

Aus der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Non invasive, quantitative Erfassung der dynamischen Rückenform
und Beweglichkeit mit dem Epionics SPINE© bei Patienten mit mono- und bisegmentalen
degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen:
Prä- und postoperative Verlaufsuntersuchungen nach
lumbaler Fusions-Operation**

**Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)**

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von
Sören Zeitler
aus Reinbek

Datum der Promotion: 02.03.2018

Inhaltsverzeichnis

Abstract	S.4
1. Einleitung	S.6
1.1 Fragestellung der Arbeit	S.9
2. Grundlagen	S.10
2.1 Anatomischer Aufbau und Funktion der Wirbelsäule	S.10
2.2 Epidemiologie degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen.....	S.16
2.3 Klinisches Erscheinungsbild und Neurologie.....	S.18
2.4 Körperliche Untersuchung	S.22
2.5 Bildgebende Diagnostik	S.25
2.6 Therapien von degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule	S.29
2.6.1 Konservative Therapie	S.29
2.6.2 Operative Therapie	S.31
3. Material und Methoden	S.38
3.1 Studienaufbau, Einschluss- und Ausschlusskriterien der Studie	S.38
3.2 Body-Maß-Index.....	S.39
3.3 Fragebögen zum klinischen Outcome	S.40
3.3.1 Evaluation der Schmerzsituation mittels Visueller Analog Skala (VAS).....	S.40
3.3.2 Oswestry-Disability-Index (ODI)	S.40
3.3.3 Evaluation des Gesundheitszustandes: Short Form Health Survey (SF-36)	S.41
3.3.4 Roland-Morris Disability Questionnaire	S.42
3.4 Radiologische Scores	S.43
3.4.1 Fujiwara Klassifikation	S.43
3.4.2 Pathria Klassifikation	S.43
3.4.3 Modic Klassifikation	S.44
3.4.4 Meyerding Klassifikation	S.45
3.4.5 Sakral Tilt	S.46
3.4.6 Sakrale Inklination	S.47
3.4.7 Lumbar Tilt	S.48

3.4.8 Lumbaler Lordosewinkel	S.48
3.5 Muskelumfang und Muskelverfettung	S.49
3.6 Beweglichkeitsmessungen mittels Epionics SPINE	S.50
3.6.1 Durchführung der Messungen	S.55
3.6.2 Live-Software	S.57
3.6.3 Analyse-Software	S.57
3.7 Postoperative Datenerfassung	S.58
3.8 Statistische Auswertung	S.58
4. Ergebnisse	S.59
4.1 Studienpopulation	S.59
4.2 Auswertung der Schmerzsituation	S.61
4.3 Auswertung der radiologischen Scores	S.65
4.4 Auswertung der Beweglichkeitsmessungen	S.68
5. Diskussion	S.70
6. Literaturverzeichnis	S.84
7. Anhang	S.94
7.1 Abkürzungsverzeichnis	S.94
7.2. Fragebögen	S.96
8. Eidesstattliche Erklärung	S.105
9. Lebenslauf	S.106
10. Danksagung	S. 109

Abstract

Fragestellung Es existieren kaum non-invasive, strahlungsfreie Methoden zur Messung der kontinuierlichen dynamischen Beweglichkeit der Wirbelsäule. Die biomechanischen Vorgänge der Wirbelsäulenbeweglichkeit sind noch nicht vollends verstanden. Gegenstand der Studie war es, einen Vergleich der klinischen Resultate und Veränderungen des Bewegungsumfanges nach dorsaler lumbaler Stabilisierung mit einem non-invasiven Verfahren darzustellen. Anschließend wurden diese Ergebnisse mit radiologischen Parametern verglichen.

Methoden 37 Patienten (Alter: 65,1 \pm 11,3 Jahren; w : m 20:17; BMI: 28,8 \pm 4,7) mit höhergradigen degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen wurden eingeschlossen, die mit einer mono- (27) oder bisegmentalen (10) dorsalen Stabilisierung der Wirbelsäulensegmente L5/S1:8, L4/5:26, L3/4:9, L2/3:3 und L1/2:1 behandelt wurden. Präoperativ wurden radiologische Scores für lumbale Lordose, Lumbar Tilt, Sakral Tilt und sakrale Inklination erhoben. Der Muskelquerschnitt der Rückenmuskulatur wurde anhand präoperativer MRT-Bilder gemessen. Die degenerative Verfettung wurde mittels Dichtemessung mit einer Computersoftware bestimmt und nach einem quantitativen Score bewertet (1-4). Visuelle Analog Scala (VAS), SF-36, Oswestry-Disability-Index (ODI) und Roland-Morris Disability Questionnaire (RMQ) wurden präoperativ, 4 und 8 Wochen postoperativ erhoben.

Der lumbale Bewegungsumfang (5 Wiederholungen von Flexions- und Extensionsbewegungen) wurde präoperativ, sowie 4 und 8 Wochen postoperativ nach der TLIF-Operation gemessen. Dies erfolgte mit in 7 Segmenten aufgeteilte Messstreifen (Anfang bei Segment L5/S1), die mit Tape auf dem Rücken der Patienten befestigt wurden. Validität und Reliabilität des Messsystems wurde mit dem Vicon-System abgeglichen und bestätigt.

Ergebnisse Die angegebene Schmerzintensität war mit 3,6 Punkten (4 Wochen postoperativ) und 3,16 Punkten (8 Wochen postoperativ) signifikant (p -Wert < 0.05) zum präoperativen Wert (6,01) reduziert. ODI und SF-36 (PCS-Wert) verbesserten sich um $-\Delta$ 6,65/4,01 Punkte nach 4 und $-\Delta$ 17,36/5,32 Punkten nach 8 Wochen deutlich zu den Werten vor der Operation. Die Winkel des sakralen Tilt, der lumbalen Lordose und lumbar Tilt erhöhten sich um $0,21^\circ$ bzw. $0,57^\circ$ bzw. $0,56^\circ$, die sakrale Inklination verminderte sich um $3,19^\circ$. Das MRT zeigte einen durchschnittlichen Muskelquerschnitt von 24.7 cm^2 ($\pm 10,4 \text{ cm}^2$) mit 1,5-fach höheren Dichtewerten (Referenz: Iliopsoas, Muskelfläche 10.8 cm^2 $\pm 5 \text{ cm}^2$). Die mittlere degenerative Verfettung lag bei 1,62 ($\pm 0,65$). Die LWS-Gesamtbeweglichkeit ergab prä- zu 4 und 8 Wochen postoperativ keine signifikanten Änderungen. Korrelationen zwischen prä- und postoperativen klinischen Parametern, radiologischen Scores, degenerativer Muskelverfettung und der ROM konnten nicht nachgewiesen werden.

Schlussfolgerung Die klinischen Ergebnis-Scores nach der Operation waren signifikant verbessert. Der Bewegungsumfang der LWS hat sich nach der Operation nicht verändert. Die Bewegungsmessungen mit einem non-invasiven Gerät (Epiotics SPINE) zeigten zuverlässige und quantitative Werte, eine einfache klinische, non-invasive Anwendbarkeit und eine gute Beurteilung der zeitlichen Veränderung der lumbalen Beweglichkeit.

Inroduction: Load distribution following lumbar spinal fusion surgery continues is controversially discussed. Clinical and biomechanical studies evidenced higher mobility and load elevation in adjacent levels. Non-invasive radiation free methods to evaluate in-vivo spinal motion rarely exist. Objective of this study was the comparative analysis of the clinical outcome with changes of the range of motion (ROM) following lumbar spinal fusion surgery using a non-invasive measurement device.

Methods: 37 patients (age: 65.1 +- 11.3, ♀:♂ 20:17, BMI: 28.8 +- 4.7) with higher grade lumbar osteochondrosis that where treated with mono- (27) or bisegmental (10) interbody fusions (TLIF) of the levels L5/S1:8, L4/5:26, L3/4:9, L2/3:3 and L1/2:1 were included. In preoperative x-rays and MRI the lumbar spinal lordosis, spinal tilt, sacral inclination and sacral tilt were measured. Paraspinal fatty degeneration was densitometrically quantified by computerized image analysis using a qualitative score (grade 1-4). Visual analogue scale (VAS), SF-36, Oswestry-Disability-Index (ODI) and Roland-Morris Disability Questionnaire (RMQ) were evaluated pre-, 4 and 8 weeks postoperatively. The lumbar spinal range of motion (5 repetitions of flexion and extension) was recorded pre-, 4 and 8 weeks after surgery using one superficial fixed measuring strap including 7 sensors (starting on segment L5/S1). Validity and reliability of the introduced device was previously proven by a comparison with the motion capturing system Vicon.

Results: Pain as indicated by the VAS was significantly reduced from 6.01 before the operation to 3.6 points (4 weeks) and 3.16 points (8 weeks). ODI and SF-36 improved to $-\Delta$ 6.65/4.01 points after 4 and $-\Delta$ 17.36/5.32 points after 8 weeks, respectively. Sacral tilt, lumbar lordosis and tilt increased by 0.21°, 0.57 ° and 0.56°, sacral inclination decreased by 3.19°. MRI showed mean paraspinal muscle cross sectional area of 24.7 +-10.4 cm² with 1.5-fold higher density values (reference: iliopsoas muscle area 10.8 +-5 cm²). Mean fatty degeneration was grade 1.62 (+-0.65). Overall ROM of the lumbar spine did not change significantly at 4 and 8 weeks following surgery. No significant correlation was found between ROM, pre-/postoperative VAS, ODI, SF-36, fatty muscle degeneration and x-ray scores.

