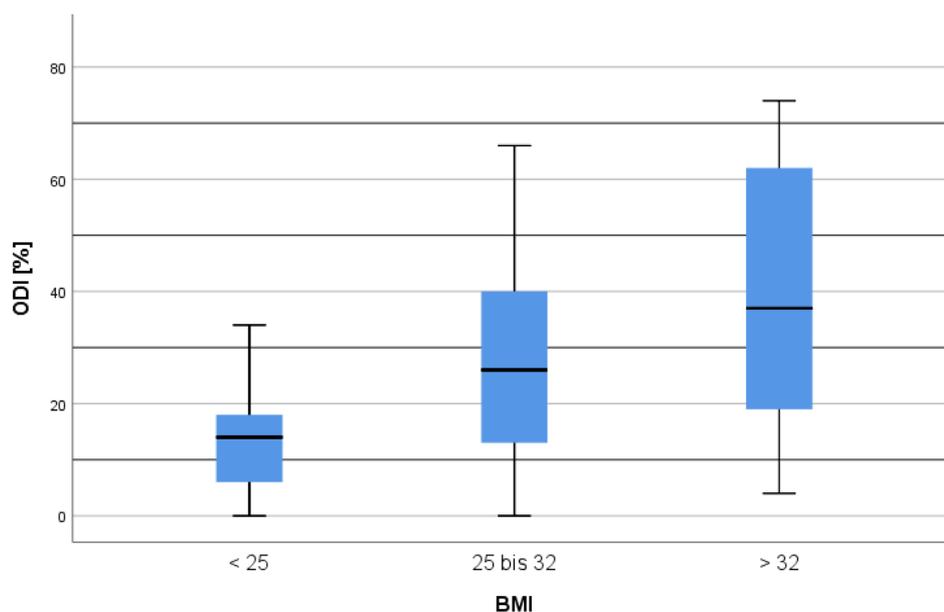


Abb. 32: Postoperative Ergebnisse des ODI, kategorisiert nach BMI

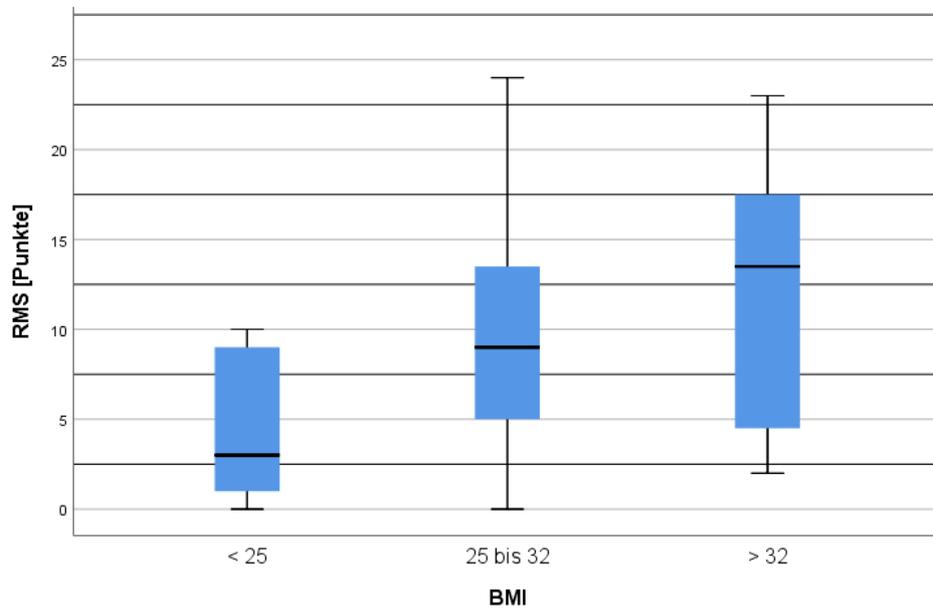


Abb. 33: Postoperative Ergebnisse des RMS, kategorisiert nach BMI

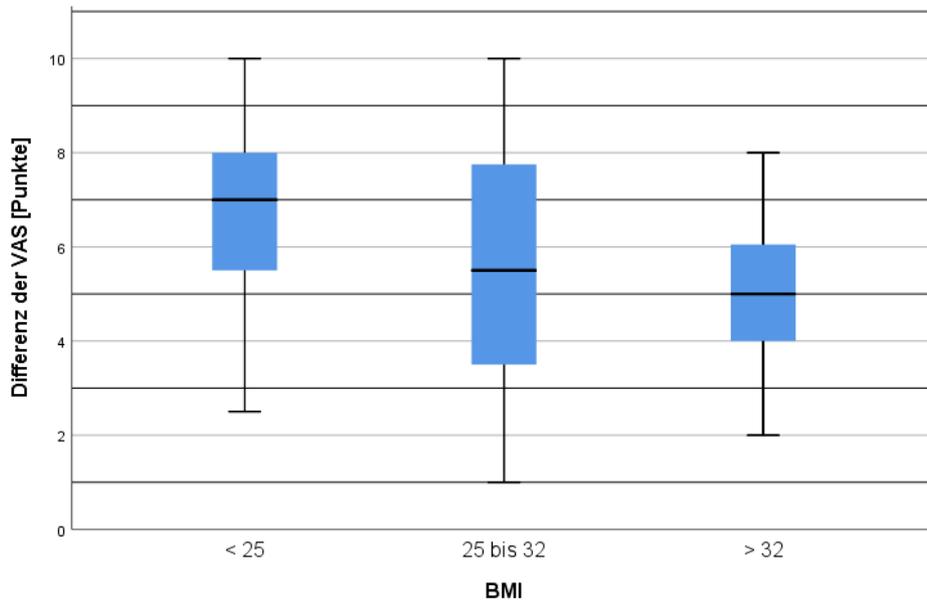


Abb. 34: Abnahme der VAS (prä- zu postoperativ), kategorisiert nach BMI

4 Diskussion

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit den radiologischen und klinischen Ergebnissen bei einem Gesamtkollektiv von 77 Patienten nach dorsaler Spondylose in TLIF-Technik. Die Studie zeigte, dass die Verwendung eines lordotischen Cages zu einem signifikanten Anstieg der SL, LL und des PT im Vergleich zu den nicht-lordotischen Cages führt. Dennoch konnte bei der Nachuntersuchung ein überlegenes klinisches Ergebnis der lordotischen Cages nicht bestätigt werden. Allerdings ließen sich der BMI und der präoperative SS als eindeutige Einflussfaktoren auf das klinische Ergebnis identifizieren.

4.1 Operationstechnik

Harms und Rolinger (1982) berichteten erstmals von den postoperativen Ergebnissen nach TLIF. Als modifizierter Zugang der PLIF-Technik sollte der TLIF-Ansatz einen direkten, unilateralen Zugang zum Foramen intervertebrale ermöglichen und gleichzeitig die direkte Dissektion sowie das chirurgische Trauma auf die Wirbelsäulenmuskulatur reduzieren. Sie erzielten in ihren Studien (Harms und Rolinger 1982; Harms und Jeszenszky 1998) bei über 200 Patienten eine sichere Fusion der Wirbelkörper sowohl ohne als auch in Kombination mit einer dorsalen Instrumentierung. Es traten sehr niedrige Komplikationsraten auf und bei allen Patienten ließ sich eine Linderung der Beschwerdesymptomatik nachweisen, sodass zugleich eine hohe Zufriedenheit der Patienten vorlag.

In der Studie der vorliegenden Arbeit ergab sich ebenfalls eine hohe Patientenzufriedenheit. 58 (90,6 %) Patienten zeigten sich glücklich über das postoperative Ergebnis und 60 (93,8 %) Patienten würden unter gleichen Voraussetzungen erneut einem operativen Eingriff zustimmen. Auch die signifikante Verbesserung der VAS und die guten postoperativen Ergebnisse des ODI und RMS sprechen für diese Operationsmethode.

Viele weitere Studien bestätigten über die Jahre die guten klinischen Ergebnisse der TLIF-Technik (Humphreys et al. 2001; Potter et al. 2005; Lauber et al. 2006; Hsieh et al. 2007; Audat et al. 2012; Rickert et al. 2015; Mobbs et al. 2015).

So zeigten Lowe et al. (2002) bei der postoperativen Analyse von 40 Patienten mit degenerativen Erkrankungen der Lendenwirbelsäule, dass sie unabhängig von der Anzahl der fusionierten Segmente in 90 % der Fälle mittels TLIF eine knöcherne Fusion erreichten. Sowohl die VAS als auch der ODI verbesserten sich in ihrer Studie signifikant ($p < 0,001$) von prä- auf postoperativ. Auf die Frage, ob sich die Patienten aufgrund ihres Ergebnisses erneut operieren lassen würden, antworteten 33 (82,5 %) Patienten, dass sie dies tun würden (Lowe et al. 2002).

Auch in einer Studie von Hackenberg et al. (2005) zeigte die TLIF-Technik vielversprechende Operationsergebnisse. Bei einer Fusionsrate von 89 % ergab die Fragenbogenanalyse eine signifikante Reduktion des ODI ($p < 0,001$) und der VAS ($p < 0,001/ p < 0,05$) für die gesamte Nachuntersuchungsperiode.

Aufgrund der guten klinischen Ergebnisse in diversen Studien und einer Vielzahl von Vorteilen gegenüber den bisherigen Zugangswegen der Wirbelsäulenfusion ist die TLIF-Technik bis heute für viele Operateure die favorisierte Operationstechnik. Allerdings haben auch die PLIF und ALIF sowie die minimalinvasive TLIF (MI-TLIF) ihre Überlegenheit in verschiedenen Teilbereichen bewiesen und werden deshalb in ähnlichem Umfang angewendet.

4.1.1 TLIF vs. PLIF

Die TLIF- und PLIF-Technik sind die am häufigsten durchgeführten Fusionsmethoden weltweit (Mobbs et al. 2015). Bei den postoperativen radiologischen Fusionsanalysen wurden bei diesen beiden Techniken keine signifikanten Unterschiede festgestellt (Audat et al. 2012; Sakeb und Ahsan 2013; Teng et al. 2017). Auch in einer biomechanischen Analyse ergaben sich äquivalente Ergebnisse für die segmentale Stabilität und die Auswirkungen der Operationstechnik auf die benachbarten Segmente (Sim et al. 2010).

Humphreys et al. (2001) verglichen in ihrer Studie 34 PLIF- mit 40 TLIF-Patienten. Es kam zu zehn Komplikationen in der PLIF-Gruppe und, im Vergleich dazu, zu keiner Komplikation in der TLIF-Gruppe. Park et al. (2005) berichteten über sieben Patienten mit Komplikationen bei insgesamt 99 PLIF-Operationen,

verglichen mit keiner bei 29 TLIF-Prozeduren. Neuere Studien wie Audat et al. (2012) und Sakeb et al. (2013) haben ebenfalls ähnliche Trends gezeigt. Als schwerwiegendste Komplikation traten dabei neurologische Defizite auf, die durch größere Nervenwurzelmanipulation bei Anwendung des posterioren Zugangs verursacht wurden (Barnes et al. 2001; Okuda et al. 2006; Cheung et al. 2013). Andere Studien kamen außerdem zu dem Schluss, dass mit der PLIF-Technik ein größerer Blutverlust und längere Operationszeiten einhergehen (Humphreys et al. 2001; Kunder et al. 2017). Beide Prozeduren erzielen ähnlich gute klinische Ergebnisse. Dennoch stellten sowohl Kunder et al. (2017) als auch Teng et al. (2017) in einer systematischen Übersicht und Meta-Analyse fest, dass die kleinsten Werte des ODI auf die TLIF-Technik zurückzuführen waren.

4.1.2 TLIF vs. ALIF

In einer biomechanischen Studie von Niemeyer et al. (2006) ergaben sich für den TLIF-Cage in Kombination mit Pedikelschrauben eine vergleichbare Segmentstabilität wie für die ALIF-Cages. Verschiedene Studien bestätigten ebenfalls vergleichbare Fusionsraten bei einem Vergleich dieser beiden Techniken (Faundez et al. 2008; Kim et al. 2010; Dorward et al. 2013). Hinsichtlich des klinischen Outcomes zeigten die meisten Studien ebenfalls kongruierende Ergebnisse (Kim et al. 2009a; Faundez et al. 2009). Kim et al. (2010) berichteten jedoch von einem besseren ODI bei der TLIF zwischen L4-5 und empfahlen deshalb dies TLIF-Technik auf dieser Segmenthöhe der ALIF-Technik vorzuziehen. In einer Metaanalyse von Teng et al. (2017) erzielte die ALIF-Technik statistisch signifikant bessere Ergebnisse als die TLIF-Technik bezüglich der postoperativen Bandscheibenhöhe ($p = 0,002$) und der postoperativen SL ($p = 0,013$). Es gab jedoch keinen statistisch signifikanten Unterschied in der postoperativen LL zwischen ALIF und TLIF. Die überlegene Leistung der ALIF-Technik ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass sie, im Vergleich zu den anderen Fusionstechniken, einen effizienter Zugang zur gesamten ventralen Oberfläche der Bandscheibe erleichtert, eine umfassende Entfernung des Bandscheibenmaterials ermöglicht sowie die Maximierung der Größe und Oberfläche des Implantats realisieren lässt (Hee et al. 2001; Truumees et al. 2008; Teng et al. 2017). Diese Zunahme

der postoperativen Bandscheibenhöhe erhöht das neuroforaminale Volumen, um indirekt austretende Nervenwurzeln zu dekomprimieren und radikuläre Symptome zu lindern (Rao et al. 2015). Allerdings besteht bei der ALIF-Technik das erhöhte Risiko einer tiefen Venenthrombose sowie einer direkten Gefäßverletzung durch die Retraktion der Iliakalgefäße (Baker et al. 1993; Talia et al. 2015). Sasso et al. (2005) berichteten in einer Reihe von 471 ALIF-Eingriffen von über 1,7 % intraoperativer vaskulärer Verletzungen. Bei 0,4 % der Patienten trat eine tiefe Venenthrombose auf. Diese Komplikationen können durch den transforaminalen Zugang der TLIF komplett vermieden werden. Bezüglich der Operationsdauer und dem geschätzten Blutverlust beider Techniken ist die Literatur zwiespalten. So berichteten Jiang et al. (2012) und Hee et al. (2001) von deutlich längerer Operationsdauer bei der ALIF-Technik, während Kim et al. (2009a) und Dorward et al. (2013) die TLIF-Technik mit einer längeren Operationsdauer assoziierten. Dies ist wahrscheinlich auf die Heterogenität der angewandten ALIF-Techniken zurückzuführen sowie auf die unterschiedliche technische Expertise und Erfahrung des operierenden Chirurgen (Phan et al. 2015). Dennoch zeigte sich in der systematischen Übersicht und Metaanalyse von Phan et al. (2015) für die TLIF-Gruppe eine signifikante Verringerung des Krankenhausaufenthaltes im Vergleich zur ALIF-Gruppe. Ursächlich für diesen Unterschied könnte die Notwendigkeit eines zusätzlichen posterioren Zugangs für die Pedikelinstrumentation bei der ALIF sein, die im Vergleich zur TLIF-Technik zu einem erhöhten chirurgischen Trauma und einem längeren Krankenhausaufenthalt führt.

4.1.3 TLIF vs. MI-TILF

Die TLIF-Technik wurde, neben den bereits vorhandenen minimalinvasiven Zugangswegen (LLIF/XLIF), in eine minimal-invasive Technik (MI-TLIF) weiterentwickelt. Foley und Gupta (2002) präsentierten diese Prozedur erstmalig im Jahr 2002. Diese Entwicklung zielte darauf ab, die umfassende Dissektion und Retraktion von Gewebe zu minimieren sowie den Blutverlust zu reduzieren, wodurch Transfusionen und Krankenhausaufenthalte reduziert werden könnten (Talia et al. 2015).

Eine Studie von Seng et al. (2013) konnte diese Zielsetzungen auch bestätigen. In ihrer Metaanalyse von 785 Patienten war die MI-TLIF mit einem geringeren Blutverlust, einem kürzeren Krankenhausaufenthalt und einem Trend zu besseren funktionellen Ergebnissen verbunden. Den reduzierten Blutverlust und Krankenhausaufenthalt bestätigten auch andere Studien (Dhall et al. 2008; Schizas et al. 2009; Shunwu et al. 2010; Talia et al. 2015). Bezüglich des besseren klinischen Outcomes berichteten Schizas et al. (2009) und Villavicencio et al. (2010) jedoch, dass postoperativ kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Operationstechniken bestand.

Einige Kritiker der MI-TLIF merkten an, dass sich die Exposition des Patienten gegenüber Röntgenstrahlung intraoperativ deutlich erhöht habe (Wang et al. 2010; Seng et al. 2013). Ursächlich dafür war vor allem die längere Operationszeit, die von vielen Studien beim direkten Vergleich der beiden Techniken beschrieben wurde (Shunwu et al. 2010; Villavicencio et al. 2010; Wang et al. 2010; Seng et al. 2013). Lee et al. (2014) stellte infolgedessen fest, dass die minimal-invasive Technik eine signifikante Lernkurve aufweist. In ihrer Studie beherrschten die Operateure erst nach durchschnittlich 44 Operationen die technisch anspruchsvolle Prozedur. Somit profitierten Patienten, welche am Ende der Studie operiert wurden, von einer kürzeren Operationsdauer und Bestrahlung, weniger postoperativen Schmerzen sowie von einer größeren Linderung ihrer neurologischen Symptome (Lee et al. 2014). Weiterhin ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Erfahrung des Chirurgen die Operationszeit und Strahlenexposition abnehmen und sich denen der offenen TLIF annähern werden (Lee et al. 2012).