Discussion + Conclusion: Following fusion clinical outcome scores were significantly improved according to previously published literature results. Overall ROM did not change

following surgery. Measurement of the ROM with the non-invasive device (Epionics SPINE) showed reliable and quantitative ROM values and simple clinical application, allowing serial non-invasive investigations and assessing temporal profile of changes in postoperative lumbar spinal motion.

1. Einleitung

In unserer Gesellschaft stellen Erkrankungen der Wirbelsäule in allen Altersklassen ein häufiges Krankheitsbild dar [1]. 70% der Bevölkerung leiden während ihres Lebens an chronischen oder episodischen Rückenschmerzen [2,3]. In Deutschland werden chronische Rückenschmerzen von jeder 5. Frau und jedem 7. Mann angegeben [1].

Patienten mit Rückenschmerzen verursachen hohe Kosten für das Gesundheitssystem. Im deutschen Gesundheitswesen fielen 2008 bei Frauen ca. 5 Mrd. Euro und bei Männern ca. 4 Mrd. Euro an direkten Krankheitskosten für Wirbelsäulenerkrankungen an. Diese fassen eine breite Gruppe von Rückenerkrankungen zusammen, die die Knochen, Gelenke, Bindegewebe, Muskeln und Nerven des Rückens betreffen können und sich klinisch beim Patienten größtenteils mit Rückenschmerzen manifestieren [4]. Zu den indirekten Kosten zählen Verdienstaussfälle durch Arbeitsunfähigkeit und Berentungen. Man geht davon aus, dass diese noch weitaus höher liegen als die direkten Kosten. Arbeitsunfähigkeit aufgrund von Rückenschmerzen machen 2010 in Deutschland bei den AOK-Pflichtmitgliedern (ohne Rentner) den höchsten Anteil aus. Pro Fall ergaben sich daraus 11,7 Arbeitsunfähigkeitstage [5].

2012 wurden knapp 13000 Rentenzugänge aufgrund verminderter Erwerbsfähigkeit wegen Rückenschmerzen oder Erkrankungen der Wirbelsäule verzeichnet [5].

Rückenschmerzen werden grob in spezifische und unspezifische Wirbelsäulenerkrankungen eingeteilt. Spezifische Rückenschmerzen, also Schmerzen, für die körperliche Ursachen nachgewiesen werden können, machen lediglich ca. 20% aus; unspezifische Rückenschmerzen, ohne nachweisbare organische Ursache, mindestens 80% [5]. Dies zeigt, dass weiterhin ein großer Bedarf darin besteht, die diagnostischen Möglichkeiten und das Verständnis für die Biomechanik der Rücken- und Wirbelsäulenbeweglichkeit zu verbessern sowie die Entstehungsmechanismen von Rückenerkrankungen zu untersuchen.

Degenerative Veränderungen können sich an jedem Bestandteil eines Bewegungssegmentes der Wirbelsäule manifestieren. Daher können sowohl die Bandscheiben, die Wirbelkörper und die Facettengelenke als auch die Bänder und Muskeln betroffen sein. Zu den degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen zählen u. a. die Krankheitsbilder Osteochondrose, Spondylolisthese und Spondylarthrose. Aus diesen Pathologien kann sich dann auch eine Spinalkanalstenose

entwickeln. Bandscheibenvorfälle entstehen meistens durch degenerative Veränderungen und werden daher häufig zu den degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen gezählt.

Die Funktion der Wirbelsäule kann durch degenerative Erkrankungen beeinträchtigt werden. Die Einschränkung des Bewegungsumfanges und damit verbundene Behinderungen gewohnter Lebensweisen können daraus resultieren. Die Möglichkeit, die Aktivitäten des täglichen Lebens selbständig und ohne fremde Hilfe durchzuführen, ist ein entscheidender und wichtiger Aspekt in Bezug auf Unabhängigkeit und Mobilität. Autonomie und Beweglichkeit stehen somit für ein hohes Maß an Lebensqualität und persönlicher Zufriedenheit mit der Lebenssituation eines Menschen [6].

Die gut aufeinander abgestimmten Kyphose- und Lordosekrümmungen der Wirbelsäule ermöglichen den aufrechten Stand des Menschen und minimieren die dafür nötige Muskelarbeit. Der Verlust einer adäquaten lumbalen Lordose kann eine Instabilität in diesen Segmenten hervorrufen und ist der Anfang von sagittaler Instabilität. Die optimale sagittale Ausrichtung nach dorsalen Stabilisierungs-Operationen spielt daher eine große Rolle um Fehlhaltungen und Schmerzen zu vermeiden [7,8].

Die Erfassung und Quantifizierung der Wirbelsäulenbeweglichkeit ist jedoch schwierig.

Die bisher angewendeten Messverfahren sind in ihrer Analysefähigkeit oder aufgrund anderer Eigenschaften nur limitiert einsetzbar. Es gibt keine etablierte Methode um die dynamische Beweglichkeit der Wirbelsäule kontinuierlich mit non-invasiven Techniken praktikabel im klinischen Alltag zu objektivieren.

Die im klinischen Alltag genutzten Hilfsmittel zur Diagnosestellung stützen sich bisher auf die klinische Untersuchung und Funktionsaufnahmen in Reklinations- und Inklinationsstellung im seitlichen Röntgenbild. Bei diesem Untersuchungsverfahren entsteht eine Strahlenexposition für den Patienten und es ist lediglich das statische Bewegungsausmaß ermittelbar. Bei der klinischen Untersuchung werden zur Bewegungsmessung die sog. skin-marker-tests nach Schober und Ott angewandt. Auch hier findet nur eine statische Bewegungsanalyse statt, die zudem ungenaue Ergebnisse für die Interpretation der Befunde liefert.

Die dynamische Beweglichkeitsmessung mit dem Vicon System (Vicon Motion Systems, LA, USA) ist sehr teuer sowie klinisch unpraktikabel und daher nicht routinemäßig durchführbar.

In der folgenden Studie wurde erstmals mit einem neuartigen System, dem Epionics SPINE, die Beweglichkeit der Patienten gemessen. Dieses System ermöglicht eine nicht-invasive, dynamische Erfassung der Wirbelsäulenbeweglichkeit und liefert valide Ergebnisse [9]. Durch die unkomplizierte Handhabung kann es auch im klinischen Alltag zur Beweglichkeitsmessung herangezogen werden.

Die Therapieoptionen für Rückenschmerzen sind sehr vielfältig und hängen selbstverständlich von der Ursache und der individuellen Situation des Patienten ab.

Verallgemeinernd kann man jedoch sagen, dass Rückenschmerzpatienten primär mit konservativen Methoden behandelt werden. Dazu gehören im Konzept der multimodalen Therapie unter anderem die medikamentöse Schmerzbehandlung, ein physiotherapeutisches Behandlungsschema, Ergotherapie und psychotherapeutische Behandlungsmaßnahmen (u.a. Einzel-Gruppentherapien, Stressbewältigung). Neben Massagen und Krankengymnastik kommen auch verschiedene Therapien aus dem Bereich der Manual- und Elektrotherapie zur Anwendung [10]. Kann mit diesen Maßnahmen keine Beschwerdelinderung der Patienten erzielt werden, gibt es eine Vielzahl operativer Therapiemöglichkeiten, wie es auch bei dem Patientenkollektiv unserer Studie der Fall war.

Für viele Patienten mit fortgeschrittenen degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen ist die Fusionsoperation die Therapie der Wahl [11]. Eine Möglichkeit ist die Operation durch eine transforaminale lumbale interkorporelle Fusion (TLIF). Alle in diese Studie eingeschlossenen Patienten wurden nach dieser Methode operiert. Mit dem Epionics SPINE wurden Verlaufsuntersuchungen der Wirbelsäulenbeweglichkeit zu verschiedenen Zeitpunkten vor und nach der TLIF – Operation durchgeführt.

Außerdem wurden die klinisch messbaren Therapieergebnisse (u. a. radiologische Scores der bildgebenden Verfahren) mit der subjektiven Patientenzufriedenheit (Fragebögen, Schmerzevaluation) korreliert.

Der Altersdurchschnitt in der Gesellschaft steigt zunehmend an und die Menschen werden immer älter [12]. Auch der Anteil an Übergewichtigen nimmt stetig zu [13]. Diese Aspekte stellen Risikofaktoren für die Entstehung von degenerativen Erkrankungen des Rückens oder häufige Komorbiditäten dar [1,14]. Auch in Zukunft wird ein Großteil der Bevölkerung daher unter den Folgen von Rückenschmerzen leiden und die Kosten des Gesundheitssystems werden weiter ansteigen. Es ist wichtig die Ursachen von Rückenschmerzen zu erforschen und genauere Information über die Abläufe der Rückenbeweglichkeit zu erlangen, um die Pathomechanismen der degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen besser zu verstehen. Nur dadurch ist es möglich, geeignete Präventionsmaßnahmen und Therapien zu entwickeln.

1.1 Fragestellung der Arbeit

Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen besitzen aufgrund der hohen sozioökonomischen Bedeutung einen hohen Stellenwert und dies steht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit.

In dem Modell von Kirkaldy-Willis et al. sind die Pathomechanismen zur Entstehung von degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule bereits beschrieben. Der Einfluss der Rückenmuskulatur wurde jedoch damals noch nicht berücksichtigt. Unter dem Aspekt, dass auch heutzutage noch nicht alle Entstehungsmechanismen von Rückenschmerzen bekannt sind und 80% aller Wirbelsäulenerkrankungen unbekannter Ursache sind, besteht der wissenschaftliche Fokus auf diesem Gebiet u.a. in der Erforschung des muskulären Beitrages zur Entstehung von degenerativen Wirbelsäulenpathologien. Neben dem Aspekt der Wirbelsäulenbeweglichkeit spielt die Rückenmuskulatur auch eine entscheidende Rolle in der Stabilisierung der Wirbelsäule. Es gibt zahlreiche Versuche, die Bewegungsabläufe der Wirbelsäule möglichst gut, einfach und reproduzierbar zu dokumentieren, um neue Erkenntnisse auf diesem Gebiet zu erlangen. Zudem hat die Beobachtung der adjacent segment degeneration (ASD) nach Fusionsoperationen Fragen zu deren Entstehung und nach den biomechanischen Zusammenhängen aufkommen lassen. Auch wir haben diese Aspekte in unserer Studie mitaufgenommen und untersucht.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Beweglichkeit der Wirbelsäule prä- und postoperativ zu messen. Die Ergebnisse sollen dann mit klinischen und radiologischen Parametern korreliert werden.

Mit dem Epionics SPINE wurde erstmals eine non-invasive, strahlungsfreie Technik zur Dokumentation der dynamischen Wirbelsäulenbeweglichkeit prä- und postoperativ angewandt.

Folgende Thesen wurden formuliert:

- Führt eine Fusionsoperation in der vorliegenden Population zu einer mit der Literatur vergleichbaren Verbesserung der klinischen Parameter?
- Zeigen Patienten nach einer dorsalen Stabilisierungs-Operation eine Einschränkung der Range of Motion (ROM) der Lendenwirbelsäule und resultiert kompensatorisch eine erhöhte Beweglichkeit der kranial und kaudal benachbarten Segmente wie in der Theorie zur ASD vermutet?
- Können bei Patienten mit chronischen Rückenschmerzen Zeichen einer muskulären Degeneration radiologisch nachgewiesen werden und korreliert deren Ausmaß mit der Beweglichkeit und den klinischen Parametern der Patienten?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen Änderungen der radiologischen Scores und der Beweglichkeit der Population?

2. Grundlagen

2.1 Anatomischer Aufbau und Funktion der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule (WS) ist in 5 Abschnitte eingeteilt, welche sich durch die Anzahl und Eigenschaften der einzelnen Wirbelkörper unterscheiden. In sagittaler Ebene verläuft die WS doppel-S-förmig, d.h. es ergeben sich jeweils 2 Lordose- und Kyphose-Krümmungen [14].

Die Halswirbelsäule (HWS) setzt sich aus 7 Wirbelkörpern (WK) zusammen und weist genauso wie die Lendenwirbelsäule (LWS), sie besteht in der Regel aus 5 WK, eine Lordose auf. Die Brustwirbelsäule (BWS) und das Sakrum weisen eine kyphotische Krümmung auf. Die BWS besteht aus 12 WK, die 5 Sakralwirbel des Os sacrum sind miteinander verschmolzen. Das bogenlose Os coccygis ist nur noch rudimentär angelegt und variiert in seiner Wirbelanzahl zwischen 3-5.

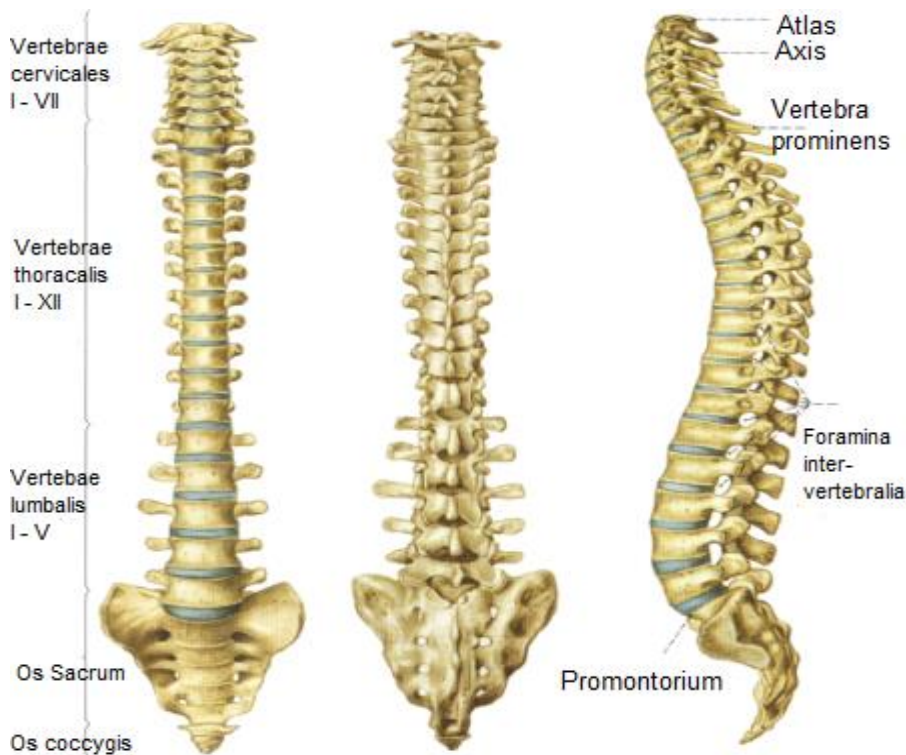


Abb.1: Sagittale Darstellung der Wirbelsäule von ventral, dorsal und lateral (übernommen aus [15] Abb.708-710, S.2)

Die einzelnen Wirbel bestehen prinzipiell aus den Anteilen Corpus vertebrae, Arcus vertebrae und 7 Processus arcus vertebrae, die als Gelenke sowie Ansatzpunkte für Muskeln und Bänder dienen.

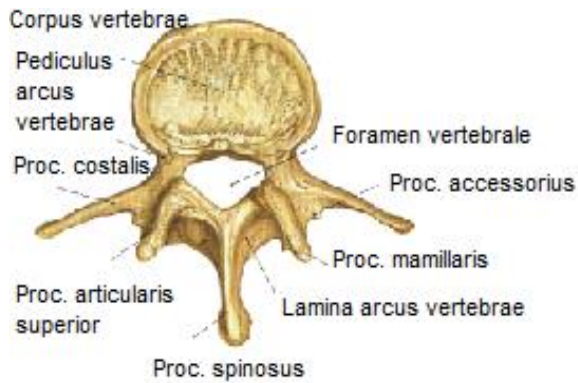


Abb.2: Wirbelkörper von kranial
(übernommen aus [15], Abb.734, S.9)

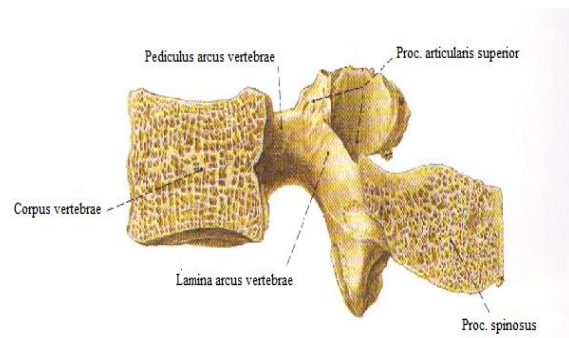


Abb.3: Lendenwirbelkörper von lateral
(übernommen aus [15], Abb. 732, S.8)

Zwischen den Wirbeln liegen die Disci intervertebrales. Bis auf die ersten beiden Wirbel der HWS, die eine Diarthrose bilden, sind die restlichen 23 WK durch Synchronosen miteinander verbunden.

Die Disci intervertebrales bestehen aus einem außen liegenden Anulus fibrosus und einem im Inneren befindlichen Nucleus pulposus. Der Anulus fibrosus besteht aus Faserknorpel und umgibt den galertigen Nucleus pulposus vollständig. Sie sind an der hyalinen Deckplatte und der knöchernen Randleiste mit den Wirbeln verwachsen.

Ihre Funktion besteht darin, Erschütterungen oder Stöße abzufangen und den Druck gleichmäßig auf die Wirbelkörperplatten zu verteilen. Des Weiteren ermöglichen die Disci auf der einen Seite Bewegungen der Wirbelkörper gegeneinander, auf der anderen Seite verleihen sie durch die bewegungslimitierende Wirkung der Synchronosen Stabilität für die Wirbelsäule [16].

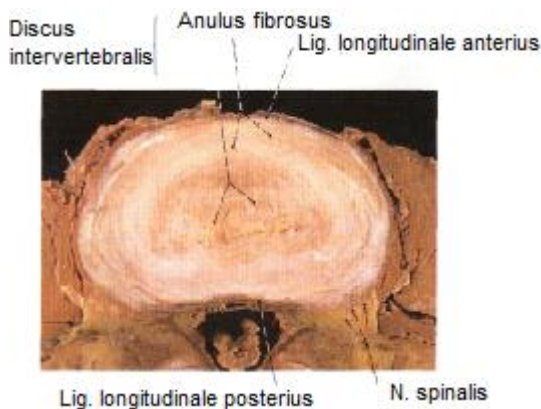


Abb.4: Bandscheiben-Päparat
(übernommen aus [15], Abb. 770, S.24)

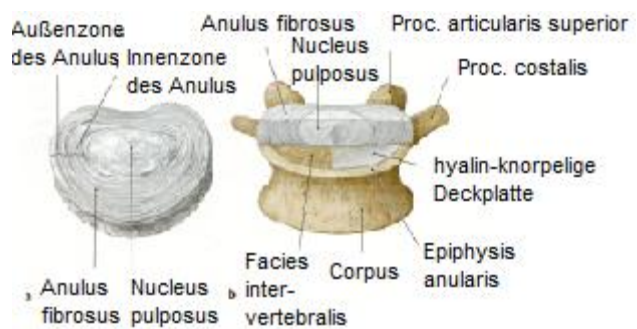


Abb.5: Bandscheibenaufbau Zeichnung
(übernommen aus [16], Abb.1-10.a+b, S.236)

Zusätzliche Stabilität wird der WS durch ihren komplex aufgebauten Bandapparat verliehen.