Die interkorporelle Fusion ist bis heute eine effektive operative Behandlungsoption für eine Vielzahl von Wirbelsäulenerkrankungen, einschließlich degenerativer Pathologien, Traumata, Infektionen und Neoplasien. Die verschiedenen Ansätze, darunter die TLIF, PLIF, ALIF, MI-TLIF, OLIF/ATP und LLIF, besitzen jeweils ihre eigenen Risiken und Vorteile. Es gibt keine einheitliche Studienlage, die bewiesen hat, dass ein Ansatz einem anderen hinsichtlich Fusion oder der klinischen Ergebnisse signifikant überlegen ist. Bei der Auswahl des operativen

Zugangs sollte deshalb eine individuelle Entscheidung getroffen werden, die sowohl die patientenspezifische Indikationsstellung als auch die operativen Fähigkeiten und Erfahrungen des Chirurgen sowie die ortsgebundenen technologischen Möglichkeiten berücksichtigt.

4.2 Radiologische Ergebnisse

Die Wiederherstellung und der Erhalt des sagittalen Profils ist ein unbestrittenes Ziel in der Wirbelsäulenchirurgie und hatte in den letzten Jahrzehnten einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Cage-Technologie. Eine Abnahme der sagittalen Krümmung der Wirbelsäule nach einer dorsalen Spondylodese erhöht die Wahrscheinlichkeit eines segmentalen Zusammenbruchs oberhalb und unterhalb des Versteifungsniveaus. Im schlimmsten Fall führt ein enormes sagittales Ungleichgewicht zu einem fortschreitenden Versagen der dynamischen und statischen Stabilisatoren der Wirbelsäule, was Schmerzen und Funktionseinschränkungen für den Patienten zur Folge hat (Gödde et al. 2003). Deshalb sind radiologische Parameter, wie die SL, LL und PT, zur Evaluation der postoperativen Ergebnisse von entscheidender Bedeutung.

4.2.1 Einfluss der TLIF-Technik auf die SL und LL

Kim et al.(2009b) beurteilten bei 26 Patienten die radiologischen Ergebnisse nach monosegmentaler Spondylodese mit der TLIF-Technik, wobei die SL des fusionierten Segments sowie die LL im Mittelpunkt der Studie standen. Bei der Analyse zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen präoperativer und direkt postoperativer SL ($p = 0,000$). Der durchschnittliche Zuwachs an Lordose von $14,59^\circ$ auf $18,21^\circ$ konnte bis zur abschließenden Nachuntersuchung ($16,22^\circ$) jedoch nicht erhalten bleiben, sodass die postoperative Verbesserung der SL statistisch nicht mehr signifikant war ($p = 0,069$). Diesen Abfall führten die Autoren unter anderem auf die nicht lordotische Ausrichtung des Cages zurück (Kim et al. 2009b). Bezüglich der LL ließ sich keine statistisch signifikante Erhöhung zwischen den prä- und postoperativen Daten nachweisen ($p = 0,935$). In der letzten Nachuntersuchung zeigten die Messergebnisse der LL allerdings einen signifikanten Anstieg im Vergleich zu den präoperativen Werten ($p = 0,000$).

Die LL erhöhte sich dabei von durchschnittlichen $39,10^\circ$ auf $42,55^\circ$ (Kim et al. 2009b). Für die nicht signifikante Steigerung der LL in den ersten postoperativen Daten könnten die radiologischen Aufnahmen in liegender Position zu einem bedeutenden Anteil verantwortlich sein.

Eine Gegenüberstellung dieser Studienergebnisse mit den Daten aus der vorliegenden Arbeit zeigt, dass beide Studien durch die Implantation eines Cages eine tendenzielle Vergrößerung der SL und LL von prä- zu postoperativ erzielten. In der Gesamtpopulation dieser Arbeit veränderte sich die SL von durchschnittlichen $13,54^\circ$ auf $16,29^\circ$ und die LL verzeichnete einen Zuwachs der Lordose von $50,48^\circ$ auf $52,82^\circ$.

Eine Studie von Yson et al. (2012) legte nach 57 fusionierten Segmenten in bilateraler TLIF-Technik ebenfalls vergleichbare Ergebnisse dar. Bei monosegmentalen Fusionen betrug der mittlere Anstieg der segmentalen Lordose $5,2^\circ$. In vergleichender Betrachtung zeigte sich in dieser Population ein größerer Anstieg der Lordose. Bei alleiniger Betrachtung der "Gruppe lordotische Cages" ergaben sich allerdings vergleichbare Werte ($5,21^\circ$). Dies mag unter anderem an der bilateralen Operationsmethode liegen, bei der durch die breite, bilaterale Facettektomie die physikalische Kompressionsbarriere effizienter beseitigt und ein größerer Grad an Kompression durch das Schrauben-Stab-System ermöglicht wurde (Yson et al. 2012). Rein technisch und biomechanisch entspricht diese Operationstechnik daher eher der PLIF-Technik.

In einer Studie von Ould-Slimane et al. (2012) traten ebenfalls Verbesserungen der radiologischen Parameter nach monosegmentaler Fusionsoperation durch die TLIF-Technik auf. Die Lordose der Lendenwirbelsäule auf Fusionsniveau ($p = 0,001$) und die maximale Lordose der Lendenwirbelsäule ($p = 0,01$) nahmen postoperativ signifikant zu (Ould-Slimane et al. 2012).

In vergleichender Betrachtung haben sich auch Hsieh et al. (2007) mit den radiologischen Ergebnissen nach Operationen mit TLIF- und ALIF-Technik befasst. Mit der TLIF-Technik stellten sie jedoch keine signifikante Änderung der durchschnittlichen SL ($-0,1^\circ$) und LL ($-2,1^\circ$) fest. Im Gegensatz dazu verzeichnete die

ALIF-Technik einen signifikanten Anstieg der gemittelten SL um $8,3^\circ$ und LL um $6,2^\circ$ ($p = 0,00001$) (Hsieh et al. 2007).

Zu diesem Schluss kamen auch Watkins et al. (2014), die mittels einer retrospektiven radiologischen Analyse die radiologischen Ergebnisse von ALIF-, LLIF-, und TLIF-Technik verglichen. Dabei ergab die gruppeninterne Analyse, dass die LLIF-Gruppe ($2,2^\circ$) und die ALIF-Gruppe ($4,5^\circ$) die SL signifikant verbesserten, während die TLIF-Gruppe ($0,8^\circ$) dies nicht tat. Wichtig zu beachten ist, dass sich die Patientenzahl in der TLIF-Gruppe deutlich von denen der anderen Gruppe unterschied. In einer größeren Stichprobe hätten die radiologischen Parameter möglicherweise ähnliche Ergebnisse geliefert. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die Indikationsstellung bei einem solchen Vergleich von Operationstechniken eine entscheidende Rolle einnimmt. So sind beispielsweise Wirbelsäulendefekte zwischen L5-S1 für gewöhnlich von einem lateralen Ansatz aus nicht zugänglich, sodass tendenziell eher die beiden anderen Techniken zum Einsatz kamen. Dies könnte zusätzlich zu einer Verzerrung der Ergebnisse geführt haben (Watkins et al. 2014).

4.2.2 Einfluss des lordotischen Cages auf die SL und LL

Bei den bisher beschriebenen Studien kamen Cages mit unterschiedlichen Materialien von unterschiedlichen Herstellern zum Einsatz. Keiner dieser Cages besaß jedoch eine lordotische Ausrichtung. Als eine der zentralen Fragenstellungen dieser Arbeit galt es herauszufinden, welchen Einfluss die Lordosierung eines Cages auf die Rekonstruktion des sagittalen Profils hat.

Obwohl es große Variationen in der Wirbelsäulen- und Beckenmorphologie gibt, wurden Rahmenbedingungen geschaffen, um ideale Werte für regionale und globale Parameter zu bestimmen. Die Formel $LL = PI \pm 9$ von Schwab et al. (2010) kann zum Erlangen einer patientenspezifischen sagittalen Ausrichtung eingesetzt werden. Die Erhöhung des lumbalen Lordosewinkels einer hypolordotischen Wirbelsäule zur Anpassung an den spinopelvinen Morphotyp des Patienten gewährleistet eine angemessene lordotische Ausrichtung (Schwab et al. 2010). Diese Korrelationskette ist bereits von vielen Autoren ausführlich

untersucht worden (Mac-Thiong et al. 2004; Roussouly et al. 2005; Boulay et al. 2006; Schwab et al. 2006b).

In dieser Arbeit lag die durchschnittliche PI bei 56,22°. Postoperativ ermöglichten die lordotischen Cages eine Re-Lordosierung um durchschnittlich 5,5° auf eine durchschnittliche LL von 56,6°. Damit waren die postoperativen Durchschnittswerte von PI und LL in der "Gruppe lordotische Cages" nahezu identisch, womit von einer bestmöglichen Ausrichtung des sagittalen Profils auszugehen ist. Obwohl sich in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" die durchschnittliche LL verkleinerte, befand auch sie sich mit einem mittleren LL-Wert von 48,5° (SD 11,86) weiterhin innerhalb der gesetzten Rahmenbedingung von $\pm 9^\circ$.

Gödde et al. (2003) stellten bei Implantation in PLIF-Technik fest, dass die 3° und 8°-lordotischen Cages die SL und die LL signifikant erhöhten. Die mittlere SL stieg in der "Gruppe lordotische Cages" zwischen 3° und 8° an, während sie in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" einen Verlust von 3 bis 8° erfuhr. Auf allen Segmentebenen zeigte die postoperative Veränderung der SL signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ($p < 0,05$). Auch bezüglich der LL zeigte sich ein entsprechender Trend. Die durchschnittliche LL der "Gruppe nicht-lordotische Cages" betrug 55° vor und 48° nach der Operation, während die mittlere LL der "Gruppe lordotische Cages" einen Anstieg von 45° auf 53° ergab (Gödde et al. 2003).

In der vorliegenden Arbeit traten vergleichbare Ergebnisse auf. Sowohl die durchschnittliche SL (5,21°) als auch die durchschnittliche LL (5,5°) vergrößerte sich in der "Gruppe lordotische Cages" signifikant ($p < 0,001$). Im Vergleich dazu ließ sich bei der "Gruppe nicht-lordotische Cages", wie bei Gödde et al. (2003), eine Verkleinerung der Parameter feststellen.

Sembrano et al. (2017) stellten ebenfalls eine signifikante Zunahme der SL unter Verwendung von lordotischen XLIF-Cages (2,8°, $p = 0,01$) im Vergleich zu den nicht-lordotischen XLIF-Cages (0,6°, $p = 0,71$) fest, jedoch in geringerem Ausmaß als in dieser Arbeit. Diese geringe Zunahme ist überraschend, zumal bei der XLIF-Technik eine direkte Expansion des Bandscheibenkompartiments möglich ist. Malham et al. (2017) fanden in ihrer Studie allerdings eine größere Zunahme

unter Verwendung von XLIF-Cages. Bei ihnen zeigte sich eine beträchtliche Zunahme von 7,9° bis 9,4° ($p = 0,0497$) der SL. Der tendenzielle Zuwachs an Lordose, den der lordotische Cage im Vergleich zum nicht-lordotischen Cage in der Studie von Sembrano et al. (2017) erzielte, ist dennoch vergleichbar mit den Ergebnissen dieser Arbeit.

Zu gegenteiligen Ergebnissen kam eine Studie von Lee et al. (2015), die zwei unterschiedlich stark lordotische Cages (4° und 8° Lordose) gegenüberstellten. Dabei zeigten beide Gruppen keine signifikanten Unterschiede in der SL und LL. Lediglich sechs Monate postoperativ stieg die LL in der 8°-Gruppe im Vergleich zum unmittelbar postoperativen Tag signifikant an (Lee et al. 2015). Bei der Beurteilung der Ergebnisse dieser Studie muss jedoch berücksichtigt werden, dass alle Patienten vor der dorsalen Spondylodese bereits aus verschiedenen Gründen an der Wirbelsäule operiert wurden. Im Rahmen dieser Voroperationen könnten Komplikationen wie muskuläre und ossäre Läsionen aufgetreten sein, durch die eine optimale Re-Lordosierung beeinträchtigt wurde.

Neben der Lordosierung der Cages sollte auch der grundlegenden Struktur des Cages Beachtung geschenkt werden. Kim et al. (2015) stellten in ihrer retrospektiven Studie die radiologischen Ergebnisse eines rechteckigen und eines nierenförmigen Cages gegenüber. Sie konnten in der Gruppe mit den nierenförmigen Cages eine signifikante Wiederherstellung der SL im Vergleich zur Gruppe mit den rechteckigen Cages nachweisen. Außerdem zeigte sich eine signifikante Vergrößerung der LL, die bis zur letzten Nachuntersuchung (6 Monaten postoperativ) bewahrt werden konnte (Kim et al. 2015). Diese Ergebnisse implizieren, dass nicht nur die Lordosierung des Cages alleine dafür verantwortlich ist die lumbopelvine sagittale Ausrichtung wiederherzustellen. In der vorliegenden Studie unterschied sich die Cageform nur hinsichtlich der lordotischen Ausrichtung. Eine Aussage zu dem Einfluss der grundlegenden Struktur auf das postoperative Ergebnis kann deshalb nicht getroffen werden.

Neben der Implantation des Cages fand im Rahmen der dorsalen Spondylodese über den transforaminalen Zugang auch ein Stab-Schrauben-System Anwendung. Durch die Stabbiegung und Schraubenkompression während der

Instrumentierung des Pedikelschrauben- und Stangengebildes wurde ebenso versucht, eine vermehrte Lordosierung der Lendenwirbelsäule zu erzielen. Die während dieses Prozesses gebildete Lordose könnte in der vorliegenden Studie einen ebenso großen Einfluss auf die spinopelvinen Parameter haben, wie der lordotische Winkel des Cages (Lee et al. 2015). Audat et al. (2012) berichteten beispielsweise von Schwierigkeiten bei der Aufrechterhaltung einer zufriedenstellenden LL, wenn sie dies ausschließlich über die Geometrie des Cages versuchten.

Aktuelle Studien beschäftigten sich mit distrahierbaren Cages, die anfangs als kleineres Implantat platziert und dann vorsichtig erweitert werden können. Damit sollen sie eine Korrektur der Lordose ermöglichen, ohne den Patienten mit den Traumata und Nebenwirkungen zu belasten, die mit dem Einsetzen eines statischen Cages verbundenen sind. In einer Studie von Massie et al. (2018) verbesserten solche expandierbaren Cages die SL signifikant um $4,94^\circ$ ($p < 0,001$) und erhöhten die Bandscheibenhöhe um 3,1 mm ($p < 0,001$). Weitere Studien zeigen vergleichbare vielversprechende Resultate (Kim et al. 2016; Rymarczuk et al. 2017), sodass dieser Art von Cage auch in zukünftigen Studien unbedingt intensivere Beachtung geschenkt werden sollte, vor allem in Zusammenhang mit den weiter voranschreitenden Entwicklungen der minimal invasiven Fusionschirurgie.

4.2.3 Pelvic Tilt

Neben der SL und LL ist auch der PT ein entscheidender radiologischer Parameter zur Beurteilung der spinopelvinen Balance. Aus diesem Grund nutzen viele Studien den PT einerseits zur Beurteilung des Fusionsergebnisses, andererseits als verlässliches Maß für den patientenspezifischen Kompensationsmechanismus (Lazennec et al. 2000; Kumar et al. 2001; Shin et al. 2013; Phan et al. 2018). Falls sich durch einen Verlust der Lordose aufgrund eines Traumas oder altersbedingter Degenerationsprozesse der Rumpf anteflektiert, wird reaktiv versucht die physiologische Körperhaltung durch Neupositionierung der Wirbelsäule über dem Becken wiederherzustellen (Grohs und Urach 2019). Dies ermöglicht beispielsweise die Retroversion des Beckens, welche wiederum den PT vergrößert. Somit ist ein großer PT ein Indiz für eine Wirbelsäulenfehlstellung (Grohs und

Urach 2019). Der Normalwert für den PT beträgt bei Männern 12° und bei Frauen 10° , wie aus verschiedenen Untersuchungen mit großen asymptomatischen Patientengruppen hervorgeht (Legaye et al. 1998; Le Huec und Hasegawa 2016). Viele Studien konnten in den letzten Jahren nachweisen, dass eine Reduktion des PT eine positive Auswirkung auf das sagittale Profil und die klinischen Ergebnisse hat (Lafage et al. 2009; Kim et al. 2011; Shin et al. 2013). Deshalb sollte auch bei chirurgischen Interventionen ein postoperativer Winkel von unter 20° angestrebt werden (Schwab et al. 2010).

In der gesamten Studienpopulation dieser Arbeit lag der PT präoperativ bei $20,3^\circ$. In der "Gruppe lordotische Cages" senkte sich der PT um durchschnittlich $1,66^\circ$ auf $19,28^\circ$. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" zeichnete sich ein entgegengesetzter Trend ab. Der PT vergrößerte sich in dieser Gruppe um durchschnittlich $0,72^\circ$ auf einen Wert von $20,3^\circ$. Damit erzielte die Implantation des lordotische Cage einen PT kleiner als 20° , der von Schwab et al. (2010) als operatives Ziel beschrieben wurde, um das sagittale Profil zu korrigieren und gute klinische Ergebnisse zu ermöglichen. In der klinischen Studie von Göttsche et al. (2003) konnte mit Hilfe des lordotischen Cages im Vergleich zu den nicht-lordotischen Cages ebenfalls eine Verkleinerung des PT erzielt werden. Somit ermöglicht die lordotische Form der Cages nicht nur eine Verbesserung der LL, sondern auch in ganzheitlicher Betrachtung eine Optimierung der spinopelvinen Balance.