Die verschieden verlaufenden Ligamenti schränken je nach Lokalisation das Bewegungsausmaß der Flexion, Extension oder Rotation ein.

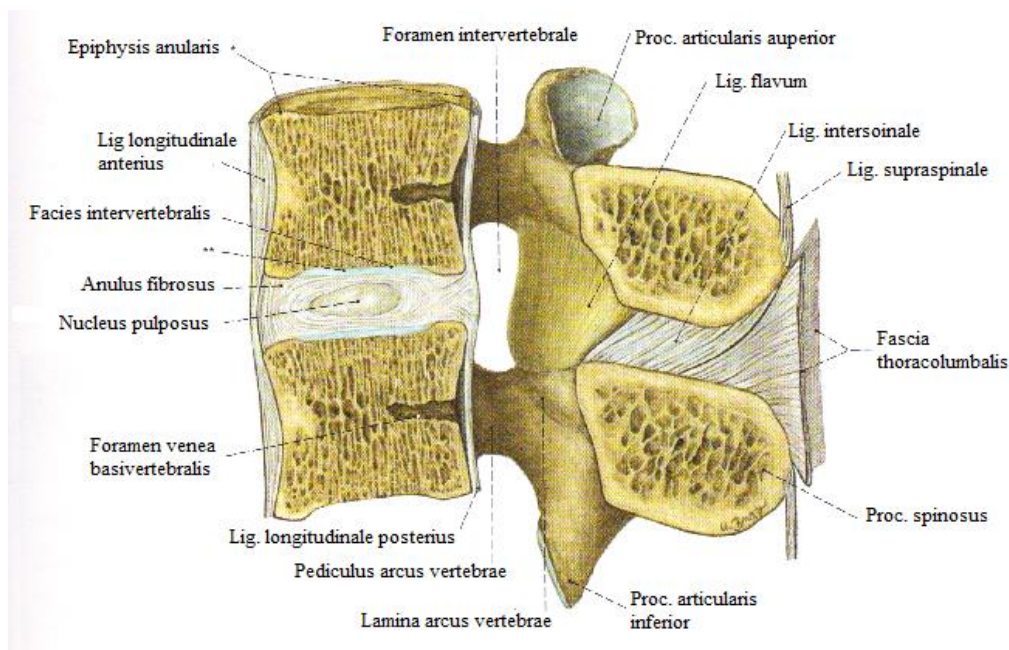


Abb.6: Bänder der Wirbelsäule im LWS-Bereich, (übernommen aus [15], Abb.773, S.25)

Die Rückenmuskulatur ist für die Beweglichkeit des Rumpfes (Flexion, Extension, Rotation, Lateralflexion) verantwortlich und trägt zusammen mit dem Bandapparat erheblich zur permanenten Stabilisierung der WS bei [16].

Die Einteilung der Rückenmuskulatur erfolgt auf Grund ihrer entwicklungsgeschichtlichen Herkunft und ihrer Innervation. Es ergeben sich zwei Gruppen:

1. Die autochthone / tiefe Rückenmuskulatur (auch Musculus erector spinae genannt)
2. Die nicht autochthone / oberflächliche Rückenmuskulatur

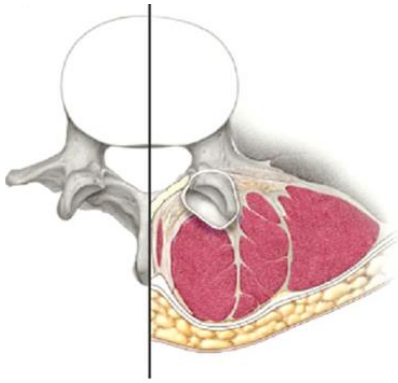


Abb.7: Horizontaler Muskelquerschnitt des M. erector spinae (übernommen aus [17], Abb. 1a)

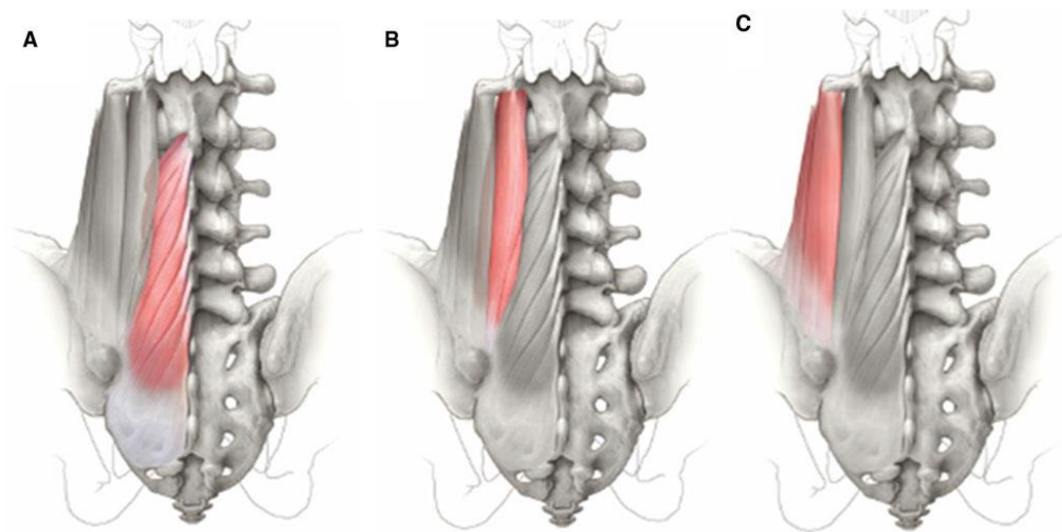


Abb.8: M. erector spinae auf Höhe der LWS: A: Multifidus, B: Longissimus, C: Iliocostalis (übernommen aus [17], Abb.2a-c)

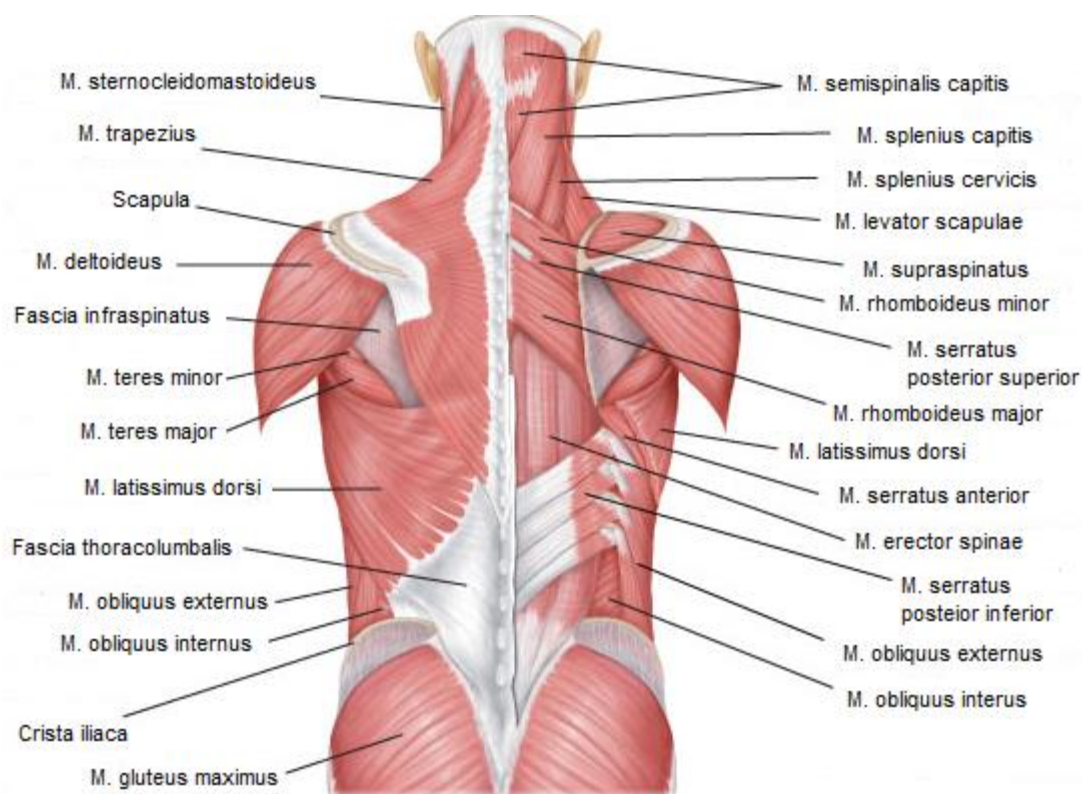


Abb.9: Rückenmuskulatur des Menschen (übernommen aus [18])

Die Wirbelsäule (WS) bildet das Achsenskelett des menschlichen Körpers. Ihre Funktionalität ermöglicht dem Menschen den aufrechten Gang [19]. Durch ihre Morphologie ist sie für die Beweglichkeit des Rumpfes verantwortlich. Die Bewegungsumfänge nach der Neutral-Null-Methode für die jeweiligen WS-Abschnitte variieren wie folgt

	LWS	BWS	HWS
Flexion / Extension	50/0/30°	35/0/25°	40/0/70°
Rotation	10/0/10°	40/0/40°	70/0/70°
Lateralflexion	20/0/20°	20/0/20°	35/0/35°

Tabelle 1: Bewegungsumfänge der Wirbelsäule nach der Neutral-Null-Methode (übernommen aus [16], Abb.C-1.18, S.247)

Die jeweiligen Bewegungen werden durch sogenannte Bewegungssegmente ermöglicht. Ein Segment besteht aus 2 benachbarten Wirbelkörpern mit ihren Gelenkverbindungen, der dazwischen liegenden Bandscheibe und den anliegenden bzw. ansetzenden Muskeln und Bändern. Auch die neuronalen Strukturen gehören dem jeweiligen Bewegungssegment an. Insgesamt ist der Aufbau der Wirbelsäule eine Kombination aus Funktionalität und Stabilität.

Für die unterschiedlich stark ausgeprägte Beweglichkeit der einzelnen Abschnitte kommen verschiedene Aspekte in Betracht.

Die Beweglichkeit der Halswirbelsäule ist in allen drei Bewegungsachsen im Vergleich zu den restlichen Wirbelsäulenabschnitten am größten. Dies ist zum Teil auf die Beweglichkeit der Kopfgelenke zurückzuführen.

An der Brustwirbelsäule setzen die Rippen an. Diese stabile und relativ starre Konstruktion geht mit einer Einschränkung der Beweglichkeit einher, ermöglicht jedoch dadurch die komplexen Vorgänge der Atmung.

Im Bereich der Lendenwirbelsäule besteht durch die nahezu horizontal stehenden Dornfortsätze eine gute Beweglichkeit für Flexions- und Extensionsbewegungen. Die geringe Rotationsbeweglichkeit liegt an den fast sagittal stehenden Gelenkfortsätzen in diesem Bereich der Wirbelsäule.

Manifestationsorte mit erhöhtem Risiko für die Entstehung von Wirbelsäulenpathologien sind die sog. junktionalen Areale, also die Übergänge von Segmenten mit hoher Beweglichkeit zu relativ starren Segmenten.

Der knöcherne Wirbelkanal, in dem das Rückenmark verläuft, bietet zusammen mit dem anliegenden Weichteilmantel einen guten Schutz vor äußeren Krafteinwirkungen. Der doppel-S-förmige Verlauf der Wirbelsäule und die Bandscheiben dienen zum Abfangen von axialen Stößen und stellen somit einen zusätzlichen Schutz der empfindlichen Nervenstrukturen und des Gehirns dar.

Um eine gleichmäßige Kraftverteilung auf die einzelnen Wirbel zu erreichen, erfolgt die Lastübertragung über den Wirbelkörper und die Facettengelenke. Mit zunehmender Last nehmen die Wirbelkörper deshalb von kranial nach kaudal in Dicke und Breite zu. Da aufgrund der doppel-S-Form der Wirbelsäule die verschiedenen Abschnitte ventral bzw. dorsal der Belastungsachse liegen, erfolgt die Kraftübertragung in den kyphotischen Abschnitten eher ventral, in den lordotischen Abschnitten eher dorsal.

Für die Stabilität der Wirbelsäule sind drei Subsysteme verantwortlich.

Zum passiven System gehören die knöchernen Strukturen und die Bänder. Das aktive System wird von den Muskeln verkörpert und das neuronale System stellt die Verbindung zwischen Gehirn und Muskulatur da. Nur eine gute Abstimmung der Subsysteme ermöglicht eine optimale Funktionalität des Systems [16].

2.2 Epidemiologie degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen

Der Altersgipfel für Patienten mit Rückenschmerzen liegt im fünften und sechsten Lebensjahrzehnt [1]. Patienten mit wiederkehrenden Rückenschmerzen erholen sich in 60-70% der Fälle innerhalb von 6 Wochen wieder, 80-90% erlangen nach bis zu 12 Wochen Schmerzfreiheit. Länger dauernde Episoden von Rückenschmerzen vermindern die Wahrscheinlichkeit der kompletten Ausheilung. Nur 50% der Patienten mit Symptomen, die länger als 6 Monate bestehen, kehren ins Arbeitsleben zurück [20]. Frauen sind häufiger betroffen als Männer, auch die Intensität der Schmerzen wird stärker angegeben und der zeitliche Verlauf der Beschwerden ist länger [5].

Als Ursache für chronische Rückenbeschwerden kommt eine Vielzahl von angeborenen und degenerativen Erkrankungen in Betracht.

Zu den angeborenen Krankheitsprozessen gehören die Spondylolyse und die in Folge davon resultierende Spondylolisthese. In 5-7% der weißen Bevölkerung tritt eine Spondylolyse auf. L5 ist in ca. 80% der Fälle betroffen, L4 in ungefähr 15% [21].

Eine Spondylolisthese kann jedoch auch durch degenerative Prozesse entstehen und dann gegebenenfalls zu einer Spinalkanalstenose führen. Des Weiteren gehören u.a. die Bandscheibenvorfälle, die Osteochondrose, die Facettengelenksarthrose und die degenerative Lumbalskoliose und begleitende Spinalkanalstenose zu den degenerativen Erkrankungen.

Der Entstehungsprozess von degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen wurde erstmals 1978 von Kirkaldy-Willis et al. beschrieben und wurde als grundlegender Prozess für die Alterung der Wirbelsäule, Pathologien und Schmerz akzeptiert. In diesem Model werden die klinischen Manifestationen der degenerativen Veränderungen an der Wirbelsäule in 3 Phasen eingeteilt:

1. Temporäre Dysfunktion, 2. Instabilität, 3. Stabilisation.

Man geht davon aus, dass es im Laufe des Lebens zur allmählichen Bandscheibendegenerationen mit Untergang der zellulären Bestandteile und Insuffizienz der extrazellulären Matrix im Zusammenspiel mit entzündlichen Reaktionen kommt. Durch die Reduktion der Wasserspeicherkapazität kommt es zu Rissen im Anulus fibrosus, Destruktion des Nucleus oder sogar zu einem Prolaps der Bandscheibe [22]. Bandscheibenvorfälle manifestieren sich zu 90% im lumbalen Anteil der Wirbelsäule. Am häufigsten ist das Segment L4/5 betroffen, gefolgt von L5/S1. Das Entstehen eines Bandscheibenvorfalles wird z.B. durch schweres Heben eines Gegenstandes, Rotationsbewegungen oder Traumata hervorgerufen [23]. Der Altersgipfel liegt zwischen 30-45 Jahren [21]. Da die Bandscheiben zu den bradytrophen, nicht-vaskularisierten Geweben gehören, ist ihre Regenerationsfähigkeit herabgesetzt und langwierig [16]. Durch die reduzierte Bandscheibenhöhe finden Änderungen der biomechanischen Vorgänge der

Wirbelsäule statt. Es resultieren daraus ein Stabilitätsverlust mit Hypermobilität in dem jeweiligen Segment und damit auch eine erhöhte Belastung der Facettengelenke. Zu diesem Zeitpunkt können bereits eine Spondylolisthese und Schmerzen auftreten.

Die vermehrte mechanische Belastung der Facettengelenke führt zu strukturellen Umbauten am Knochen (Spondylarthrose). Auch an den Grund- und Deckplatten der Wirbelkörper entstehen Veränderungen, welche sich als Osteochondrose manifestiert. Die angrenzenden Bänder werden in den fortschreitenden degenerativen Prozess ebenfalls mit einbezogen. Häufig ist auch das Lig. flavum verdickt. Durch die Umverteilung der Belastungen auf die einzelnen Strukturen kommt es zur Facettengelenks-Hypertrophie und zu Wirbelkörper-Osteophyten. Dies sind Kompensationsmechanismen um die Stabilität der betroffenen Segmente wiederherzustellen. Dadurch kann es jedoch zu einer Einengung des Spinalkanals und der Foramina kommen. Die Häufigkeit für das Vorkommen von Wirbelkanalstenosen ist nicht genau bekannt. In der amerikanischen Bevölkerung haben Schätzungen zu Folge 13-14% der Patienten, die einen Wirbelsäulenspezialisten aufsuchen, eine Spinalkanalstenose [24]. 21% der über 60 Jährigen weisen im MRT eine Wirbelkanalstenose auf [25]. Diese degenerativen Entwicklungsprozesse können zu Wirbelsäulensteifigkeit, Schmerzen und nervalen Ausfällen führen. Die oben beschriebenen Versteifungsprozesse der Wirbelsäule z.B. durch Osteophyten stellen die Grundlage für eine physiologische Anschlussdegeneration dar, weil die benachbarten Segmente die verminderte ROM durch Hypermobilität versuchen auszugleichen [26]. In diesem Model von Kirkaldy-Willis et al. wurde der Einfluss der Rückenmuskulatur auf die degenerativen Prozesse an der Wirbelsäule noch nicht berücksichtigt, zumindest nicht für die Entstehung von degenerativen Veränderungen [14]. Inzwischen wurde jedoch auch die Beteiligung der Rücken-, Hüft- und Abdominalmuskulatur bei degenerativen Vorgängen an der Wirbelsäule beschrieben. Muskeln tragen demnach ebenso zur Stabilität der Wirbelsäule bei wie die anderen Komponenten eines Bewegungssegments. Bei einem Ausfall oder einer Schwächung wird das Wirbelsäulenalignment gestört und kann so zu degenerativen Veränderungen führen (siehe auch Ausführung im Kapitel 2.4 „Fragestellung der Arbeit“).

Spondylolyse und Spondylolisthese werden nach den Klassifikationen von Newmann, Wiltse und Rothmann in verschiedene Formen eingeteilt. Beide Erkrankungen kommen wie weiter oben bereits erwähnt meist im Bereich der LWS vor. Die folgende Tabelle 2 gibt die Klassifikation der Spondylolyse und Spondylolisthese nach Newman, Wiltse und Rothman wieder [27,28,29].