Die radiologischen Ergebnisse der Arbeit lassen den Schluss zu, dass die Implantation eines lordotischen Cages mit Hilfe der TLIF-Technik zu einer signifikanten Verbesserung der Lordose im Bereich der Lendenwirbelsäule führt. Dabei sollte nicht nur der absolute Grad der Lordose, sondern auch die Orientierung der Lendensegmente in der sagittalen Ebene und in Relation zur Beckenlage, beurteilt werden, um über eine optimale Positionierung der fusionierten Wirbelsegmente das bestmögliche Operationsergebnis zu erzielen.

4.3 Klinische Ergebnisse

Ein wichtiges Ziel der interkorporellen Fusion ist, neben der Wiederherstellung des anatomischen Wirbelsäulenprofils, die Linderung der Schmerzsymptomatik und die Verbesserung der physischen Mobilität, die durch die Wirbelsäulenpathologie entstanden ist. Zur einheitlichen Evaluation werden dafür standardisierte Fragebogen, wie beispielsweise die VAS und der ODI, verwendet. Diese ermöglichen eine detaillierte Auskunft über den körperlichen Zustand des Patienten sowie über sein subjektives Schmerzempfinden.

Fritzell et al. (2001) untersuchten in einer multizentrischen Studie den klinischen Nutzen einer operative Wirbelsäulenfusion im Vergleich zu einem konservativen Therapieansatz. Dabei wurden nur Patienten in die Studie eingeschlossen, die seit mehreren Jahren an starken chronischen Rückenschmerzen litten und deren Beschwerden eine radiologisch nachweisbare Bandscheibendegenerationen zugrunde lag. Die Rückenschmerzen, gemessen anhand der VAS, reduzierten sich in der chirurgischen Gruppe um 33 %, verglichen mit 7 % in der nicht-chirurgischen Gruppe. Ebenfalls verringerte sich der Grad der körperlichen Behinderung, evaluiert mit Hilfe des ODI, um 25 % in der chirurgischen Gruppe im Gegensatz zu 6 % in der konservativ behandelten Gruppe. Infolge dieser signifikanten Ergebnisse ($p < 0,0002$ / $p < 0,015$) kamen sie zu dem Schluss, dass eine lumbale Versteifungsoperation die Schmerzen und physischen Einschränkungen bei Patienten mit schweren chronischen Rückenschmerzen wirksamer lindern kann als herkömmliche konservative Behandlungen (Fritzell et al. 2001). Diese Beobachtungen konnten auch von zahlreichen Studien in den darauffolgenden Jahren bestätigt werden (Fritzell et al. 2002; McAfee et al. 2005; Potter et al. 2005; Yan et al. 2008; Rao et al. 2014).

In einer Studie von Yan et al. (2008) zeigte sich bei der operativen Behandlung von 187 Patienten in TLIF-Technik eine signifikante Verbesserung der VAS von 7,18 auf 2,84 Punkten. Vergleichbare Werte ließen sich in der vorliegenden Arbeit feststellen. Von prä- auf postoperativ konnte mit dem transforaminalen Zugang und TLIF-Cages eine Verbesserung der VAS von durchschnittlich 5,94 Punkten erzielt werden.

Lowe et al. (2002) beschrieben ebenfalls eine signifikante Reduktion des Schmerzempfindens ($p < 0,0001$) nach dorsaler Spondylodese mittels TLIF. Bei ihrer Kohorte, die 30 Patienten umfasste, lag eine Verbesserung der VAS von 8,3 auf 3,2 vor. Unabhängig von der Populationsgröße zeigt sich demnach eine deutliche Schmerzreduktion nach Operation mittels TLIF-Technik.

Bezüglich des ODI stellte eine Studie von Teng et al. (2017), in einer vergleichenden Metanalyse aller vier großen Operationstechniken, für die TLIF-Technik den niedrigsten postoperativen ODI fest. Hackenberg et al. (2005) beschrieben einen postoperativen ODI von 33 %. In dieser Studie lag der durchschnittliche postoperative ODI bei 25,7 %. Es gibt jedoch auch Studien in der Literatur mit noch niedrigeren postoperativen ODI-Werten. So zeigte die Arbeit von Park und Foley (2008) einen postoperativen ODI von 16 % nach MI-TLIF und Lauber et al. (2006) einen postoperativen ODI von 20 %, zwei Jahre nach dorsaler Spondylodese über einen transforaminalen Zugang. Alle Studien, die sich mit den klinischen Ergebnissen nach TLIF befasst haben, hatten gemeinsam, dass dieser operative Eingriff eine Besserung der Schmerzsymptomatik und Wiederherstellung der körperlichen Funktion erzielte.

4.3.1 Einfluss der Cage-Form

Schwerpunktmäßig wurde in dieser Arbeit untersucht, welchen Einfluss die Optimierung von radiologisch messbaren Wirbelsäulenparameter durch Lordosierung der Cage-Form auf das klinische Ergebnis hat. Frühere Studien konnten bereits einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Grad an LL und lumbalen Rückenschmerzen nachweisen.

In einer epidemiologischen Studie von Tsuji et al. (2001), an der 509 Personen im Alter von 50 - 85 Jahren teilnahmen, korrelierte die VAS signifikant invers mit der Lendenlordose ($p < 0,0006$). Die Lendenlordose war in der Gruppe mit Schmerzen im unteren Rückenbereich um etwa 4° geringer, unabhängig von Alter und Geschlecht. Dieses Ergebnis wurde durch eine große Metaanalyse mit 796 Patienten mit lumbalen Rückenschmerzen und 927 gesunden Probanden gestützt. Hier stellten Chun et al. (2017) eine starke Beziehung zwischen den lumbalen Rückenschmerzen und der verminderten LL fest, insbesondere im

Vergleich zu den gesunden Kontrollprobanden. Ebenso konnten Schwab et al. (2006a) eine signifikante Korrelation zwischen dem Verlust an LL und hohen Werten des ODI bei Patienten mit präexistierenden spinalen Deformitäten feststellen ($p < 0,007$).

Aufgrund des in der oben genannten Literatur beschriebenen Zusammenhangs zwischen lumbalem Rückenschmerz und verminderter Lendenlordose, wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine postoperative Zunahme der Lendenlordose durch Lordosierung des Cages zu einer Verbesserung des klinischen Ergebnisses führt. Trotz der signifikanten Gruppenunterschiede bezüglich der radiologischen Parameter (SS, LL und PT) zugunsten der "Gruppe lordotische Cages" zeigte sich in unserer Analyse bezüglich der klinischen Ergebnisse keine signifikante Korrelation. Für alle Fragebögen, die VAS, den ODI und den RMS, ließen sich postoperativ in beiden Cage-Gruppen ähnliche Werte dokumentieren. Auch bei der körperlichen Nachuntersuchung zeigte sich für keinen der Teilabschnitte (Anamnese, Wirbelsäulenprofil, Palpation, Bewegungsumfang, klinische Testung, periphere Durchblutung, Motorik und Sensibilität) eine signifikante Verbesserung des klinischen Erscheinungsbilds, die mit der Optimierung der spinopelvinen Parameter in Korrelation gesetzt werden konnte.

Aus der Sicht des Autors sind für diese Ergebnisse verschiedene Ursachen denkbar:

Erstens spielt die Studienpopulationsgröße bei der Beurteilung der Ergebnisse eine entscheidende Rolle. In den oben beschriebenen Studien von Tsuji et al. (2001) und Chun et al. (2017) umfassten die Patientenkohorten mehrere hundert bis zu über 1.600 Probanden. Es ist daher denkbar, dass der beschriebene Effekt erst in sehr großen Studienpopulationen, wie im Rahmen einer multizentrischen Studie, nachzuweisen ist. So fanden andere Studien wie Ashraf et al. bei 150 Patienten mit lumbalen Rückenschmerzen ebenfalls keine signifikante Korrelation zwischen Lendenlordose und ODI.

Zweitens kann der klinische Zugewinn, der durch die Verbesserung der radiologischen Parameter entsteht, von anderen Faktoren überlagert oder aufgehoben werden. Lumbosakrale Schmerzen, die sich auf die Iliosakralgelenke oder die

Ligamente des Beckenrings beziehen, vermögen es, die genaue Zuordnung des Schmerzauslöser zu verfälschen (Schwarzer et al. 1995). Darüber hinaus haben auch perioperative Faktoren, wie die korrekte Indikationsstellung, eine angemessene Dekompression und ein sorgfältiger Umgang mit den Weichteilen bei solch komplexen, operativen Eingriffen einen Einfluss auf die klinischen Ergebnisse.

Drittens darf bei der Analyse eines Rückenleidens die psychologische Komponente nicht unberücksichtigt bleiben. In der Studie von Tandon et al. (1999), die sich mit chronischen Schmerzpatienten noch dorsaler Fusion in PLIF-Technik befasste, ließ sich eine signifikante Korrelation zwischen dem psychischen Leidensdrucks der Patienten und dem selbstberichteten Grad an körperlicher Funktionseinschränkung nachweisen. Nach Mayr et al. (2003) wird jegliche Form der medizinischen Behandlung durch psychiatrische Kofaktoren beeinflusst. Je weniger strukturelle und neurologische Defizite sie feststellten, desto mehr waren psychiatrische Symptome vorhanden und umgekehrt. Sie empfahlen deshalb dem psychiatrischen Status ihrer Patienten mit Rückenschmerzen, vor allem bei unzureichenden körperlichen Defiziten, mehr Aufmerksamkeit zu schenken (Mayr et al. 2003). Auch Levy et al. (2002) und Hägg et al. (2003) untersuchten in ihren Studien den Zusammenhang zwischen Depression und klinischen Ergebnissen nach lumbalen Wirbelsäulenoperationen. Hägg et al. (2003) stellten fest, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Stärke der Schmerzbeschreibung und der Ausprägung der depressiven Symptome bestand. Levy et al. (2002) zeigten, dass Patienten mit Depression als Nebendiagnose ein schlechteres funktionelles Ergebnis und eine schlechte gesundheitsbezogene Lebensqualität erzielten. In der vorliegenden Arbeit wurde die psychische Komponente nicht mit einbezogen. In Folgestudien wäre dies zur ganzheitlichen Beurteilung der Schmerzentstehung sinnvoll.

4.3.2 Aussagekraft der SS

Roussouly et al. (2005) klassifizierten vier verschiedene Haltungstypen anhand häufiger Variationen im sagittalen Profil der Wirbelsäule, auch in Relation zu spezifischen Beckenparametern. Die Typisierung anhand des SS spielt dabei eine wichtige Rolle. Den vierten Haltungstyp definierten sie mit einem SS größer als

45°. Bedingt durch das schlecht ausbalancierte Wirbelsäulenprofil besteht bei diesem Haltungstyp ein erhöhtes Risiko für die Ausbildung einer Spondylolisthesis und Spondylolyse (Labelle et al. 2011).

Im vorliegenden Patientenkollektiv ließ sich mittels MANOVA ein signifikanter Einfluss des präoperativen SS ($p = 0,048$) auf die postoperativen Ergebnisse des ODI und RMS feststellen. Patienten mit einem präoperativen SS über 45° ($n = 8$) zeigten im Vergleich zu den anderen Patienten ein schlechtes klinisches Ergebnis mit einem deutlich höheren ODI um 13,25 Prozentpunkte. Daher sollte der SS bei der präoperativen Planung und Indikationsstellung besonders berücksichtigt werden.

4.3.3 Aussagekraft des PT

Bei Patienten mit degenerativen Veränderungen der Wirbelsäule ist der PT häufig erhöht, um über eine Becken-Retroversion die verminderte LL auszugleichen (Grohs und Urach 2019). Schwab et al. (2010) stellten bei einer retrospektiven Analyse von 125 Patienten fest, dass ein PT kleiner als 20° einen signifikanten Einfluss auf das klinische Ergebnis hat ($p = 0,012$). In der vorliegenden Studie konnte mit der multivariaten Analyse keine Korrelation zwischen dem postoperativen PT und den klinischen Ergebnissen festgestellt werden. Im Vergleich zu dem Studienergebnis von Schwab et al. (2010) lag der postoperative PT in der "Gruppe lordotische Cages" zwar unterhalb der anzustrebenden 20°, jedoch unterschieden sich die Werte zwischen den beiden Gruppen nur um 1°. In der Studie von Schwab et al. (2010) betrug die Differenz zwischen den beiden Gruppen über 20° (31,8° vs. 10,0°). Demzufolge ist ein Einfluss auf das klinische Ergebnis möglicherweise erst ab einer größeren Differenz zu erwarten. Ren et al. (2015) sowie Kim et al. (2011) stellten ebenfalls bei Patienten mit Spondylolisthesis einen Zusammenhang zwischen dem klinischen Ergebnis und der Reduktion des PT fest. Allerdings muss beachtet werden, dass diese Studien eine relativ geringe Anzahl an Patienten inkludierten (18 und 32). Außerdem wurden viele verschiedene radiologische und klinische Parameter miteinander korreliert, ohne das Problem der Alphafehler-Kumulierung durch multiples Testen zu berücksichtigen.

4.3.4 Einfluss des BMI

In der vorliegenden Arbeit zeigte die multivariante Analyse einen signifikanten Einfluss des BMI auf die klinischen Ergebnisse sowohl bei der VAS als auch bei dem ODI und der RMS ($p < 0,015$). Patienten mit einem BMI größer 32 kg/m^2 hatten deutlich höhere postoperative Werte als Patienten mit einem BMI kleiner 25 kg/m^2 . Ähnliche Ergebnisse zeigten Han et al. (1997). Sie berichteten, dass Übergewicht, gemessen anhand eines hohen BMI, mit lumbalen Rückenschmerzen assoziiert ist. Ursächlich dafür sei der Verlust der Wirbelsäulenbeweglichkeit, der zwangsläufig mit zunehmendem Körpergewicht einhergehe (Han et al. 1997). Viele andere Autoren haben zudem beschrieben, dass eine vermehrte Kompressionsbelastung der Bandscheiben, wie es bei starken Übergewicht der Fall ist, degenerative Prozesse beschleunigt (Ohshima et al. 1995; Ishihara et al. 1996; Handa et al. 1997). Daraus lässt sich schließen, dass es wichtig ist neben den radiologischen Parametern auch andere Faktoren, wie beispielsweise das Körpergewicht, als Einflussfaktor auf die klinischen Ergebnisse zu berücksichtigen.

Aus der Analyse der klinischen Parameter dieser Arbeit lässt sich folgern, dass die Form des Cage als einzelne Entität keine signifikante Verbesserung der klinischen Ergebnisse erzielt. Unbestritten ist jedoch, dass es für ein zufriedenstellendes operatives Ergebnis unabdingbar ist, die physiologischen Richtwerte der radiologischen Parameter in der präoperativen Planung und intraoperativen Korrektur zu berücksichtigen. Es sollten weitere prospektive Studien in ausreichender Fallzahl durchgeführt werden, um die Zusammenhänge zwischen den radiologischen Parametern und den klinischen Ergebnissen weiter zu erforschen.

4.4 Methodenkritik

Aufgrund des Studiendesigns war das Zeitintervall bis zum Nachuntersuchungstermin in beiden Gruppen unterschiedlich lang. In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" fand die Nachuntersuchung nach 5,7 Jahren statt, während in der "Gruppe lordotische Cages" bereits nach 4,2 Jahren eine Nachuntersuchung erfolgte. Dies konnte zu einer gewissen Verzerrung führen, insbesondere hinsichtlich der klinischen Ergebnisse. Eine weitere Limitation der klinischen Ergebnisse betrifft die Methodik der Fragebogenevaluation. Für den ODI und RMS konnten im Gegensatz zur VAS keine präoperativen Daten erhoben werden, womit ein Vergleich von prä- und postoperativen Daten nicht möglich war. Um diese Probleme zu beseitigen, sollten prospektive Studien mit Fragebogenanalysen unbedingt prä- als auch postoperative Werte erheben.

Eine weitere Limitation stellt die operative Erfahrung der Chirurgen dar. Die Implantation der lordotischen Cages fand im Vergleich zu den nicht-lordotischen Cages vermehrt zum Ende des Studienzeitraums statt. Zwar hatten die Chirurgen schon zuvor Operationen in TLIF-Technik durchgeführt, dennoch ist gerade in der Literatur bei einer technisch anspruchsvollen Operationstechnik ein Lernerfolg zu erwarten (Lee et al. 2014). Somit hatte die zunehmende Erfahrung der Operateure möglicherweise einen vorteilhaften Einfluss auf die Wiederherstellung des sagittalen Profils bei letzteren Patienten, die mit lordotischen Cages versorgt wurden. Um einen aussagekräftigeren Vergleich zu ermöglichen, sollte die operative Anwendung verschiedener Cage-Formen deshalb möglichst zeitgleich erfolgen.

Intraoperativ erfolgte zudem eine manuelle Biegung der Stangen des Stab-Schrauben-System. Diese patientenspezifische Stabkrümmung könnte ebenfalls die postoperativen Ergebnisse beeinflusst haben (Lee et al. 2015).