Typ I	Dysplastisch
Typ I A	Dysplasie der dorsalen Wirbelelemente mit axialer Ausrichtung der Gelenkfortsätze (häufig assoziiert mit Spina bifida)
Typ I B	Dysplasie der Processus articulares mit sagittaler Orientierung der Facettengelenke
Typ I C	Andere kongenitale Anomalien
Typ II	Isthmisch
Typ II A	Lyse
Typ II B	Elongation
Typ II C	Akute Pars Fraktur
Typ III	Degenerativ
Typ IV	Posttraumatisch
Typ V	Pathologisch
Typ VI	Iatrogen

Tabelle 2: Klassifikation Spondylolyse und Spondylolisthese (übernommen aus [30], Tabelle 2, S.1000)

2.3 Klinisches Erscheinungsbild und Neurologie

Das klinische Bild degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen zeigt eine sehr große Variabilität. Von einem beschwerdefreien Zufallsbefund bei Routineuntersuchungen bis hin zu neurologischen Symptomen mit Hypo- / Hyperästhesien und Paresen können die Krankheitsbilder in Erscheinung treten.

Nach der Art der Symptome kann man eine Einteilung nach drei unterschiedlichen klinischen Bildern vornehmen: lokal, pseudoradikulär, radikulär [21].

Die lokalen Rückenbeschwerden sind auf eine Funktionsstörung der Bandscheibe, der Bänder oder der kleinen Wirbelgelenke zurückzuführen. Es besteht, wie der Name schon sagt, ein lokal begrenzter Schmerz, der durch Druck in dem entsprechenden Segment hervorgerufen werden kann und nicht ausstrahlt, was z.B. bei der Facettengelenksarthrose der Fall sein kann.

Bei dem pseudoradikulären Krankheitsbild ist eine lokal segmentale Beschwerdesymptomatik mit Ausstrahlung in die Beine vorhanden. Ein komplettes segmentales Ausfallmuster ist jedoch nicht gegeben, da keine direkte Nervenwurzelkompression vorliegt und somit kein dermatombezogenes Ausfallmuster entsteht. Der Spinalnerv wird nicht irritiert und der

Muskelkraftgrad ist nicht beeinträchtigt. Pseudoradikuläre Schmerzen kommen z.B. bei Wirbelgelenkserkrankungen, muskulären Beschwerden und Iliosakralgelenkspathologien vor, wo klinisch eine Schmerzausstrahlung bis zum Knie (und meist nicht weiter nach distal) imponieren kann [31].

Das radikuläre Erscheinungsbild ist durch ein segmentales Nervenkompressionsmuster mit Ausstrahlung in die Beine gekennzeichnet. Diese können je nach betroffener Nervenwurzel in die Gluteal-, Ober- und Unterschenkelregion bis in die Füße ausstrahlen [21]. In ca. 15% der Spondylolisthesen und 10% der Bandscheibenvorfälle kommt es zu einer Nervenwurzelkompression, in Folge dessen auch sensomotorische Ausfallsymptomatiken, Kraftgradreduktionen und Veränderungen der Muskeleigenreflexe beobachtet werden können [30,32]. Die Untersuchung wird stets im direkten Seitenvergleich durchgeführt, da individuell starke Unterschiede vorkommen. Auch Stuhl- und Harninkontinenz können auftreten [30]. Hervorgerufen werden kann ein radikuläres Ausfallmuster z.B. durch einen Bandscheibenprolaps.

In Abhängigkeit von der komprimierten Nervenwurzel können sich charakteristische Ausfallmuster ergeben. Die radikulären Symptome können ein- oder beidseitig lokalisiert sein. Neben den sensiblen Autonomiegebieten der Nerven besitzt jedes Dermatom auch einen jeweiligen Kennmuskel mit dazugehörigem Reflex. Die wichtigsten Syndrome sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt [33].

Syndrom / Wurzel	Diskus	Kennmuskel	Reflex
L3	Zwischen LWK 2 + LWK 3	M.quadrizeps femoris	PSR erloschen
L4	Zwischen LWK 3 + LWK4	M. tibialis anterior	PSR abgeschwächt
L5	Zwischen LWK 4 + LWK 5	M. extensor hallucis longus	TPR abgeschwächt / erloschen
S1	Zwischen LWK 5 + SWK 1	M. triceps surae	ASR abgeschwächt / erloschen

Tabelle 3: Syndrome bei Nervenwurzelkompression (zusammengestellt aus [33])

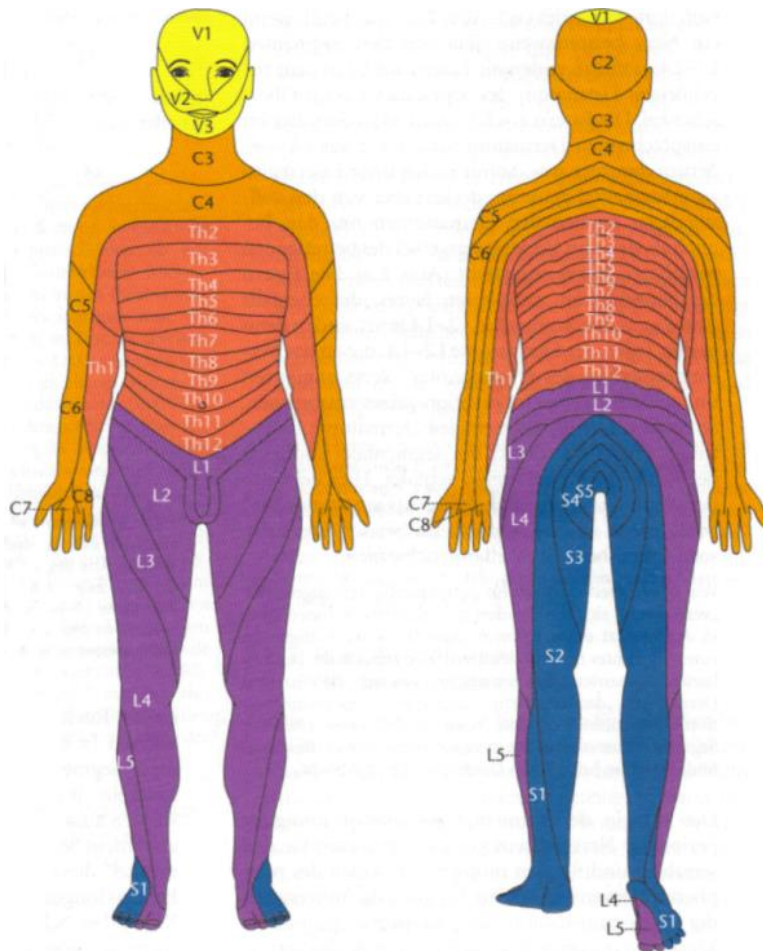


Abb.10: Dermatome des menschlichen Körpers (übernommen aus [33] Abb.2.1, S.23)

Beim Auftreten pseudoradikulärer und radikulärer Erscheinungen kann zur Unterscheidung bei unklarer neurologischer Befundkonstellation präoperativ ein Elektromyogramm (EMG) und eine Nervenleitgeschwindigkeitsmessung (NLG) indiziert sein [32]. Die NLG wird eingesetzt um Verletzungen von peripheren Nerven zu lokalisieren und/oder den Regenerationsverlauf einzelner Nerven zu beurteilen. Außerdem kann mit Hilfe dieser Technik die Unterscheidung zwischen radikulären Läsionen und Plexusläsionen vorgenommen werden. Ein EMG stellt die Muskelaktionspotentiale dar und wird zur Diagnose von neurogenen oder myogenen Ausfallsymptomen durchgeführt. Die Messungen erfolgen durch Ableitung elektrischer Potentiale über Oberflächen- oder Nadelelektroden [32].

Ein weiteres neuronales Beschwerdebild ist das sogenannte Querschnittssyndrom. Dies kann akuter oder chronischer Genese sein und wird durch eine komplette Schädigung des Rückenmarks auf einer bestimmten Höhe verursacht. Ein akutes Querschnittssyndrom ist meistens auf ein Trauma oder auch große Bandscheibenvorfälle zurückzuführen. Je nach Lokalisation prägen sich variable Krankheitsbilder aus. Unterhalb der Läsion kommt es zunächst

zu schlaffen Lähmungen und Sensibilitätsverlust. Diese Symptomatik wandelt sich nach ca. 6 Wochen zu spastischen Lähmungen mit gesteigerten und pathologischen Reflexen und einer Reflexblase um.

Die chronischen Querschnittsyndrome sind meist durch höhergradige degenerative Spinalkanalstenosen oder Tumore bzw. Metastasen ausgelöst und manifestieren sich mit progredienten, spastischen Plegien. Initial inkomplette Querschnitte können auf Grund des resultierenden Ödems ebenfalls zu kompletten Querschnittsyndromen führen [21].

Das Konussyndrom, auch Reithosenanästhesie genannt, ist durch eine Schädigung des Sakralmarkes auf Höhe S1 bedingt und verursacht Miktions-, Defäkations- und Sexualfunktionsstörungen. Auch Sensibilitätsstörungen im medialen Oberschenkelbereich kommen vor.

Beim Kaudasyndrom treten zusätzlich zu den Symptomen des Konussyndroms Sensibilitätsstörungen der jeweilig betroffenen Nervenwurzeln sowie Lähmungen der Beine auf [21]. Konus- und Kaudasyndrom können sowohl traumatisch bedingt in Erscheinung treten als auch durch degenerative Prozesse hervorgerufen werden. Bei traumatischer Genese ist der zeitliche Ablauf kurz, bei degenerativer Ursache ist die Entwicklung der Symptomatik eher schleichend [21].

Bei der Wirbelkanalstenose kann das Beschwerdebild der Claudicatio spinalis beobachtet werden. Die Patienten können nur noch eine begrenzte Strecke zu Fuß zurücklegen und müssen dann auf Grund von Schmerzen und ggf. anderen neurologischen Erscheinungen wie Hypästhesien oder ausstrahlende Beinschmerzen stehen bleiben. Die Symptome bilden sich bei LWS-Flexion zurück, da bei dieser Inklinationsbewegung der Wirbelkanal erweitert wird und das Rückenmark somit mehr Platz hat. Daher ist Fahrradfahren und Sitzen in vorgebeugter Lage häufig problemlos bei diesen Patienten möglich [31]. Eine wichtige Differentialdiagnose ist die Claudicatio intermittens durch Gefäßerkrankungen, welche unbedingt mittels Gefäßdoppler ausgeschlossen werden muss.

Häufig spielen auch psychologische Faktoren, sowie die Auswirkungen der Krankheit auf die soziale Integration in der Gesellschaft eine nicht unerhebliche Rolle [34]. Eine lang andauernde chronische Schmerzbelastung kann neben vegetativen Symptomen wie Schlafstörungen auch zu psychischen Erkrankungen wie z.B. Depressionen führen [35].

2.4 Körperliche Untersuchung

Die Lebensqualität der Patienten mit chronischen Rückenschmerzen wird durch Schmerzen, Verlust der Autonomie, verminderte Teilnahme an sozialen Aktivitäten und den oft langen Krankheitsverlauf stark negativ beeinflusst.

Es ist daher von entscheidender Bedeutung eine genaue Anamnese und eine gründliche körperliche Untersuchung durchzuführen. Bei der Anamnese sollte besonders auf den zeitlichen Verlauf, die Lokalisation und die Qualität der Schmerzen geachtet werden. Eventuelle Schmerzausstrahlungen und die Abhängigkeit der Schmerzen von der Körperhaltung geben wichtige Hinweise bei der Diagnoseerhebung. Außerdem sind vegetative Begleitsymptomaten wie Schwächegefühl in den Beinen, Parästhesien und Maßnahmen zur Besserung bzw. Verschlechterung der Symptomatik zu erfragen.

Bei der Inspektion des Patienten ist auf die Symmetrie der Rückenproportionen zu achten.

Bei der körperlichen Untersuchung ist neben einem lokalen Druckschmerz über dem betroffenen Segment häufig auch eine Verspannung der ischiokruralen Muskulatur zu beobachten.

Für die Beweglichkeit der Wirbelsäule werden verschiedene klinische Test durchgeführt. Der Finger-Boden-Abstand zeigt den Abstand zwischen den Fingerkuppen des Patienten beim Vorbeugen und dem Boden. Die Knie sind dabei durchgestreckt. Junge Patienten sollten den Boden erreichen. Bei dieser groben Erhebung des Bewegungsausmaßes wird der Anteil der Hüftbewegung allerdings mit erfasst und erlaubt daher nur eine vage Aussagekraft über die Beweglichkeit der Wirbelsäule [21].

Für die Erhebung des Schober-Maßes wird vom Dornfortsatz S1 eine Strecke von 10cm nach kranial abgemessen. Bei Ventralflexion verlängert sich diese Strecke um bis zu 5-7cm. Es werden jedoch lediglich die unteren Segmente der Lendenwirbelsäule erfasst, was daher keine Beurteilung der ganzen LWS zulässt.

Beim Ott-Maß wird vom Vertebrae prominens eine Strecke von 30cm nach kaudal abgemessen. Bei der anschließenden Flexion sollte sich die markierte Strecke um ca. 3-4 cm verlängern [21].

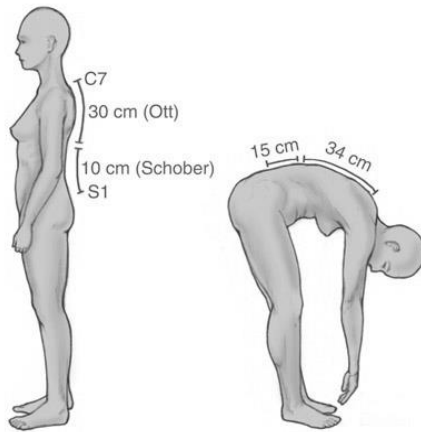


Abb.11: Darstellung der Messpunkte beim Schober-/ Ott-Maß (übernommen aus [36], S.3)

Auch eine Untersuchung der Wirbelsäulenbeweglichkeit nach der Neutral-Null-Methode wird standardmäßig zur Beweglichkeitsanalyse durchgeführt.

Zudem können mit Hilfe von Goniometern und Inclinomern die Winkel der Gelenkbeweglichkeit bzw. das Bewegungsausmaß ermittelt werden. Es gibt mehrere Varianten dieser Techniken [37,39]. Messungen mit dem Elektrogoniometer ermöglichen z.B. eine non-invasive Beweglichkeitsmessung an der Wirbelsäule. Dies ist eine kontinuierliche Methode zur Aufnahme der Wirbelsäulenbewegungen und korreliert gut mit den gemessenen Winkeln im Röntgenbild der LWS [37,38,39,40]. Mit dem Goniometer werden auch axiale Rotationsbewegungen des Oberkörpers gemessen, die sich aus lumbalen und thorakalen Bewegungen der Wirbelsäule zusammensetzen. Auf Grund der aufwendigen Handhabung ist jedoch der Gebrauch im klinischen Alltag nicht praktikabel [37].

Mit den Aufnahmetechniken der Cineradiologie und Videofluoroskopie ist eine kontinuierliche Bewegungsaufnahme möglich. Hierbei werden die Patienten kontinuierlich mit Röntgenstrahlen durchleuchtet und die Bilder mittels Verstärker auf einen Monitor übertragen. Dadurch können bewegte Bilder in Echtzeit analysiert werden. Wegen der langen Durchleuchtungszeit mit Röntgenstrahlen entsteht für die Probanden allerdings eine hohe Strahlenexposition [39,41].

Die SpinalMouse gehört zu den non-invasiven, strahlungsfreien Oberflächentechniken und ermöglicht sagittale ROM-Messungen. Durch manuelle paravertebrale Führung entlang der Wirbelsäule des elektrischen Gerätes, sind sowohl spinale als auch intersegmentale ROM-Messungen möglich. Ein Vorteil dieses Messgerätes ist, dass die thorakale, die lumbale sowie die sakrale Hüftbeweglichkeit separat gemessen werden können und ein einfaches Handling gegeben ist. Nachteil dieser Technik ist, dass durch die oberflächliche Messung ein skinmovement error besteht und lediglich statische Bewegungsausmaße erfasst werden [42,43].

Auch mit dem MRT kann die ROM der lumbalen Wirbelsäule objektiviert werden. Hier sind allerdings ebenfalls lediglich statische Aufnahmen möglich [44].

Mit dem Motion Capturing System Vicon ist eine sehr genaue 3D Bewegungsanalyse möglich. Dieses optoelektronische Messverfahren ermöglicht dynamische, strahlungsfreie Messungen. Dazu werden Marker auf der Hautoberfläche platziert, die von verschiedenen Kameras im Raum erfasst werden. Diese aufwendige und sehr teure Messmethode ist allerdings klinisch nicht praktikabel und daher nicht als standardmäßige Bewegungsmessung durchführbar [45].

Je nach erhobenem Befund bei der körperlichen Untersuchung kann man teilweise auf die schmerzauslösende Struktur schließen. Einen interspinösen Druckschmerz findet man häufig bei einem Bandscheibenvorfall, ein druckschmerzhaftes Iliosakralgelenk könnte Ausdruck eines ISG-Syndroms sein. Stufenbildungen bei der Dornfortsatzpalpation deuten auf eine Spondylolisthese hin, Facettendruckschmerz auf Facettengelenksarthrose, Fraktur oder Metastasen und tastbare, knotige Muskelverhärtungen sind ein Anhalt für Myogelosen [21].

Die Funktion der Iliosakralgelenke wird durch den Mennell-Test, das Vorläuferphänomen und den Patrick Test (auch Viererzeichen genannt) untersucht. Beim Mennell-Test wird die Hüfte überstreckt und dadurch ein Schmerz in der Lendenwirbelsäule und im ISG-Gelenk hervorgerufen. Beim Vorschubphänomen werden die Daumen des Untersuchers auf den spinea iliacea posteriores superiores positioniert und zeigen bei der Flexionsbewegung des Patienten eine ungleichmäßige Bewegungsauslenkung an. Mit dem Patrick-Test werden das Iliosakralgelenk, die Hüftbeweglichkeit und die untere Lendenwirbelsäule getestet. Der Fuß des zu untersuchenden Beines wird beim liegenden Patienten auf das Knie des anderen, durchgestreckten Beines gelegt. Dann soll der Patient versuchen, mit dem angewinkelten Bein so nah wie möglich an die Unterlage zu kommen. Die Hüfte wird vom Untersucher fixiert, der Abstand des Beines zur Unterlage sollte weniger als 20 cm betragen.

Bei Nervenwurzelirritationen und neurologischen Störungen sind die Nervendehnungszeichen nach Lasègue und Bragard positiv. Der Patient wird in Rückenlage untersucht und das gestreckte Bein wird vom Untersucher angehoben (Lasègue). Bei plötzlich einschießenden Schmerzen ist der Test positiv. Beim positiven Bragard-Zeichen findet durch zusätzliche Dorsalextension im Sprunggelenk eine Schmerzverstärkung statt [32]. Bei Auslösung von ausstrahlenden Beschwerden in der betroffenen Extremität durch Elevation der Gegenseite spricht man von einem gekreuzten Lasègue. Abzugrenzen dazu ist der Pseudolasègue. Bei gleicher Durchführung wie bei den vorangehenden Tests findet eine langsame Schmerzzunahme lokal oder pseudoradikulär mit zunehmender Elevation des Beines statt. Dies deutet auf eine Verkürzung der ischiokruralen Muskulatur oder Erkrankungen des lumbosakralen Übergangs hin [21].