4.5 Schlussfolgerung

Die in dieser Arbeit vorliegende Ergebnisse zeigt, dass das Korrekturpotenzial von lordotischen TLIF-Cages den nicht-lordotischen Cages in der radiologischen Analyse signifikant überlegen ist. Die lordotischen Cages erzielten zudem eine bessere Rekonstruktion des sagittalen Profils durch Re-Lordosierung der Lendenwirbelsäule sowie eine Optimierung der spinopelvinen Parameter. Deshalb wird die Anwendung von lordotisch ausgerichteten Cages bei dorsalen Fusionsoperationen empfohlen.

Trotz der signifikanten Unterschiede in der radiologischen Analyse kann kein präferabler klinischer Nutzen der lordotischen Cages nachgewiesen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass multiple Faktoren einen Einfluss auf das klinische Ergebnis nach dorsaler Spondylodese in TLIF-Technik haben. Zum einen machen die richtige Indikationsstellung, eine adäquate Dekompression und der sorgfältige Umgang mit den Weichteilen einen großen Teil des Erfolges aus. Zum anderen spielen patientenspezifische Kofaktoren wie das Körpergewicht und psychische Komorbiditäten eine bedeutende Rolle für die klinischen Ergebnisse. Eine alleinige Zurückführung des klinischen Erfolgs auf die geringgradigen Änderungen der radiologischen Parameter vereinfacht das komplexe Konstrukt aus multiplen Faktoren, die allesamt den klinischen Behandlungserfolg mitbeeinflussen.

5 Zusammenfassung

Die TLIF ist eine der etabliertesten Fusionstechniken in der Lendenwirbelsäulenchirurgie. Zur Implantation werden verschiedene Cage-Technologien verwendet, die sich in Form und Design unterscheiden. Verschiedene Studien erzielten eine Verbesserung der Lendenlordose mit Cages in lordotischer Ausrichtung im Vergleich zu nicht-lordotischen Cages. Es ist jedoch weitgehend unbekannt, in welchem Umfang sich das radiologische Ergebnis nach TLIF auch in den klinischen Scores widerspiegelt, insbesondere in der Langzeitbeobachtung. Ziel dieser Studie war es deshalb herauszufinden, ob die in der Literatur beschriebene Verbesserung der Lendenlordose und die damit verbundene Optimierung der radiologischen Parameter sich in der vorliegenden Patientenpopulation bestätigen lässt. Weiterhin sollte untersucht werden, welchen Effekt eine radiologische Verbesserung auf die klinischen Ergebnisse bei der Nachuntersuchung haben.

Die vorliegende Arbeit verglich deshalb in einem retrospektiven Studiendesign 37 Patienten mit nicht-lordotischem Cage und 40 Patienten mit einem 5°-lordotischen Cage, die von 2014 bis 2017 mono- oder bisegmental in TLIF-Technik am Universitätsklinikum Tübingen implantiert wurden. Es erfolgte eine Analyse von radiologischen Parametern prä- und postoperativ (LL, SL, PT und SS). Zusätzlich wurden prospektiv klinische Parameter (ODI, RMS und VAS) im Rahmen einer körperlichen Nachuntersuchung, durchschnittlich fünf Jahre postoperativ, evaluiert.

Die "Gruppe lordotische Cages" zeigte im Vergleich zur "Gruppe nicht-lordotische Cages" signifikant bessere radiologische Ergebnisse. Die LL nahm in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" um 1,26° ab und stieg in der "Gruppe lordotische Cages" um 5,5° an ($p < 0,001$). In der "Gruppe lordotische Cages" stieg die SL um 5,21° an, während sie in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" stagnierte ($p < 0,001$). Der PT verzeichnete in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" einen Anstieg von 0,72°, in der "Gruppe lordotische Cages" eine Abnahme von 1,66° ($p = 0,008$).

Im Gegensatz dazu ergaben die klinischen Parameter keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Durchschnittlich fünf Jahre nach der Operation betrug bei der postoperativen Nachuntersuchung der ODI in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" 22,62 % im Vergleich zu 28,29 % in der "Gruppe lordotische Cages" ($p = 0,252$). Der RMS lag bei 8,66 Punkten in der "Gruppe lordotische Cages" im Vergleich zu 7,52 Punkten in der "Gruppe nicht-lordotische Cages" ($p = 0,482$). Auch der prä- auf postoperative Vergleich der Schmerzreduktion mittels VAS zeigte keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,128$). In der "Gruppe nicht-lordotische Cages" reduzierte sich die VAS um 6,43 Punkte von 9,02 auf 2,59 Punkte, in der "Gruppe lordotische Cages" um 5,53 Punkte von präoperativen 8,86 auf postoperative 3,33 Punkte. Bei Betrachtung der multivariaten Analyse zeigten sich der BMI (Wilks $\lambda = 0,57$, $F(4, 44) = 3,61$, $p = 0,012$) und der präoperativen SS (Wilks $\lambda = 0,66$, $F(4, 44) = 2,54$, $p = 0,05$) als signifikante Einflussfaktoren auf die postoperativen Ergebnisse des ODI und der RMS. Alter, Geschlecht, Cage-Typ und postoperativer PT hatten keinen signifikanten Einfluss.

Es zeigt sich, dass die lordotisch ausgerichteten Cages eine bessere Re-Lordosierung der Lendenwirbelsäule und damit Wiederherstellung des sagittalen Profils ermöglichen. Sie sollten daher in der Klinik bevorzugt verwendet werden. Allerdings haben multiple Faktoren einen Einfluss auf das klinische Ergebnis nach einer dorsalen Spondylodese, sodass der Unterschied der radiologischen Parameter nicht alleine für den klinischen Erfolg der Operation verantwortlich ist.

6 Literaturverzeichnis

- Adams, M. A.; Dolan, P.; Hutton, W. C.; Porter, R. W. (1990): Diurnal changes in spinal mechanics and their clinical significance. In: *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 72-B (2), S. 266–270. DOI: 10.1302/0301-620X.72B2.2138156.
- Adams, M. A.; Freeman, B. J.; Morrison, H. P.; Nelson, I. W.; Dolan, P. (2000): Mechanical initiation of intervertebral disc degeneration. In: *Spine* 25 (13), S. 1625–1636. DOI: 10.1097/00007632-200007010-00005.
- Adams, M. A.; McNally, D. S.; Dolan, P. (1996): 'STRESS' DISTRIBUTIONS INSIDE INTERVERTEBRAL DISCS. In: *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 78-B (6), S. 965–972. DOI: 10.1302/0301-620X.78B6.0780965.
- Aichmair, Alexander; Birkenmaier, Christof; Birkmann, Christiane; Bischofberger, Simon; Mader, Konrad; Schönagl, Björn Philip (2019): Wirbelsäule. 946 Abbildungen. Hg. v. Gregor Stein, Peer Eysel und Max Joseph Scheyerer. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag (Expertise Orthopädie und Unfallchirurgie).
- Albee, Fred H. (1911): TRANSPLANTATION OF A PORTION OF THE TIBIA INTO THE SPINE FOR POTT'S DISEASE. In: *JAMA* LVII (11), S. 885. DOI: 10.1001/jama.1911.04260090107012.
- Andersson, Gunnar B. J. (1999): Epidemiological features of chronic low-back pain. In: *Lancet (London, England)* 354 (9178), S. 581–585. DOI: 10.1016/s0140-6736(99)01312-4.
- Antoniou, J.; Arlet, V.; Goswami, T.; Aebi, M.; Alini, M. (2001): Elevated synthetic activity in the convex side of scoliotic intervertebral discs and endplates compared with normal tissues. In: *Spine* 26 (10), E198-206. DOI: 10.1097/00007632-200105150-00002.
- Audat, Z.; Moutasem, O.; Yousef, K.; Mohammad, B. (2012): Comparison of clinical and radiological results of posterolateral fusion, posterior lumbar interbody fusion and transforaminal lumbar interbody fusion techniques in the treatment of degenerative lumbar spine. In: *Singapore Medical Journal* 53 (3), S. 183–187.
- Baek, S-W; Kim, C.; Chang, H. (2015): The relationship between the spinopelvic balance and the incidence of adjacent vertebral fractures following percutaneous vertebroplasty. In: *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA* 26 (5), S. 1507–1513. DOI: 10.1007/s00198-014-3021-x.
- Bagby, George W. (1988): Arthrodesis by the Distraction-Compression Method Using a Stainless Steel Implant. In: *ORTHOPEDICS* 11 (6), S. 931–934. DOI: 10.3928/0147-7447-19880601-13.
- Baker, J. K.; Reardon, P. R.; Reardon, M. J.; Heggeness, M. H. (1993): Vascular injury in anterior lumbar surgery. In: *Spine* 18 (15), S. 2227–2230. DOI: 10.1097/00007632-199311000-00014.
- Barnes, B.; Rodts, G. E.; McLaughlin, M. R.; Haid, R. W. (2001): Threaded cortical bone dowels for lumbar interbody fusion: over 1-year mean follow up in 28 patients. In: *Journal of Neurosurgery* 95 (1 Suppl), S. 1–4. DOI: 10.3171/spi.2001.95.1.0001.
- Bergner, M.; Bobbitt, R. A.; Carter, W. B.; Gilson, B. S. (1981): The Sickness Impact Profile: development and final revision of a health status measure. In: *Medical Care* 19 (8), S. 787–805. DOI: 10.1097/00005650-198108000-00001.
- Bijur, P. E.; Silver, W.; Gallagher, E. J. (2001): Reliability of the visual analog scale for measurement of acute pain. In: *Academic emergency medicine : official journal of the Society for Academic Emergency Medicine* 8 (12), S. 1153–1157. DOI: 10.1111/j.1553-2712.2001.tb01132.x.
- Blondel, Benjamin; Schwab, Frank; Ungar, Benjamin; Smith, Justin; Bridwell, Keith; Glassman, Steven et al. (2012): Impact of magnitude and percentage of global sagittal plane correction on health-related quality of life at 2-years follow-up. In: *Neurosurgery* 71 (2), 341-8; discussion 348. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31825d20c0.

- Bono, Christopher M.; Lee, Casey K. (2004): Critical analysis of trends in fusion for degenerative disc disease over the past 20 years: influence of technique on fusion rate and clinical outcome. In: *Spine* 29 (4), 455-63; discussion Z5. DOI: 10.1097/01.brs.0000090825.94611.28.
- Boos, N.; Nerlich, A. G.; Wiest, I.; Mark, K. von der; Aebi, M. (1997): Immunolocalization of type X collagen in human lumbar intervertebral discs during ageing and degeneration. In: *Histochemistry and cell biology* 108 (6), S. 471–480. DOI: 10.1007/s004180050187.
- Boos, Norbert; Weissbach, Sabine; Rohrbach, Helmut; Weiler, Christoph; Spratt, Kevin F.; Nerlich, Andreas G. (2002): Classification of age-related changes in lumbar intervertebral discs: 2002 Volvo Award in basic science. In: *Spine* 27 (23), S. 2631–2644. DOI: 10.1097/00007632-200212010-00002.
- Boucher, H. H. (1959): A METHOD OF SPINAL FUSION. In: *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 41-B (2), S. 248–259. DOI: 10.1302/0301-620X.41B2.248.
- Boulay, C.; Tardieu, C.; Hecquet, J.; Benaim, C.; Mouilleseaux, B.; Marty, C. et al. (2006): Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. In: *European Spine Journal* 15 (4), S. 415–422. DOI: 10.1007/s00586-005-0984-5.
- Brantigan, J. W. (1994): Pseudarthrosis rate after allograft posterior lumbar interbody fusion with pedicle screw and plate fixation. In: *Spine* 19 (11), 1271-9; discussion 1280. DOI: 10.1097/00007632-199405310-00014.
- Brantigan, J. W.; Steffee, A. D. (1993): A carbon fiber implant to aid interbody lumbar fusion. Two-year clinical results in the first 26 patients. In: *Spine* 18 (14), S. 2106–2107. DOI: 10.1097/00007632-199310001-00030.
- Brantigan, J. W.; Steffee, A. D.; Lewis, M. L.; Quinn, L. M.; Persenaire, J. M. (2000): Lumbar interbody fusion using the Brantigan I/F cage for posterior lumbar interbody fusion and the variable pedicle screw placement system: two-year results from a Food and Drug Administration investigational device exemption clinical trial. In: *Spine* 25 (11), S. 1437–1446. DOI: 10.1097/00007632-200006010-00017.
- Brantigan, John W.; Neidre, Arvo; Toohey, John S. (2004): The Lumbar I/F Cage for posterior lumbar interbody fusion with the variable screw placement system: 10-year results of a Food and Drug Administration clinical trial. In: *The Spine Journal* 4 (6), S. 681–688. DOI: 10.1016/j.spinee.2004.05.253.
- Brian M Jurbala; John D Kelly; Daniel T Dempsey; Dina F Caroline (1997): Gastroparaspinal fistula: a late postoperative complication of anterior spinal fusion. In: *Orthopedics* 20 (10), S. 985–987. DOI: 10.3928/0147-7447-19971001-18.
- Bridwell, K. H.; Sedgewick, T. A.; O'Brien, M. F.; Lenke, L. G.; Baldus, C. (1993): The role of fusion and instrumentation in the treatment of degenerative spondylolisthesis with spinal stenosis. In: *Journal of spinal disorders* 6 (6), S. 461–472. DOI: 10.1097/00002517-199306060-00001.
- Buckup, Klaus; Buckup, Johannes (2012): Klinische Tests an Knochen, Gelenken und Muskeln. Untersuchungen ; Zeichen ; Phänomene. 5. Aufl. s.l.: Georg Thieme Verlag KG. Online verfügbar unter <http://ebooks.thieme.de/9783131009951>.
- Burns, B. H. (1933): AN OPERATION FOR SPONDYLOLISTHESIS. In: *Lancet (London, England)* 221 (5728), S. 1233. DOI: 10.1016/S0140-6736(00)85724-4.
- Castro, Igor de; Santos, Daniel Paes dos; Christoph, Daniel de Holanda; Landeiro, José Alberto (2005): The history of spinal surgery for disc disease: an illustrated timeline. In: *Arquivos de neuro-psiquiatria* 63 (3A), S. 701–706. DOI: 10.1590/s0004-282x2005000400030.
- Chang, C. C.; Kuwana, N.; Ito, S.; Ikegami, T. (1999): Response of cerebral blood flow and cerebrovascular reactivity to acetazolamide in patients with dementia and idiopathic normal-pressure hydrocephalus. In: *Neurosurgical focus* 7 (4), e10. DOI: 10.3171/foc.1999.7.6.11.

- Chen, D.; Fay, L. A.; Lok, J.; Yuan, P.; Edwards, W. T.; Yuan, H. A. (1995): Increasing neuroforaminal volume by anterior interbody distraction in degenerative lumbar spine. In: *Spine* 20 (1), S. 74–79. DOI: 10.1097/00007632-199501000-00014.
- Cheung, Kenneth M. C.; Karppinen, Jaro; Chan, Danny; Ho, Daniel W. H.; Song, You-Qiang; Sham, Pak et al. (2009): Prevalence and pattern of lumbar magnetic resonance imaging changes in a population study of one thousand forty-three individuals. In: *Spine* 34 (9), S. 934–940. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181a01b3f.
- Cheung, Nicholas K.; Ferch, Richard D.; Ghahreman, Ali; Bogduk, Nikolai (2013): Long-term follow-up of minimal-access and open posterior lumbar interbody fusion for spondylolisthesis. In: *Neurosurgery* 72 (3), 443-50; discussion 450-1. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31827fce96.
- Cho, Woojin; Wu, Chunhui; Mehdod, Amir A.; Transfeldt, Ensor E. (2008): Comparison of cage designs for transforaminal lumbar interbody fusion: a biomechanical study. In: *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)* 23 (8), S. 979–985. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2008.02.008.
- Chun, Se-Woong; Lim, Chai-Young; Kim, Keewon; Hwang, Jinseub; Chung, Sun G. (2017): The relationships between low back pain and lumbar lordosis: a systematic review and meta-analysis. In: *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 17 (8), S. 1180–1191. DOI: 10.1016/j.spinee.2017.04.034.
- Cloward, R. B. (1953): The treatment of ruptured lumbar intervertebral discs by vertebral body fusion. I. Indications, operative technique, after care. In: *Journal of Neurosurgery* 10 (2), S. 154–168. DOI: 10.3171/jns.1953.10.2.0154.
- Cloward, Ralph B. (1985): Posterior Lumbar Interbody Fusion Updated. In: *Clinical orthopaedics and related research* &NA; (193), 16-19. DOI: 10.1097/00003086-198503000-00003.
- Cotler, H. B.; Cotler, J. M.; Stoloff, A.; Cohn, H. E.; Jerrell, B. E.; Martinez, L. et al. (1985): The use of autografts for vertebral body replacement of the thoracic and lumbar spine. In: *Spine* 10 (8), S. 748–756. DOI: 10.1097/00007632-198510000-00010.
- Cutler, Aaron R.; Siddiqui, Saquib; Mohan, Avinash L.; Hillard, Virany H.; Cerabona, Franco; Das, Kaushik (2006): Comparison of polyetheretherketone cages with femoral cortical bone allograft as a single-piece interbody spacer in transforaminal lumbar interbody fusion. In: *Journal of Neurosurgery: Spine* 5 (6), S. 534–539. DOI: 10.3171/spi.2006.5.6.534.
- Davidson, Megan; Keating, Jennifer (2005): Oswestry Disability Questionnaire (ODQ). In: *Australian Journal of Physiotherapy* 51 (4), S. 270. DOI: 10.1016/S0004-9514(05)70016-7.
- Davis, H. (1994): Increasing rates of cervical and lumbar spine surgery in the United States, 1979-1990. In: *Spine* 19 (10), 1117-23; discussion 1123-4. DOI: 10.1097/00007632-199405001-00003.
- Deyo, Richard A.; Gray, Darryl T.; Kreuter, William; Mirza, Sohail; Martin, Brook I. (2005): United States trends in lumbar fusion surgery for degenerative conditions. In: *Spine* 30 (12), 1441-5; discussion 1446-7. DOI: 10.1097/01.brs.0000166503.37969.8a.
- Dhall, Sanjay S.; Wang, Michael Y.; Mummaneni, Praveen V. (2008): Clinical and radiographic comparison of mini-open transforaminal lumbar interbody fusion with open transforaminal lumbar interbody fusion in 42 patients with long-term follow-up. In: *Journal of Neurosurgery: Spine* 9 (6), S. 560–565. DOI: 10.3171/SPI.2008.9.08142.
- Diebo, Bassel G.; Varghese, Jeffrey J.; Lafage, Renaud; Schwab, Frank J.; Lafage, Virginie (2015): Sagittal alignment of the spine: What do you need to know? In: *Clinical neurology and neurosurgery* 139, S. 295–301. DOI: 10.1016/j.clineuro.2015.10.024.
- Dorward, Ian G.; Lenke, Lawrence G.; Bridwell, Keith H.; O’Leary, Patrick T.; Stoker, Geoffrey E.; Pahys, Joshua M. et al. (2013): Transforaminal versus anterior lumbar interbody fusion in long deformity constructs: a matched cohort analysis. In: *Spine* 38 (12), E755-62. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31828d6ca3.

- Downie, W. W.; Leatham, P. A.; Rhind, V. M.; Wright, V.; Branco, J. A.; Anderson, J. A. (1978): Studies with pain rating scales. In: *Annals of the Rheumatic Diseases* 37 (4), S. 378–381. DOI: 10.1136/ard.37.4.378.
- Exner, V.; Keel, P. (2000): Erfassung der Behinderung bei Patienten mit chronischen Rückenschmerzen Validierung einer deutschen Version des "Roland & Morris disability questionnaire" sowie verschiedener numerischer Ratingskalen. In: *Schmerz (Berlin, Germany)* 14 (6), S. 392–400. DOI: 10.1007/s004820000010.
- Fairbank, J. C.; Couper, J.; Davies, J. B.; O'Brien, J. P. (1980): The Oswestry low back pain disability questionnaire. In: *Physiotherapy* 66 (8), S. 271–273.
- Farfan, H. F.; Cossette, J. W.; Robertson, G. H.; Wells, R. V.; Kraus, H. (1970): The effects of torsion on the lumbar intervertebral joints: the role of torsion in the production of disc degeneration. In: *JBJS* 52 (3), S. 468–497.
- Fatima, Nida; Massaad, Elie; Shankar, Ganesh M.; Shin, John H. (2020): Structural Allograft versus Polyetheretherketone Implants in Patients Undergoing Spinal Fusion Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. In: *World neurosurgery* 136, S. 101–109. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.01.006.
- Faundez, Antonio A.; Mehbod, Amir A.; Wu, Chunhui; Wu, Wentien; Ploumis, Avraam; Transfeldt, Ensor E. (2008): Position of interbody spacer in transforaminal lumbar interbody fusion: effect on 3-dimensional stability and sagittal lumbar contour. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 21 (3), S. 175–180. DOI: 10.1097/BSD.0b013e318074bb7d.
- Faundez, Antonio A.; Schwender, James D.; Safriel, Yair; Gilbert, Thomas J.; Mehbod, Amir A.; Denis, Francis et al. (2009): Clinical and radiological outcome of anterior-posterior fusion versus transforaminal lumbar interbody fusion for symptomatic disc degeneration: a retrospective comparative study of 133 patients. In: *E Spine J* 18 (2), S. 203–211. DOI: 10.1007/s00586-008-0845-0.
- Foley, Kevin T.; Gupta, Sanjay K. (2002): Percutaneous pedicle screw fixation of the lumbar spine: preliminary clinical results. In: *Journal of Neurosurgery* 97 (1 Suppl), S. 7–12. DOI: 10.3171/spi.2002.97.1.0007.
- Fredrickson, B. E.; Baker, D.; McHolick, W. J.; Yuan, H. A.; Lubicky, J. P. (1984): The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. In: *JBJS* 66 (5), S. 699–707. DOI: 10.2106/00004623-198466050-00008.
- Fritsch, E. W. (2003): Spondylolisthesis. In: *Der Orthopäde* 32 (4), 340-60, quiz 361. DOI: 10.1007/s00132-003-0453-y.
- Fritzell, P.; Hägg, O.; Wessberg, P.; Nordwall, A. (2001): 2001 Volvo Award Winner in Clinical Studies: Lumbar fusion versus nonsurgical treatment for chronic low back pain: a multicenter randomized controlled trial from the Swedish Lumbar Spine Study Group. In: *Spine* 26 (23), 2521-32; discussion 2532-4. DOI: 10.1097/00007632-200112010-00002.
- Fritzell, Peter; Hägg, Olle; Wessberg, Per; Nordwall, Anders (2002): Chronic low back pain and fusion: a comparison of three surgical techniques: a prospective multicenter randomized study from the Swedish lumbar spine study group. In: *Spine* 27 (11), S. 1131–1141. DOI: 10.1097/00007632-200206010-00002.
- Frymoyer, J. W.; Pope, M. H.; Costanza, M. C.; Rosen, J. C.; Goggin, J. E.; Wilder, D. G. (1980): Epidemiologic studies of low-back pain. In: *Spine* 5 (5), S. 419–423. DOI: 10.1097/00007632-198009000-00005.
- Fuchs, J.; Busch, M.; Lange, C.; Scheidt-Nave, C. (2012): Prevalence and patterns of morbidity among adults in Germany. Results of the German telephone health interview survey German Health Update (GEDA) 2009. In: *Bundesgesundheitsbl.* 55 (4), S. 576–586. DOI: 10.1007/s00103-012-1464-9.
- Gertzbein, S. D.; Betz, R.; Clements, D.; Errico, T.; Hammerberg, K.; Robbins, S. et al. (1996): Semirigid instrumentation in the management of lumbar spinal conditions combined with

circumferential fusion. A multicenter study. In: *Spine* 21 (16), 1918-25; discussion 1925-6. DOI: 10.1097/00007632-199608150-00018.

Gödde, Stefan; Fritsch, Ekkehard; Dienst, Michael; Kohn, Dieter (2003): Influence of cage geometry on sagittal alignment in instrumented posterior lumbar interbody fusion. In: *Spine* 28 (15), S. 1693–1699. DOI: 10.1097/01.BRS.0000083167.78853.D5.

Gore, Mugdha; Sadosky, Alesia; Stacey, Brett R.; Tai, Kei-Sing; Leslie, Douglas (2012): The burden of chronic low back pain: clinical comorbidities, treatment patterns, and health care costs in usual care settings. In: *Spine* 37 (11), E668-77. DOI: 10.1097/BRS.0b013e318241e5de.

Grohs, Josef Georg; Urach, Florian (2019): Das sagittale Profil der Wirbelsäule. In: *Die Wirbelsäule* 03 (03), S. 182–188. DOI: 10.1055/a-0850-3393.

Gruber, Helen E.; Ma, Defang; Hanley, Edward N.; Ingram, Jane; Yamaguchi, Dean T. (2001): Morphologic and molecular evidence for gap junctions and connexin 43 and 45 expression in annulus fibrosus cells from the human intervertebral disc. In: *J. Orthop. Res.* 19 (5), S. 985–989. DOI: 10.1016/S0736-0266(00)00072-3.

Guo, H. R.; Tanaka, S.; Halperin, W. E.; Cameron, L. L. (1999): Back pain prevalence in US industry and estimates of lost workdays. In: *American Journal of Public Health* 89 (7), S. 1029–1035. DOI: 10.2105/AJPH.89.7.1029.

Habtemariam, A.; Grönblad, M.; Virri, J.; Airaksinen, O.; Luukkonen, M.; Turunen, V. et al. (1998): Comparative immunohistochemical study of group II (synovial-type) and group IV (cytosolic) phospholipases A2 in disc prolapse tissue. In: *European Spine Journal* 7 (5), S. 387–393. DOI: 10.1007/s005860050095.

Hackenberg, Lars; Halm, Henry; Bullmann, Viola; Vieth, Volker; Schneider, Marc; Liljenqvist, Ulf (2005): Transforaminal lumbar interbody fusion: a safe technique with satisfactory three to five year results. In: *European Spine Journal* 14 (6), S. 551–558. DOI: 10.1007/s00586-004-0830-1.

Hadra, B. E. (1975): The Classic Wiring of the Vertebrae as a Means of Immobilization in Fracture and Potts?? Disease. In: *Clinical orthopaedics and related research* 112 (1), 4???. DOI: 10.1097/00003086-197510000-00002.

Hägg, O.; Fritzell, P.; Hedlund, R.; Möller, H.; Ekselius, L.; Nordwall, A. (2003): Pain-drawing does not predict the outcome of fusion surgery for chronic low-back pain: a report from the Swedish Lumbar Spine Study. In: *European Spine Journal* 12 (1), S. 2–11. DOI: 10.1007/s00586-002-0427-5.

Haher, T. R.; O'Brien, M.; Dryer, J. W.; Nucci, R.; Zipnick, R.; Leone, D. J. (1994): The role of the lumbar facet joints in spinal stability. Identification of alternative paths of loading. In: *Spine* 19 (23), 2667-70 discussion 2671.

Hammerberg, Kim W. (2005): New concepts on the pathogenesis and classification of spondylolisthesis. In: *Spine* 30 (6 Suppl), S4-11. DOI: 10.1097/01.brs.0000155576.62159.1c.

Han, T. S.; Schouten, J. S.; Lean, M. E.; Seidell, J. C. (1997): The prevalence of low back pain and associations with body fatness, fat distribution and height. In: *International journal of obesity and related metabolic disorders : journal of the International Association for the Study of Obesity* 21 (7), S. 600–607. DOI: 10.1038/sj.ijo.0800448.

Handa, T.; Ishihara, H.; Ohshima, H.; Osada, R.; Tsuji, H.; Obata, K. (1997): Effects of hydrostatic pressure on matrix synthesis and matrix metalloproteinase production in the human lumbar intervertebral disc. In: *Spine* 22 (10), S. 1085–1091. DOI: 10.1097/00007632-199705150-00006.

Harms, J.; Rolinger, H. (1982): Die operative Behandlung der Spondylolisthese durch dorsale Aufrichtung und ventrale Verblockung. In: *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete* 120 (3), S. 343–347. DOI: 10.1055/s-2008-1051624.

- Harms, J. G.; Jeszenszky, D. (1998): Die posteriore, lumbale, interkorporelle Fusion in unilateraler transforaminaler Technik. In: *Operative Orthopädie und Traumatologie* 10 (2), S. 90–102. DOI: 10.1007/s00064-006-0112-7.
- Harrington, P. R. (1988): The history and development of Harrington instrumentation. by Paul R. Harrington, 1973. In: *A Publication of The Association of Bone and Joint Surgeons® | CORR®* 227, S. 3–5.
- Harrington, Paul R. (1962): Treatment of scoliosis. correction and internal fixation by spine instrumentation. In: *JBJS* 44 (4), S. 591–634.
- Heary, Robert F.; Madhavan, Karthik (2008): The history of spinal deformity. In: *Neurosurgery* 63 (3 Suppl), S. 5–15. DOI: 10.1227/01.NEU.0000324520.95150.4C.
- Hee, H. T.; Castro, F. P.; Majd, M. E.; Holt, R. T.; Myers, L. (2001): Anterior/posterior lumbar fusion versus transforaminal lumbar interbody fusion: analysis of complications and predictive factors. In: *Journal of spinal disorders* 14 (6), S. 533–540. DOI: 10.1097/00002517-200112000-00013.
- Hibbs, Russell A. (1964): An Operation for Progressive Spinal Deformities. In: *A Publication of The Association of Bone and Joint Surgeons® | CORR®* (35), S. 4. Online verfügbar unter https://journals.lww.com/clinorthop/citation/1964/00350/an_operation_for_progressive_spinal_deformities.2.aspx.
- Houten, John K.; Post, Nicholas H.; Dryer, Joseph W.; Errico, Thomas J. (2006): Clinical and radiographically/neuroimaging documented outcome in transforaminal lumbar interbody fusion. In: *Neurosurgical focus* 20 (3), E8. DOI: 10.3171/foc.2006.20.3.9.
- Hoy, Damian; Bain, Christopher; Williams, Gail; March, Lyn; Brooks, Peter; Blyth, Fiona et al. (2012): A systematic review of the global prevalence of low back pain. In: *Arthritis & Rheumatism* 64 (6), S. 2028–2037. DOI: 10.1002/art.34347.
- Hoy, Damian; Toole, Michael J.; Morgan, Damien; Morgan, Chris (2003): Low back pain in rural Tibet. In: *Lancet (London, England)* 361 (9353), S. 225–226. DOI: 10.1016/S0140-6736(03)12254-4.
- Hsieh, Patrick C.; Koski, Tyler R.; O'Shaughnessy, Brian A.; Sugrue, Patrick; Salehi, Sean; Ondra, Stephen; Liu, John C. (2007): Anterior lumbar interbody fusion in comparison with transforaminal lumbar interbody fusion: implications for the restoration of foraminal height, local disc angle, lumbar lordosis, and sagittal balance. In: *Journal of Neurosurgery: Spine* 7 (4), S. 379–386. DOI: 10.3171/SPI-07/10/379.
- Humphreys, S. C.; Hodges, S. D.; Patwardhan, A. G.; Eck, J. C.; Murphy, R. B.; Covington, L. A. (2001): Comparison of posterior and transforaminal approaches to lumbar interbody fusion. In: *Spine* 26 (5), S. 567–571. DOI: 10.1097/00007632-200103010-00023.
- Huskisson, E.C (1974): MEASUREMENT OF PAIN. In: *Lancet (London, England)* 304 (7889), S. 1127–1131. DOI: 10.1016/s0140-6736(74)90884-8.
- Ishihara, H.; McNally, D. S.; Urban, J. P.; Hall, A. C. (1996): Effects of hydrostatic pressure on matrix synthesis in different regions of the intervertebral disk. In: *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)* 80 (3), S. 839–846. DOI: 10.1152/jappl.1996.80.3.839.
- Isiklar, Z. U.; Lindsey, R. W.; Coburn, M. (1996): Ureteral injury after anterior lumbar interbody fusion. A case report. In: *Spine* 21 (20), S. 2379–2382. DOI: 10.1097/00007632-199610150-00016.
- Jiang, Sheng-Dan; Chen, Jiang-Wei; Jiang, Lei-Sheng (2012): Which procedure is better for lumbar interbody fusion: anterior lumbar interbody fusion or transforaminal lumbar interbody fusion? In: *Archives of orthopaedic and trauma surgery* 132 (9), S. 1259–1266. DOI: 10.1007/s00402-012-1546-z.
- Jin, Kezhi; Sorock, Gary S.; Courtney, Theodore K. (2004): Prevalence of low back pain in three occupational groups in Shanghai, People's Republic of China. In: *Journal of safety research* 35 (1), S. 23–28. DOI: 10.1016/j.jsr.2003.11.002.

- Kalichman, Leonid; Hunter, David J. (2008): Diagnosis and conservative management of degenerative lumbar spondylolisthesis. In: *E Spine J* 17 (3), S. 327–335. DOI: 10.1007/s00586-007-0543-3.
- Kandziora, Frank (2003): Einfluss von Cagedesign, Carriersystemen und Wachstumsfaktoren auf die intervertebrale Spondylodese. Humboldt-Universität zu Berlin, Medizinische Fakultät - Universitätsklinikum Charité. Online verfügbar unter <https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/14535>.
- Katz, Jeffrey N. (2006): Lumbar disc disorders and low-back pain: socioeconomic factors and consequences. In: *JBJS* 88 Suppl 2 (suppl_2), S. 21–24. DOI: 10.2106/JBJS.E.01273.
- Kim, Choll W.; Doerr, Todd M.; Luna, Ingrid Y.; Joshua, Gita; Shen, Sun Ren; Fu, Xin; Wu, Ai-Min (2016): Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Using Expandable Technology: A Clinical and Radiographic Analysis of 50 Patients. In: *World neurosurgery* 90, S. 228–235. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.02.075.
- Kim, Jin-Sung; Kang, Byung-Uk; Lee, Sang-Ho; Jung, Byungjoo; Choi, Young-Geun; Jeon, Sang Hyeop; Lee, Ho Yeon (2009a): Mini-transforaminal lumbar interbody fusion versus anterior lumbar interbody fusion augmented by percutaneous pedicle screw fixation: a comparison of surgical outcomes in adult low-grade isthmic spondylolisthesis. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 22 (2), S. 114–121. DOI: 10.1097/BSD.0b013e318169bff5.
- Kim, Jin-Sung; Lee, Kil-Yong; Lee, Sang-Ho; Lee, Ho-Yeon (2010): Which lumbar interbody fusion technique is better in terms of level for the treatment of unstable isthmic spondylolisthesis? In: *Journal of neurosurgery. Spine* 12 (2), S. 171–177. DOI: 10.3171/2009.9.SPINE09272.
- Kim, Jong-Tae; Shin, Myung-Hoon; Lee, Ho-Jin; Choi, Du-Yong (2015): Restoration of lumbopelvic sagittal alignment and its maintenance following transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF): comparison between straight type versus curvilinear type cage. In: *E Spine J* 24 (11), S. 2588–2596. DOI: 10.1007/s00586-015-3899-9.
- Kim, Mi Kyung; Lee, Sun-Ho; Kim, Eun-Sang; Eoh, Whan; Chung, Sung-Soo; Lee, Chong-Suh (2011): The impact of sagittal balance on clinical results after posterior interbody fusion for patients with degenerative spondylolisthesis: a pilot study. In: *BMC musculoskeletal disorders* 12, S. 69. DOI: 10.1186/1471-2474-12-69.
- Kim, Sang-Bum; Jeon, Taek-Soo; Heo, Youn-Moo; Lee, Woo-Suk; Yi, Jin-Woong; Kim, Tae-Kyun; Hwang, Cheol-Mog (2009b): Radiographic results of single level transforaminal lumbar interbody fusion in degenerative lumbar spine disease: focusing on changes of segmental lordosis in fusion segment. In: *Clinics in orthopedic surgery* 1 (4), S. 207–213. DOI: 10.4055/cios.2009.1.4.207.
- King, D. (1948): Internal fixation for lumbosacral fusion. In: *JBJS* 30A (3), S. 560–565.
- Klezl, Zdenek; Bagley, Carlos A.; Bookland, Markus J.; Wolinsky, Jean-Paul; Rezek, Zdenek; Gokaslan, Ziya L. (2007): Harms titanium mesh cage fracture. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 16 Suppl 3 (S3), S. 306–310. DOI: 10.1007/s00586-007-0377-z.
- Knight, Reginald Q.; Schwaegler, Paul; Hanscom, David; Roh, Jeffery (2009): Direct lateral lumbar interbody fusion for degenerative conditions: early complication profile. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 22 (1), S. 34–37. DOI: 10.1097/BSD.0b013e3181679b8a.
- Knoeller, S. M.; Seifried, C. (2000): Historical perspective: history of spinal surgery. In: *Spine* 25 (21), S. 2838–2843. DOI: 10.1097/00007632-200011010-00020.
- Kroppenstedt, S.; Halder, A. (2017): Langfassung der Leitlinie "Spezifischer Kreuzschmerz". S2k Leitlinien. Hg. v. AWMF online Registernummer: 033-051. Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC), zuletzt geprüft am Online verfügbar unter https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/033-051l_S2k_Spezifischer_Kreuzschmerz_2018-02.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2020.

- Kumar, M. N.; Baklanov, A.; Chopin, D. (2001): Correlation between sagittal plane changes and adjacent segment degeneration following lumbar spine fusion. In: *European Spine Journal* 10 (4), S. 314–319. DOI: 10.1007/s005860000239.
- Kunder, Suzanne L. de; van Kuijk, Sander M. J.; Rijkers, Kim; Caelers, Inge JMH; van Hemert, Wouter L. W.; Bie, Rob A. de; van Santbrink, Henk (2017): Transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) versus posterior lumbar interbody fusion (PLIF) in lumbar spondylolisthesis. a systematic review and meta-analysis. In: *The Spine Journal* 17 (11), S. 1712–1721.
- Kuslich, S. D.; Ulstrom, C. L.; Griffith, S. L.; Ahern, J. W.; Dowdle, J. D. (1998): The Bagby and Kuslich method of lumbar interbody fusion. History, techniques, and 2-year follow-up results of a United States prospective, multicenter trial. In: *Spine* 23 (11), 1267-78; discussion 1279. DOI: 10.1097/00007632-199806010-00019.
- Labelle, Hubert; Mac-Thiong, Jean-Marc; Roussouly, Pierre (2011): Spino-pelvic sagittal balance of spondylolisthesis: a review and classification. In: *E Spine J* 20 Suppl 5, S. 641–646. DOI: 10.1007/s00586-011-1932-1.
- Lafage, Virginie; Schwab, Frank; Patel, Ashish; Hawkinson, Nicola; Farcy, Jean-Pierre (2009): Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity. In: *Spine* 34 (17), E599-606. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181a219.
- Laouissat, Féthi; Sebaaly, Amer; Gehrchen, Martin; Roussouly, Pierre (2018): Classification of normal sagittal spine alignment: refounding the Roussouly classification. In: *E Spine J* 27 (8), S. 2002–2011. DOI: 10.1007/s00586-017-5111-x.
- Lauber, Sebastian; Schulte, Tobias Ludger; Liljenqvist, Ulf; Halm, Henry; Hackenberg, Lars (2006): Clinical and radiologic 2-4-year results of transforaminal lumbar interbody fusion in degenerative and isthmic spondylolisthesis grades 1 and 2. In: *Spine* 31 (15), S. 1693–1698. DOI: 10.1097/01.brs.0000224530.08481.4e.
- Laurent, L. E.; Einola, S. (1961): Spondylolisthesis in children and adolescents. In: *Acta Orthopaedica Scandinavica* 31 (1), S. 45–64. DOI: 10.3109/17453676108989297.
- Lazennec, J. Y.; Ramaré, S.; Arafati, N.; Laudet, C. G.; Gorin, M.; Roger, B. et al. (2000): Sagittal alignment in lumbosacral fusion: relations between radiological parameters and pain. In: *European Spine Journal* 9 (1), S. 47–55. DOI: 10.1007/s005860050008.
- Le Huec, Jean Charles; Hasegawa, Kazuhiro (2016): Normative values for the spine shape parameters using 3D standing analysis from a database of 268 asymptomatic Caucasian and Japanese subjects. In: *E Spine J* 25 (11), S. 3630–3637. DOI: 10.1007/s00586-016-4485-5.
- Le Maitre, Christine Lyn; Freemont, Anthony J.; Hoyland, Judith Alison (2005): The role of interleukin-1 in the pathogenesis of human intervertebral disc degeneration. In: *Arthritis research & therapy* 7 (4), R732-45. DOI: 10.1186/ar1732.
- Lee, Jae Chul; Jang, Hae-Dong; Shin, Byung-Joon (2012): Learning curve and clinical outcomes of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: our experience in 86 consecutive cases. In: *Spine* 37 (18), S. 1548–1557. DOI: 10.1097/BRS.0b013e318252d44b.
- Lee, Ji-Ho; Lee, Dong-Oh; Lee, Jae Hyup; Shim, Hee Jong (2015): Effects of lordotic angle of a cage on sagittal alignment and clinical outcome in one level posterior lumbar interbody fusion with pedicle screw fixation. In: *BioMed research international* 2015, S. 523728. DOI: 10.1155/2015/523728.
- Lee, Kong Hwee; Yeo, William; Soeharno, Henry; Yue, Wai Mun (2014): Learning curve of a complex surgical technique: minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS TLIF). In: *Journal of spinal disorders & techniques* 27 (7), E234-40. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000089.
- Legaye, J.; Duval-Beaupere, G. (2008): Gravitational forces and sagittal shape of the spine. Clinical estimation of their relations. In: *International orthopaedics* 32 (6), S. 809–816. DOI: 10.1007/s00264-007-0421-y.

- Legaye, J.; Duval-Beaupère, G.; Hecquet, J.; Marty, C. (1998): Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. In: *European Spine Journal* 7 (2), S. 99–103. DOI: 10.1007/s005860050038.
- Levy, Howard I.; Hanscom, Brett; Boden, Scott D. (2002): Three-question depression screener used for lumbar disc herniations and spinal stenosis. In: *Spine* 27 (11), S. 1232–1237. DOI: 10.1097/00007632-200206010-00017.
- Lida, Takahiro; Suzuki, Nobumasa; Kono, Katsuki; Ohyama, Yasumasa; Imura, Jyunya; Ato, Akihisa et al. (2015): Minimum 20 Years Long-term Clinical Outcome After Spinal Fusion and Instrumentation for Scoliosis: Comparison of the SRS-22 Patient Questionnaire With That in Nonscoliosis Group. In: *Spine* 40 (16), E922-8. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000991.
- Little, D. G.; MacDonald, D. (1994): The use of the percentage change in Oswestry Disability Index score as an outcome measure in lumbar spinal surgery. In: *Spine* 19 (19), S. 2139–2143. DOI: 10.1097/00007632-199410000-00001.
- Lowe, Thomas G.; Tahernia, A. David; O'Brien, Michael F.; Smith, David A. B. (2002): Unilateral transforaminal posterior lumbar interbody fusion (TLIF): indications, technique, and 2-year results. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 15 (1), S. 31–38. DOI: 10.1097/00024720-200202000-00005.
- Mac-Thiong, Jean-Marc; Berthonnaud, Eric; Dimar, John R.; Betz, Randal R.; Labelle, Hubert (2004): Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. In: *Spine* 29 (15), S. 1642–1647. DOI: 10.1097/01.brs.0000132312.78469.7b.
- Malham, Gregory M.; Ellis, Ngairé J.; Parker, Rhiannon M.; Blecher, Carl M.; White, Rohan; Goss, Ben; Seex, Kevin A. (2017): Maintenance of Segmental Lordosis and Disk Height in Stand-alone and Instrumented Extreme Lateral Interbody Fusion (XLIF). In: *Clinical Spine Surgery* 30 (2), E90-E98. DOI: 10.1097/BSD.0b013e3182aa4c94.
- Massie, Lara W.; Zakaria, Hesham Mostafa; Schultz, Lonni R.; Basheer, Azam; Buraimoh, Morenikeji Ayodele; Chang, Victor (2018): Assessment of radiographic and clinical outcomes of an articulating expandable interbody cage in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion for spondylolisthesis. In: *Neurosurgical focus* 44 (1), E8. DOI: 10.3171/2017.10.FOCUS17562.
- Mayer, H. M. (1997): A new microsurgical technique for minimally invasive anterior lumbar interbody fusion. In: *Spine* 22 (6), 691-9; discussion 700. DOI: 10.1097/00007632-199703150-00023.
- Mayr, Markus; Högl, Stefan; Ghedina, Wolfgang; Berek, Klaus (2003): Low back pain and psychiatric disorders. In: *Lancet (London, England)* 361 (9356), S. 531. DOI: 10.1016/S0140-6736(03)12479-8.
- McAfee, Paul C.; DeVine, John G.; Chaput, Christopher D.; Prybis, Brad G.; Fedder, Ira L.; Cunningham, Bryan W. et al. (2005): The indications for interbody fusion cages in the treatment of spondylolisthesis: analysis of 120 cases. In: *Spine* 30 (6 Suppl), S60-5. DOI: 10.1097/01.brs.0000155578.62680.dd.
- McCormack, H. M.; Horne, D. J.; Sheather, S. (1988): Clinical applications of visual analogue scales: a critical review. In: *Psychol. Med.* 18 (4), S. 1007–1019. DOI: 10.1017/s0033291700009934.
- Miller, J. A.; Schmatz, C.; Schultz, A. B. (1988): Lumbar disc degeneration: correlation with age, sex, and spine level in 600 autopsy specimens. In: *Spine* 13 (2), S. 173–178. DOI: 10.1097/00007632-198802000-00008.
- Miyakoshi, N.; Hongo, M.; Kobayashi, T.; Abe, T.; Abe, E.; Shimada, Y. (2015): Improvement of spinal alignment and quality of life after corrective surgery for spinal kyphosis in patients with osteoporosis: a comparative study with non-operated patients. In: *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA* 26 (11), S. 2657–2664. DOI: 10.1007/s00198-015-3163-5.

- Mobbs, Ralph J.; Phan, Kevin; Malham, Greg; Seex, Kevin; Rao, Prashanth J. (2015): Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. In: *Journal of spine surgery (Hong Kong)* 1 (1), S. 2–18. DOI: 10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05.
- Mohan, Avinash Lalith; Das, Kaushik (2003): History of surgery for the correction of spinal deformity. In: *Neurosurgical focus* 14 (1), e1. DOI: 10.3171/foc.2003.14.1.2.
- Mundt, D. J.; Kelsey, J. L.; Golden, A. L.; Pastides, H.; Berg, A. T.; Sklar, J. et al. (1993): An epidemiologic study of non-occupational lifting as a risk factor for herniated lumbar intervertebral disc. The Northeast Collaborative Group on Low Back Pain. In: *Spine* 18 (5), S. 595–602. DOI: 10.1097/00007632-199304000-00012.
- Nerlich, A. G.; Boos, N.; Wiest, I.; Aebi, M. (1998): Immunolocalization of major interstitial collagen types in human lumbar intervertebral discs of various ages. In: *Virchows Archiv* 432 (1), S. 67–76. DOI: 10.1007/s004280050136.
- Nerlich, A. G.; Schleicher, E. D.; Boos, N. (1997): 1997 Volvo Award winner in basic science studies. Immunohistologic markers for age-related changes of human lumbar intervertebral discs. In: *Spine* 22 (24), S. 2781–2795. DOI: 10.1097/00007632-199712150-00001.
- Niemeyer, Thomas; Bövingloh, Albert Schulze; Halm, Henry; Liljenqvist, Ulf (2004): Results after anterior-posterior lumbar spinal fusion: 2-5 years follow-up. In: *International orthopaedics* 28 (5), S. 298–302. DOI: 10.1007/s00264-004-0577-7.
- Niemeyer, Thomas K.; Koriller, Marco; Claes, Lutz; Kettler, Annette; Werner, Kathrin; Wilke, Hans J. (2006): In vitro study of biomechanical behavior of anterior and transforaminal lumbar interbody instrumentation techniques. In: *Neurosurgery* 59 (6), 1271-6; discussion 1276-7. DOI: 10.1227/01.NEU.0000245609.01732.E4.
- Niu, Chi-Chien; Liao, Jen-Chung; Chen, Wen-Jer; Chen, Lih-Huei (2010): Outcomes of interbody fusion cages used in 1 and 2-levels anterior cervical discectomy and fusion: titanium cages versus polyetheretherketone (PEEK) cages. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 23 (5), S. 310–316. DOI: 10.1097/BSD.0b013e3181af3a84.
- O'Brien, Michael F.; Kuklo, Timothy R.; Blanke, Kathy M.; Lenke, Lawrence G. (2008): sdsgradiographic-measremnt-manual, S. 96–99. Online verfügbar unter <https://www.oref.org/docs/default-source/default-document-library/sdsg-radiographic-measremnt-manual.pdf>, zuletzt geprüft am 10.04.2020.
- O'Brien, J. P.; Dawson, M. H.; Heard, C. W.; Momberger, G.; Speck, G.; Weatherly, C. R. (1986): Simultaneous combined anterior and posterior fusion. A surgical solution for failed spinal surgery with a brief review of the first 150 patients. In: *A Publication of The Association of Bone and Joint Surgeons® / CORR®* (203), S. 191–195.
- Oegema, T. R.; Johnson, S. L.; Aguiar, D. J.; Ogilvie, J. W. (2000): Fibronectin and its fragments increase with degeneration in the human intervertebral disc. In: *Spine* 25 (21), S. 2742–2747. DOI: 10.1097/00007632-200011010-00005.
- Ohshima, H.; Urban, J. P.; Bergel, D. H. (1995): Effect of static load on matrix synthesis rates in the intervertebral disc measured in vitro by a new perfusion technique. In: *J. Orthop. Res.* 13 (1), S. 22–29. DOI: 10.1002/jor.1100130106.
- Okuda, Shinya; Miyauchi, Akira; Oda, Takenori; Haku, Takamitsu; Yamamoto, Tomio; Iwasaki, Motoki (2006): Surgical complications of posterior lumbar interbody fusion with total facetectomy in 251 patients. In: *Journal of Neurosurgery: Spine* 4 (4), S. 304–309. DOI: 10.3171/spi.2006.4.4.304.
- Ory, F. G.; Rahman, F. U.; Katagade, V.; Shukla, A.; Burdorf, A. (1997): Respiratory disorders, skin complaints, and low-back trouble among tannery workers in Kanpur, India. In: *American Industrial Hygiene Association Journal* 58 (10), S. 740–746. DOI: 10.1080/15428119791012397.
- Ould-Slimane, Mourad; Lenoir, Thibaut; Dauzac, Cyril; Rillardon, Ludovic; Hoffmann, Etienne; Guigui, Pierre; Ilharreborde, Brice (2012): Influence of transforaminal lumbar interbody fusion

- procedures on spinal and pelvic parameters of sagittal balance. In: *E Spine J* 21 (6), S. 1200–1206. DOI: 10.1007/s00586-011-2124-8.
- Ozgun, Burak M.; Aryan, Henry E.; Pimenta, Luiz; Taylor, William R. (2006): Extreme Lateral Interbody Fusion (XLIF): a novel surgical technique for anterior lumbar interbody fusion. In: *The Spine Journal* 6 (4), S. 435–443. DOI: 10.1016/j.spinee.2005.08.012.
- Palmgren, T.; Grönblad, M.; Virri, J.; Kääpä, E.; Karaharju, E. (1999): An immunohistochemical study of nerve structures in the annulus fibrosus of human normal lumbar intervertebral discs. In: *Spine* 24 (20), S. 2075–2079. DOI: 10.1097/00007632-199910150-00002.
- Papanagiotou, P.; Boutchakova, M. (2014): Spinalkanalstenose. In: *Der Radiologe* 54 (11), S. 1087–1092. DOI: 10.1007/s00117-014-2729-0.
- Park, Jae-Sung; Kim, Young-Baeg; Hong, Hyun-Jong; Hwang, Sung-Nam (2005): Comparison between Posterior and Transforaminal Approaches for Lumbar Interbody Fusion. In: *Journal of Korean Neurosurgical Society* 37 (5), S. 340–344.
- Park, Paul; Foley, Kevin T. (2008): Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion with reduction of spondylolisthesis: technique and outcomes after a minimum of 2 years' follow-up. In: *Neurosurgical focus* 25 (2), E16. DOI: 10.3171/FOC/2008/25/8/E16.
- Peng, Chan Wearn Benedict; Yue, Wai Mun; Poh, Seng Yew; Yeo, William; Tan, Seang Beng (2009): Clinical and radiological outcomes of minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion. In: *Spine* 34 (13), S. 1385–1389. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181a4e3be.
- Phan, Kevin; Mobbs, Ralph J. (2015): Oblique Lumbar Interbody Fusion for Revision of Non-union Following Prior Posterior Surgery: A Case Report. In: *Orthopaedic surgery* 7 (4), S. 364–367. DOI: 10.1111/os.12204.
- Phan, Kevin; Nazareth, Alexander; Hussain, Awais K.; Dmytriw, Adam A.; Nambiar, Mithun; Nguyen, Damian et al. (2018): Relationship between sagittal balance and adjacent segment disease in surgical treatment of degenerative lumbar spine disease: meta-analysis and implications for choice of fusion technique. In: *E Spine J* 27 (8), S. 1981–1991. DOI: 10.1007/s00586-018-5629-6.
- Phan, Kevin; Thayaparan, Ganesha K.; Mobbs, Ralph J. (2015): Anterior lumbar interbody fusion versus transforaminal lumbar interbody fusion--systematic review and meta-analysis. In: *British journal of neurosurgery* 29 (5), S. 705–711. DOI: 10.3109/02688697.2015.1036838.
- Pjontek, Rastislav; Scheibe, Florian; Tabatabai, Julia; Hudalla, Hannes; Riedmaier, Patrick; Kadmon, Martina et al. (Hg.) (2016): Heidelberger Standarduntersuchung. Handlungsanweisungen zur Durchführung der körperlichen Untersuchung. Universität Heidelberg. 3. Auflage. Heidelberg: Projekt Heidelberger Klinische Standards HeiCuMed.
- Polatin, P. B.; Kinney, R. K.; Gatchel, R. J.; Lillo, E.; Mayer, T. G. (1993): Psychiatric illness and chronic low-back pain. The mind and the spine--which goes first? In: *Spine* 18 (1), S. 66–71. DOI: 10.1097/00007632-199301000-00011.
- Potter, Benjamin K.; Freedman, Brett A.; Verwiebe, Eric G.; Hall, Jordan M.; Polly, David W.; Kuklo, Timothy R. (2005): Transforaminal lumbar interbody fusion: clinical and radiographic results and complications in 100 consecutive patients. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 18 (4), S. 337–346. DOI: 10.1097/01.bsd.0000166642.69189.45.
- Provaggi, Elena; Capelli, Claudio; Leong, Julian J. H.; Kalaskar, Deepak M. (2018): A UK-based pilot study of current surgical practice and implant preferences in lumbar fusion surgery. In: *Medicine* 97 (26), e11169. DOI: 10.1097/MD.00000000000011169.
- Rajaei, Sean S.; Bae, Hyun W.; Kanim, Linda E. A.; Delamarter, Rick B. (2012): Spinal fusion in the United States: analysis of trends from 1998 to 2008. In: *Spine* 37 (1), S. 67–76. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31820cccfb.

- Rajaraman, V.; Vingan, R.; Roth, P.; Heary, R. F.; Conklin, L.; Jacobs, G. B. (1999): Visceral and vascular complications resulting from anterior lumbar interbody fusion. In: *Journal of Neurosurgery* 91 (1 Suppl), S. 60–64. DOI: 10.3171/spi.1999.91.1.0060.
- Rajnics, P.; Templier, A.; Skalli, W.; Lavaste, F.; Illes, T. (2002): The importance of spinopelvic parameters in patients with lumbar disc lesions. In: *International orthopaedics* 26 (2), S. 104–108. DOI: 10.1007/s00264-001-0317-1.
- Rao, Prashanth J.; Ghent, Finn; Phan, Kevin; Lee, Keegan; Reddy, Rajesh; Mobbs, Ralph J. (2015): Stand-alone anterior lumbar interbody fusion for treatment of degenerative spondylolisthesis. In: *Journal of clinical neuroscience : official journal of the Neurosurgical Society of Australasia* 22 (10), S. 1619–1624. DOI: 10.1016/j.jocn.2015.03.034.
- Rao, Prashanth J.; Pelletier, Matthew H.; Walsh, William R.; Mobbs, Ralph J. (2014): Spine interbody implants: material selection and modification, functionalization and bioactivation of surfaces to improve osseointegration. In: *Orthopaedic surgery* 6 (2), S. 81–89. DOI: 10.1111/os.12098.
- Raspe, Heiner (2012): Themenheft 53 "Rückenschmerzen". Unter Mitarbeit von Koch-Institut, Robert.
- Ray, C. D. (1997): Threaded titanium cages for lumbar interbody fusions. In: *Spine* 22 (6), 667-79; discussion 679-80. DOI: 10.1097/00007632-199703150-00019.
- Ren, Hangling; Geng, Wei; Ma, Jinzhu; Xu, Hui; Li, Zhong; Pang, Lianglong; Li, Kunpeng (2015): CORRELATION ANALYSIS OF CHANGES OF SPINE-PELVIC SAGITTAL PARAMETERS BEFORE AND AFTER OPERATION AND EFFECTIVENESS IN PATIENTS WITH LUMBAR SPONDYLOLISTHESIS. In: *Zhongguo xiu fu chong jian wai ke za zhi = Zhongguo xiufu chongjian waike zazhi = Chinese journal of reparative and reconstructive surgery* 29 (10), S. 1269–1274.
- Rickert, Marcus; Rauschmann, Michael; Fleege, C.; Behrbalk, E.; Harms, J. (2015): Interkorporelle Fusionsverfahren an der Wirbelsäule. Die Entwicklung aus historischer Sicht. In: *Orthopäde* 44 (2), S. 104–113. DOI: 10.1007/s00132-015-3076-1.
- Roberts, S.; Caterson, B.; Menage, J.; Evans, E. H.; Jaffray, D. C.; Eisenstein, S. M. (2000): Matrix metalloproteinases and aggrecanase: their role in disorders of the human intervertebral disc. In: *Spine* 25 (23), S. 3005–3013. DOI: 10.1097/00007632-200012010-00007.
- Roche, M. B.; Rowe, G. G. (1951): The incidence of separate neural arch and coincident bone variations; a survey of 4,200 skeletons. In: *The Anatomical record* 109 (2), S. 233–252. DOI: 10.1002/ar.1091090207.
- Roland, M.; Morris, R. (1983): A study of the natural history of back pain. Part I: development of a reliable and sensitive measure of disability in low-back pain. In: *Spine* 8 (2), S. 141–144. DOI: 10.1097/00007632-198303000-00004.
- Roussouly, Pierre; Gollogly, Sohrab; Berthonnaud, Eric; Dimnet, Johannes (2005): Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. In: *Spine* 30 (3), S. 346–353. DOI: 10.1097/01.brs.0000152379.54463.65.
- Roy-Camille, R.; Saillant, G.; Mazel, C. (1986): Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating. In: *A Publication of The Association of Bone and Joint Surgeons® | CORR®* (203), S. 7–17.
- Rymarczuk, George N.; Harrop, James S.; Hilis, Aaron; Härtl, Roger (2017): Should Expandable TLIF Cages be Used Routinely to Increase Lordosis? In: *Clinical Spine Surgery* 30 (2), S. 47–49. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000510.
- Sakeb, Najmus; Ahsan, Kamrul (2013): Comparison of the early results of transforaminal lumbar interbody fusion and posterior lumbar interbody fusion in symptomatic lumbar instability. In: *Indian journal of orthopaedics* 47 (3), S. 255–263. DOI: 10.4103/0019-5413.111484.

- Salehi, Sean A.; Tawk, Rabih; Ganju, Aruna; LaMarca, Frank; Liu, John C.; Ondra, Stephen L. (2004): Transforaminal lumbar interbody fusion: surgical technique and results in 24 patients. In: *Neurosurgery* 54 (2), 368-74; discussion 374. DOI: 10.1227/01.NEU.0000103493.25162.18.
- Sasso, Rick C.; Best, Natalie M.; Mummaneni, Praveen V.; Reilly, Thomas M.; Hussain, Sajjad M. (2005): Analysis of operative complications in a series of 471 anterior lumbar interbody fusion procedures. In: *Spine* 30 (6), S. 670–674. DOI: 10.1097/01.brs.0000155423.18218.75.
- Sasso, Rick C.; Kenneth Burkus, J.; LeHuec, Jean-Charles (2003): Retrograde ejaculation after anterior lumbar interbody fusion: transperitoneal versus retroperitoneal exposure. In: *Spine* 28 (10), S. 1023–1026. DOI: 10.1097/01.BRS.0000062965.47779.EB.
- Schimmel, Janneke J. P.; Poeschmann, Marcel S.; Horsting, Philip P.; Schönfeld, Dirk H. W.; van Limbeek, Jacques; Pavlov, Paul W. (2016): PEEK Cages in Lumbar Fusion: Mid-term Clinical Outcome and Radiologic Fusion. In: *Clinical Spine Surgery* 29 (5), E252-8. DOI: 10.1097/BSD.0b013e31826eaf74.
- Schizas, Constantin; Tzinieris, Nicolas; Tsiridis, Elefterios; Kosmopoulos, Victor (2009): Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: evaluating initial experience. In: *International orthopaedics* 33 (6), S. 1683–1688. DOI: 10.1007/s00264-008-0687-8.
- Schmidt, Carsten Oliver; Raspe, Heiner; Pfingsten, Michael; Hasenbring, Monika; Basler, Heinz Dieter; Eich, Wolfgang; Kohlmann, Thomas (2007): Back pain in the German adult population: prevalence, severity, and sociodemographic correlates in a multiregional survey. In: *Spine* 32 (18), S. 2005–2011. DOI: 10.1097/BRS.0b013e318133fad8.
- Schneider, Sven; Mohnen, Sigrid M.; Schiltenswolf, Marcus; Rau, Christoph (2007): Comorbidity of low back pain: representative outcomes of a national health study in the Federal Republic of Germany. In: *European journal of pain (London, England)* 11 (4), S. 387–397. DOI: 10.1016/j.ejpain.2006.05.005.
- Schumacher, J.; Brähler, E. (1999): Prävalenz von Schmerzen in der deutschen Bevölkerung. In: *Schmerz* 13 (6), S. 375–384. DOI: 10.1007/s004820050215.
- Schwab, Frank; Farcy, Jean-Pierre; Bridwell, Keith; Berven, Sigurd; Glassman, Steven; Harrast, John; Horton, William (2006a): A clinical impact classification of scoliosis in the adult. In: *Spine* 31 (18), S. 2109–2114. DOI: 10.1097/01.brs.0000231725.38943.ab.
- Schwab, Frank; Lafage, Virginie; Boyce, Reid; Skalli, Wafa; Farcy, Jean-Pierre (2006b): Gravity line analysis in adult volunteers: age-related correlation with spinal parameters, pelvic parameters, and foot position. In: *Spine* 31 (25), E959-67. DOI: 10.1097/01.brs.0000248126.96737.0f.
- Schwab, Frank; Patel, Ashish; Ungar, Benjamin; Farcy, Jean-Pierre; Lafage, Virginie (2010): Adult spinal deformity-postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery. In: *Spine* 35 (25), S. 2224–2231. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181ee6bd4.
- Schwarzer, A. C.; Aprill, C. N.; Bogduk, N. (1995): The sacroiliac joint in chronic low back pain. In: *Spine* 20 (1), S. 31–37. DOI: 10.1097/00007632-199501000-00007.
- Schwender, James D.; Holly, Langston T.; Rouben, David P.; Foley, Kevin T. (2005): Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF): technical feasibility and initial results. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 18 Suppl, S1-6. DOI: 10.1097/01.bsd.0000132291.50455.d0.
- Sembrano, Jonathan N.; Horzodovsky, Ryan D.; Sharma, Amit K.; Yson, Sharon C.; Santos, Edward R. G.; Polly, David W. (2017): Do Lordotic Cages Provide Better Segmental Lordosis Versus Nonlordotic Cages in Lateral Lumbar Interbody Fusion (LLIF)? In: *Clinical Spine Surgery* 30 (4), E338-E343. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000114.
- Seng, Chusheng; Siddiqui, Mashfiqul A.; Wong, Kenneth P. L.; Zhang, Karen; Yeo, William; Tan, Seang Beng; Yue, Wai-Mun (2013): Five-year outcomes of minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: a matched-pair comparison study. In: *Spine* 38 (23), S. 2049–2055. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182a8212d.

- Shimer, Adam L. (2016): CORR Insights®: The Oblique Anterolateral Approach to the Lumbar Spine Provides Access to the Lumbar Spine With Few Early Complications. In: *Clinical orthopaedics and related research* 474 (9), S. 2028–2029. DOI: 10.1007/s11999-016-4972-3.
- Shin, Myung-Hoon; Ryu, Kyeong-Sik; Hur, Jung-Woo; Kim, Jin-Sung; Park, Chun-Kun (2013): Comparative study of lumbopelvic sagittal alignment between patients with and without sacroiliac joint pain after lumbar interbody fusion. In: *Spine* 38 (21), E1334-41. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182a0da47.
- Shinmei, Masayuki; Masuda, Koichi; Kikuchi, Toshiyuki; Shimomura, Yutaka (1989): Interleukin 1, tumor necrosis factor, and interleukin 6 as mediators of cartilage destruction. In: *Seminars in Arthritis and Rheumatism* 18 (3), S. 27–32. DOI: 10.1016/0049-0172(89)90081-4.
- Shunwu, Fan; Xing, Zhao; Fengdong, Zhao; Xiangqian, Fang (2010): Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion for the treatment of degenerative lumbar diseases. In: *Spine* 35 (17), S. 1615–1620. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181c70fe3.
- Sim, Hong Bo; Murovic, Judith A.; Cho, Bo Young; Lim, T. Jesse; Park, Jon (2010): Biomechanical comparison of single-level posterior versus transforaminal lumbar interbody fusions with bilateral pedicle screw fixation: segmental stability and the effects on adjacent motion segments. In: *Journal of neurosurgery. Spine* 12 (6), S. 700–708. DOI: 10.3171/2009.12.SPINE09123.
- Sirvanci, Mustafa; Bhatia, Mona; Ganiyusufoglu, Kursat Ali; Duran, Cihan; Tezer, Mehmet; Ozturk, Cagatay et al. (2008): Degenerative lumbar spinal stenosis: correlation with Oswestry Disability Index and MR imaging. In: *Eur Spine J* 17 (5), S. 679–685. DOI: 10.1007/s00586-008-0646-5.
- Smith, Justin S.; Klineberg, Eric; Schwab, Frank; Shaffrey, Christopher I.; Moal, Bertrand; Ames, Christopher P. et al. (2013): Change in classification grade by the SRS-Schwab Adult Spinal Deformity Classification predicts impact on health-related quality of life measures: prospective analysis of operative and nonoperative treatment. In: *Spine* 38 (19), S. 1663–1671. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31829ec563.
- Statistisches Bundesamt (2019): Statistisches Jahrbuch Deutschland 2019. - letztmalige Ausgabe - Titel wird eingestellt. 1., Auflage. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Gesundheitsberichterstattung/GBEDownloadsT/rueckenschmerzen.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 02.04.2020.
- Steffen, T.; Tsantrizos, A.; Fruth, I.; Aebi, M. (2000): Gages: designs and concepts. In: *European Spine Journal* 9 Suppl 1 (S1), S89-94. DOI: 10.1007/pl00010027.
- Stokes, Ian A. F.; Iatridis, James C. (2004): Mechanical conditions that accelerate intervertebral disc degeneration: overload versus immobilization. In: *Spine* 29 (23), S. 2724–2732. DOI: 10.1097/01.brs.0000146049.52152.da.
- Talia, Adrian J.; Wong, Michael L.; Lau, Hui C.; Kaye, Andrew H. (2015): Comparison of the different surgical approaches for lumbar interbody fusion. In: *Journal of clinical neuroscience : official journal of the Neurosurgical Society of Australasia* 22 (2), S. 243–251. DOI: 10.1016/j.jocn.2014.08.008.
- Tandon, V.; Campbell, F.; Ross, E. R. (1999): Posterior lumbar interbody fusion. Association between disability and psychological disturbance in noncompensation patients. In: *Spine* 24 (17), S. 1833–1838. DOI: 10.1097/00007632-199909010-00013.
- Tang, Pan; Zhu, Ren; Ji, Wei-Ping; Wang, Ji-Ying; Chen, Shuai; Fan, Shun-Wu; Hu, Zhi-Jun (2016): The NLRP3/Caspase-1/Interleukin-1 β Axis Is Active in Human Lumbar Cartilaginous Endplate Degeneration. In: *Clinical orthopaedics and related research* 474 (8), S. 1818–1826. DOI: 10.1007/s11999-016-4866-4.
- Tarhan, T.; Froemel, D.; Rickert, M.; Rauschmann, M.; Fleege, C. (2015): Geschichte des Wirbelkörperersatzes. In: *Unfallchirurg* 118 Suppl 1 (1), S. 73–79. DOI: 10.1007/s00113-015-0084-x.

- Teng, Ian; Han, Julian; Phan, Kevin; Mobbs, Ralph (2017): A meta-analysis comparing ALIF, PLIF, TLIF and LLIF. In: *Journal of clinical neuroscience : official journal of the Neurosurgical Society of Australasia* 44, S. 11–17. DOI: 10.1016/j.jocn.2017.06.013.
- Terran, Jamie; Schwab, Frank; Shaffrey, Christopher I.; Smith, Justin S.; Devos, Pierre; Ames, Christopher P. et al. (2013): The SRS-Schwab adult spinal deformity classification: assessment and clinical correlations based on a prospective operative and nonoperative cohort. In: *Neurosurgery* 73 (4), S. 559–568. DOI: 10.1227/NEU.0000000000000012.
- Truumees, Eeric; Majid, Kamran; Brkaric, Mario (2008): Anterior Lumbar Interbody Fusion in the Treatment of Mechanical Low Back Pain. In: *Seminars in Spine Surgery* 20 (2), S. 113–125. DOI: 10.1053/j.semss.2008.02.006.
- Tsuji, T.; Matsuyama, Y.; Sato, K.; Hasegawa, Y.; Yimin, Y.; Iwata, H. (2001): Epidemiology of low back pain in the elderly: correlation with lumbar lordosis. In: *Journal of orthopaedic science : official journal of the Japanese Orthopaedic Association* 6 (4), S. 307–311. DOI: 10.1007/s007760100023.
- Twomey, L.; Taylor, J. (1985): Age changes in lumbar intervertebral discs. In: *Acta Orthopaedica Scandinavica* 56 (6), S. 496–499. DOI: 10.3109/17453678508993043.
- Urban, J. P.; McMullin, J. F. (1988): Swelling pressure of the lumbar intervertebral discs: influence of age, spinal level, composition, and degeneration. In: *Spine* 13 (2), S. 179–187. DOI: 10.1097/00007632-198802000-00009.
- Urban, Jill P. G.; Roberts, Sally (2003): Degeneration of the intervertebral disc. In: *Arthritis research & therapy* 5 (3), S. 120–130. DOI: 10.1186/ar629.
- Urban, Jill P. G.; Smith, Stanton; Fairbank, Jeremy C. T. (2004): Nutrition of the intervertebral disc. In: *Spine* 29 (23), S. 2700–2709. DOI: 10.1097/01.brs.0000146499.97948.52.
- Villavicencio, Alan T.; Burneikiene, Sigita; Roeca, Cassandra M.; Nelson, E. Lee; Mason, Alexander (2010): Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion. In: *Surgical neurology international* 1, S. 12. DOI: 10.4103/2152-7806.63905.
- Volinn, E. (1997): The epidemiology of low back pain in the rest of the world. A review of surveys in low- and middle-income countries. In: *Spine* 22 (15), S. 1747–1754. DOI: 10.1097/00007632-199708010-00013.
- Wang, Jian; Zhou, Yue; Zhang, Zheng Feng; Li, Chang Qing; Zheng, Wen Jie; Liu, Jie (2010): Comparison of one-level minimally invasive and open transforaminal lumbar interbody fusion in degenerative and isthmic spondylolisthesis grades 1 and 2. In: *E Spine J* 19 (10), S. 1780–1784. DOI: 10.1007/s00586-010-1404-z.
- Watkins, Robert G.; Hanna, Robert; Chang, David (2014): Sagittal alignment after lumbar interbody fusion: comparing anterior, lateral, and transforaminal approaches. In: *Journal of spinal disorders & techniques* 27 (5), S. 253–256. DOI: 10.1097/BSD.0b013e31828a8447.
- Weiler, C. (2013): In-situ-Analyse von Pathomechanismen der humanen Bandscheibendegeneration. In: *Der Pathologe* 34 Suppl 2, S. 251–259. DOI: 10.1007/s00292-013-1813-y.
- Weiler, Christoph; Nerlich, Andreas G.; Bachmeier, Beatrice E.; Boos, Norbert (2005): Expression and distribution of tumor necrosis factor alpha in human lumbar intervertebral discs: a study in surgical specimen and autopsy controls. In: *Spine* 30 (1), 44-53; discussion 54. DOI: 10.1097/01.brs.0000149186.63457.20.
- Weiner, B. K.; Fraser, R. D. (1998): Spine update lumbar interbody cages. In: *Spine* 23 (5), S. 634–640. DOI: 10.1097/00007632-199803010-00020.
- Wenig, Christina M.; Schmidt, Carsten O.; Kohlmann, Thomas; Schweikert, Bernd (2009): Costs of back pain in Germany. In: *European Journal of Pain* 13 (3), S. 280–286. DOI: 10.1016/j.ejpain.2008.04.005.
- Wiesinger, G. F.; Nuhr, M.; Quittan, M.; Ebenbichler, G.; Wöfl, G.; Fialka-Moser, V. (1999): Cross-cultural adaptation of the Roland-Morris questionnaire for German-speaking patients with low back pain. In: *Spine* 24 (11), S. 1099–1103. DOI: 10.1097/00007632-199906010-00009.

Wiltse, L. L.; Newman, P. H.; Macnab, I. (1976): Classification of spondylolysis and spondylolisthesis. In: *A Publication of The Association of Bone and Joint Surgeons® | CORR®* (117), S. 23–29.

Wittenberg, R. H.; Willburger, R. E.; Krämer, J. (1998): Spondylolyse und Spondylolisthese. Diagnose und Therapie. In: *Der Orthopäde* 27 (1), S. 51–63. DOI: 10.1007/s001320050202.

Yan, Deng-lu; Pei, Fu-xing; Li, Jian; Soo, Cheng-long (2008): Comparative study of PILF and TLIF treatment in adult degenerative spondylolisthesis. In: *E Spine J* 17 (10), S. 1311–1316. DOI: 10.1007/s00586-008-0739-1.

Yson, Sharon C.; Santos, Edward Rainier G.; Sembrano, Jonathan N.; Polly, David W. (2012): Segmental lumbar sagittal correction after bilateral transforaminal lumbar interbody fusion. In: *Journal of neurosurgery. Spine* 17 (1), S. 37–42. DOI: 10.3171/2012.4.SPINE111013.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der orthopädischen Abteilung des Universitätsklinikums Tübingen unter Betreuung von Prof. Dr. med. Nikolaus Wülker und Dr. med. Christian Walter durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. med. Nikolaus Wülker, Ärztlicher Direktor der Universitätsklinik für Orthopädie und Dr. med. Christian Walter, Stellvertretender Ärztlicher Direktor der Universitätsklinik für Orthopädie.

Die retrospektive Erhebung der radiologischen Daten sowie die prospektive Fragebogenevaluation und klinische Untersuchung wurde nach Anleitung von Dr. med. Christian Walter von mir eigenständig durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte nach Beratung durch Frau Lina Maria Serna Higueta, Ärztin und wissenschaftlichen Mitarbeitern des Institut für Biometrie, durch mich.

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 16. November 2019

Tobias Baumgärtner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei den Menschen bedanken, die mich während der gesamten Zeit dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Christian Walter, Stellvertretender Ärztlicher Direktor der Orthopädischen Universitätsklinik Tübingen, für geduldige und kompetente Betreuung während der Anfertigung dieser Dissertation.

Ferner bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Nikolaus Wülker, Direktor der Orthopädischen Universitätsklinik Tübingen, der mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit unter seiner Leitung durchzuführen.

Meinen Eltern und meiner Freundin möchte ich ganz besonders herzlich danken für die aufmerksame und vielseitige Unterstützung während dem Verfassen dieser Dissertation.

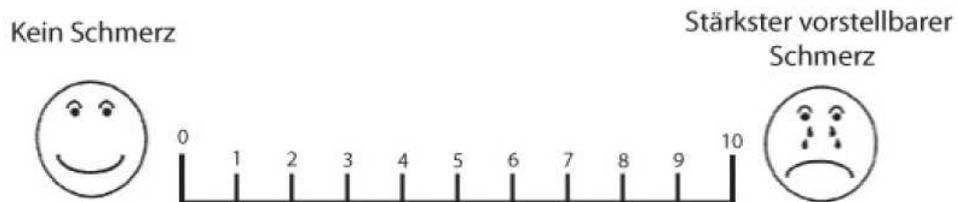
Darüber hinaus gilt mein Dank allen Verwandten, Freunden und Studienkollegen, die mich über den gesamten Zeitraum dieser Promotion unterstützt haben.

Anhang

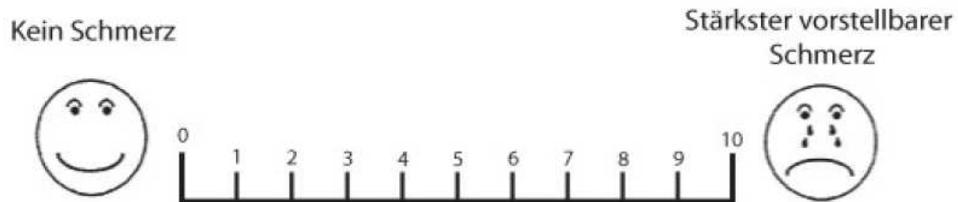
Visuelle Analogskala (VAS)

Bei den nächsten drei Fragen erkundigen wir uns nach Ihren Schmerzen über den **Zeitraum der letzten Woche**. Kennzeichnen Sie bitte den zutreffenden Wert mit einem Kreuz. 0 bedeutet kein Schmerz, 10 bedeutet den schlimmsten für Sie vorstellbaren Schmerz.

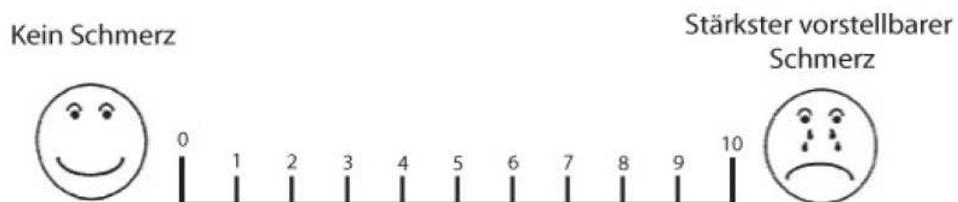
Wie stark sind Ihre Schmerzen bei körperlicher Belastung?



Wie stark sind Ihre Schmerzen in Ruhe?



Wie stark sind Ihre Schmerzen, wenn Sie nachts im Bett liegen?



Oswestry-Disability-Index (ODI)

Bitte füllen Sie diesen Fragebogen aus. Er soll uns darüber informieren, wie Ihre Rücken- (oder Bein-)probleme Ihre Fähigkeit beeinflussen, den Alltag zu bewältigen. Wir bitten Sie, jeden Abschnitt zu beantworten. **Kreuzen Sie in jedem Abschnitt nur die Aussage an, die Sie heute am besten beschreibt.**

Abschnitt 1: Schmerzstärke

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Ich habe momentan keine Schmerzen. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan sehr schwach. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan mäßig. | 2 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan ziemlich stark. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan sehr stark. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan so schlimm wie nur vorstellbar. | 5 |

Abschnitt 2: Körperpflege (Waschen, Anziehen etc.)

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, aber es ist schmerzhaft. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Meine Körperpflege durchzuführen ist schmerzhaft, und ich bin langsam und vorsichtig. | 2 |
| <input type="checkbox"/> Ich brauche bei der Körperpflege etwas Hilfe, bewältige das meiste aber selbst. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Ich brauche täglich Hilfe bei den meisten Aspekten der Körperpflege. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann mich nicht selbst anziehen, wasche mich mit Mühe und bleibe im Bett. | 5 |

Abschnitt 3: Heben

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Ich kann schwere Gegenstände heben, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann schwere Gegenstände heben, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran schwere Gegenstände vom Boden zu heben aber es geht, wenn sie geeignet stehen (z.B. auf einem Tisch). | 2 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran schwere Gegenstände zu heben, aber ich kann leichte bis mittelschwere Gegenstände heben, wenn sie geeignet stehen. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann nur sehr leichte Gegenstände heben. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann überhaupt nichts heben oder tragen. | 5 |

Abschnitt 4: Gehen

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich nicht daran so weit zu gehen, wie ich möchte. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran, mehr als 1–2 km zu gehen. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran, mehr als 0,5 km zu gehen. | 2 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran, mehr als 100 m zu gehen. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann nur mit einem Stock oder Krücken gehen. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Ich bin die meiste Zeit im Bett und muss mich zur Toilette schleppen. | 5 |

Abschnitt 5: Sitzen

- Ich kann auf jedem Stuhl so lange sitzen, wie ich möchte. 0
- Ich kann auf meinem Lieblingsstuhl so lange sitzen, wie ich möchte. 1
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 1 Stunde zu sitzen. 2
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine halbe Stunde zu sitzen. 3
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 10 Minuten zu sitzen. 4
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu sitzen. 5

Abschnitt 6: Stehen

- Ich kann so lange stehen wie ich möchte, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden. 0
- Ich kann so lange stehen wie ich möchte, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 1 Stunde zu stehen. 2
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine halbe Stunde zu stehen. 3
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 10 Minuten zu stehen. 4
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu stehen. 5

Abschnitt 7: Schlafen

- Mein Schlaf ist nie durch Schmerzen gestört. 0
- Mein Schlaf ist gelegentlich durch Schmerzen gestört. 1
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als 6 Stunden. 2
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als 4 Stunden. 3
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als 2 Stunden. 4
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu schlafen. 5

Abschnitt 8: Sexualeben (falls zutreffend)

- Mein Sexualeben ist normal und die Schmerzen werden dadurch nicht stärker. 0
- Mein Sexualeben ist normal, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Mein Sexualeben ist nahezu normal, aber sehr schmerzhaft. 2
- Mein Sexualeben ist durch Schmerzen stark eingeschränkt. 3
- Ich habe aufgrund von Schmerzen fast kein Sexualeben. 4
- Schmerzen verhindern jegliches Sexualeben. 5

Abschnitt 9: Sozialleben

- Mein Sozialleben ist normal und die Schmerzen werden dadurch nicht stärker. 0
- Mein Sozialleben ist normal, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Schmerzen haben keinen wesentlichen Einfluss auf mein Sozialleben, außer dass sie meine eher aktiven Interessen, z.B. Sport, einschränken. 2
- Schmerzen schränken mein Sozialleben ein und ich gehe nicht mehr so oft aus. 3
- Schmerzen schränken mein Sozialleben auf mein Zuhause ein. 4
- Ich habe aufgrund von Schmerzen kein Sozialleben. 5

Abschnitt 10: Reisen

- Ich kann überallhin reisen und die Schmerzen werden dadurch nicht stärker. 0
- Ich kann überallhin reisen, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Trotz starker Schmerzen kann ich länger als 2 Stunden unterwegs sein. 2
- Ich kann aufgrund von Schmerzen höchstens 1 Stunde unterwegs sein. 3
- Ich kann aufgrund von Schmerzen nur kurze, notwendige Fahrten unter 30 Minuten machen. 4
- Schmerzen hindern mich daran Fahrten zu machen, außer zur medizinischen Behandlung. 5

Roland Morris Skala (RMS)

Nr.	Beschreibung der Tätigkeit	X
1.	Wegen meiner Rückenschmerzen bleibe ich den größten Teil des Tages zu Hause.	
2.	Ich wechsele häufig meine Körperhaltung, um meinen Rücken zu entlasten	
3.	Ich gehe wegen meiner Rückenschmerzen langsamer als sonst	
4.	Wegen meiner Rückenschmerzen erledige ich keine der Arbeiten, die ich sonst im Haushalt erledige	
5.	Wegen meiner Rückenschmerzen halte ich mich beim Treppensteigen am Geländer fest	
6.	Wegen meiner Rückenschmerzen lege ich mich häufiger als sonst zum Ausruhen hin	
7.	Wegen meiner Rückenschmerzen muss ich mich an etwas abstützen, um aus einem Polstersessel hochzukommen	
8.	Wegen meiner Rückenschmerzen bitte ich andere Menschen, etwas für mich zu erledigen	
9.	Wegen meiner Rückenschmerzen brauche ich zum Ankleiden länger als sonst	
10.	Wegen meiner Rückenschmerzen achte ich darauf, nur kurze Zeit zu stehen	
11.	Wegen meiner Rückenschmerzen achte ich darauf, mich so wenig wie möglich zu bücken oder niederzuknien	
12.	Wegen meiner Rückenschmerzen fällt es mir schwer, von einem Stuhl aufzustehen	
13.	Ich leide den größten Teil des Tages/der Nacht unter Rückenschmerzen	
14.	Meine Rückenschmerzen erschweren mir das Umdrehen im Bett.	
15.	Wegen meiner Rückenschmerzen ist mein Appetit nicht besonders gut.	
16.	Wegen meiner Rückenschmerzen habe ich Probleme beim Anziehen von Socken (oder Strümpfen/Strumpfhosen).	
17.	Wegen meiner Rückenschmerzen gehe ich nur kurze Strecken	
18.	Wegen meiner Rückenschmerzen schlafe ich weniger als sonst	
19.	Wegen meiner Rückenschmerzen brauche ich beim Ankleiden Hilfe	
20.	Wegen meiner Rückenschmerzen verbringe ich den größten Teil des Tages sitzend	
21.	Wegen meiner Rückenschmerzen versuche ich, schwere Arbeiten im Haushalt zu vermeiden	
22.	Wegen meiner Rückenschmerzen bin ich reizbarer und übellauniger als sonst	
23.	Wegen meiner Rückenschmerzen gehe ich Treppen langsamer hinauf als sonst	
24.	Wegen meiner Rückenschmerzen verbringe ich den größten Teil des Tages im Bett	