Ein neurologischer Status wird bei der Untersuchung der Wirbelsäule stets durchgeführt, um einen Überblick über die Situation des Patienten zu bekommen.

Die manuelle Kraftgradeinteilung ist in der folgenden Tabelle 4 dargestellt.

Kraftgrad	Muskelfunktion
0	Keine Kontraktion
1	Kontraktion, aber ohne Bewegung
2	Aktive Bewegung entlang der Schwerkraft
3	Aktive Bewegung gegen die Schwerkraft
4	Aktive Bewegung gegen mittleren Widerstand
5	Normale Muskelkraft

Tabelle 4: Muskelkraftgrade (übernommen aus [32], S.6)

Der Romberg-Test kann zum Ausschluss zerebellärer oder vestibulärer Ursachen zu spinalen Pathogenesen herangezogen werden. Der Patient steht mit zusammengestellten Beinen, geschlossenen Augen und nach vorne gestreckten Armen. Eine erhöhte Fallneigung spricht für eine spinale Ataxie und wird dann als Romberg positiv bezeichnet. Ist der Strichgang nicht durchführbar, lässt dies auf eine Kleinhirnläsion schließen [32].

Bei einem Verdacht auf das Vorliegen eines Konus- und/oder Kaudasyndroms ist zudem der Sphinktertonus und die Dammsensibilität zu prüfen [34].

2.5 Bildgebende Diagnostik

Häufig ist nach der Anamnese und der körperlichen Untersuchung bereits ein Verdacht auf die zugrundeliegende Ursache vorhanden, die mit bildgebenden Verfahren verifiziert werden soll.

Bei der apparativen Diagnostik gehört die Röntgenaufnahme im Stehen a.-p. und seitlich zur Basisdiagnostik und lassen Aussagen über die segmentale Beschaffenheit zu. Anhand der Bilder können knöcherne Veränderungen wie Frakturen, Spondylolisthesen, Tumore und degenerative Veränderungen an der Wirbelsäule wie z.B. Bandscheibenerniedrigungen oder Osteophyten diagnostiziert werden. Muskuläre Anteile, der Bandapparat und das Myelon können nicht dargestellt werden, wodurch Spinalkanaleinengungen nicht sicher ausgeschlossen werden können [46,47].



Abb.12: laterales Röntgenbild der LWS, stehend: Spondylolisthesis, Meyerding Grad 2 (links)

Abb.13: laterales Röntgenbild der LWS, stehend: Spondylolyse (mittig)

Abb.14: schräge Röntgenaufnahme der LWS, stehend: Spondylolyse, Halsbandphänomen (rechts) (übernommen aus [48], Abb.12:Abb.4, S.343; Abb.13: Abb.8b, S.346; Abb.14: Abb. 8c, S.346)

Des weiteren können Funktionsaufnahmen in Flexions- / Extensionsstellung ein Hinweis auf Instabilität geben, die in der Neutralstellung nicht sichtbar sind und erst durch die veränderte Belastung provoziert werden. Ein Röntgenbild der LWS in Schrägaufnahme kann das typische Bild des Halsbandphänomens „Scottish Dog“ zeigen wie in Abb.14 zu sehen ist. Dies ist ein pathognomonisches Zeichen für eine Spondylolyse [48].

Das MRT besitzt in der heutigen Diagnostik einen hohen Stellenwert. Es können sowohl die Weichteilstrukturen als auch die knöchernen Anteile der Wirbelsäule und das Rückenmark mit den abgehenden Nervenwurzeln beurteilt werden. Mittels MRT können foraminale Engen und extraforaminale Strukturen untersucht werden. Es ist somit sehr gut für die Diagnostik von Rückenschmerzpatienten geeignet. Beim MRT gibt es eine Vielzahl von Sequenz-Einstellungen, um die verschiedenen Gewebearten des Körpers bestmöglich abzubilden. Dabei werden die jeweiligen physikalischen Eigenschaften ausgenutzt. Die am Häufigsten verwendeten sind u.a. die T1-, T2- und die STIR- (Short-Tau Inversion Recovery) Wichtungen [46,47].



Abb.15: Seitliches MRT der Lendenwirbelsäule, T2-Wichtung (übernommen aus eigenem Fundus)

In Abhängigkeit von der klinischen Symptomatik kommen weitere bildgebende Verfahren wie das CT oder die Myelographie zur Anwendung. Aber auch bei Kontraindikationen des Patienten zum MRT, wie z.B. einem Herzschrittmacher oder anderen Metallimplantaten, können diese Verfahren eingesetzt werden [47]. Der Bedarf nach diesen speziellen Techniken besteht weiterhin, wenn die Symptome des Patienten nicht mit den MRT-Bildern korrelieren oder die MRT-Befunde keine eindeutig Aussage erlauben.

Das CT bietet bei der Beurteilung der ossären Strukturen Vorteile gegenüber dem MRT und findet hier breite Anwendung. Die Knochenmorphologie kann im CT besonders gut dargestellt und beurteilt werden. Aber auch Bandscheibenvorfälle und das Myelon können betrachtet werden. Zudem ist es möglich, 3D-Rekonstruktionen zu erstellen, die zur besseren räumlichen Darstellung der anatomischen Gegebenheiten oder OP-Planung genutzt werden können. Besonders in Notfallsituationen wie bei einem Polytrauma wird das CT als schnelles diagnostisches Mittel eingesetzt. Nachteil dieser Untersuchungsmethode ist, dass die neuronalen Strukturen nicht gut zu beurteilen sind und eine hohe Strahlenbelastung für den Patienten besteht [46].

Die invasive Myelographie ist auch als Verfahren zur Diagnose von Stenosen geeignet. Dazu werden Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule nach Injektion eines wasserlöslichen Kontrastmittels angefertigt. Zudem ist eine Bildgebung mit Funktionsaufnahmen möglich. Es werden das Rückenmark und die spinalen Nervenwurzeln dargestellt, allerdings sind die extra- und

intralaminaren Verläufe der Nerven nicht darstellbar. Es können also Spinalkanalstenosen oder Bandscheibenvorfällen erkannt werden [46]. Dies ist ein sensitives, genaues und kostengünstiges Verfahren für die Evaluation symptomatischer Patienten und daher auch in nicht hochentwickelten Ländern gut anwendbar [49]. Allerdings kann es, wie bei jedem invasiven Verfahren, zu verschiedenen Komplikationen wie Infektionen oder einem Hypoliquorrhoe-Syndrom kommen.

Eine CT-Myelographie ist eine Kombination der beiden Verfahren und ermöglicht eine genauere örtliche Auflösung in Bezug auf die neuronalen Strukturen, was bei speziellen Fragestellungen zur Diagnose genutzt werden kann [46].



Abb.16: Myelographie bei sekundärer Spondylolisthesis L 4/5 mit Spinalkanaleinengung a.p. und seitlich (übernommen aus [48], Abb.16a, S.353)

Weitere diagnostische Verfahren sind die Nervenwurzel- und Facettengelenksinfiltrationen. Dabei wird mit einem Lokalanästhetikum gezielt eine oder mehrere Nervenwurzeln bzw. Facettengelenke umspritzt. Dies ermöglicht eine enge Korrelation zwischen der Klinik und den Symptomen eines Patienten. Es wird zum einen eine Schmerzminderung erzielt und zum anderen kann das Segment ermittelt werden, von dem die Schmerzen ausgehen [21,47].

Mittels Szintigraphie können Regionen erhöhter Stoffwechselaktivität abgebildet werden. Frische Lysezonen, aktive Prozesse der Spondylose, Tumore und Entzündungen können nachgewiesen werden.

Im klinischen Alltag ist es von großer Bedeutung die erhobenen Befunde, das klinische Erscheinungsbild des Patienten und die Ergebnisse der bildgebenden Verfahren miteinander zu

vergleichen und nicht nur unabhängig voneinander zu betrachten. Nur so kann ein erfolgversprechendes Therapiekonzept erarbeitet werden.

2.6 Therapien von degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule

Bei der Therapie von Wirbelsäulenerkrankungen kommen verschiedene Ansätze in Betracht. Neben konservativen Maßnahmen, stehen auch minimalinvasive und operative Therapieoptionen zur Auswahl.

2.6.1 Konservative Therapie

Bei den konservativen Therapieoptionen von chronischen Rückenschmerzpatienten können verschiedene Behandlungen unterschieden werden: Medikamentöse Schmerztherapie, wirbelsäulennahe Infiltrationen, Physiotherapie, psychologische Therapiekonzepte und Orthesenversorgung.

Bei der medikamentösen Therapie kommen bevorzugt Schmerzmedikamente aus der Gruppe der nicht-steroidalen Antiphlogistika zum Einsatz, die oral verabreicht werden können. Sollte mit diesen Medikamenten keine adäquate Schmerzlinderung erzielt werden, wird nach dem WHO-Stufenschema die Therapie angepasst [50].

Auch eine Therapie mit Muskelrelaxantien ist vorstellbar. Muskelrelaxantien werden in 2 große Gruppen unterteilt: krampflösende und antispastische Medikamente. Zu den krampflösenden Mitteln gehören die Benzodiazepine (z.B. Diazepam) und die non-Benzodiazepine (z.B. Cyclobenzapine). In die Gruppe der antispastischen Medikamente gehören z.B. Carisoprodol, Dantrolen und Baclofen [51]. 91% der praktizierenden Ärzte verschreiben Muskelrelaxantien, 35 % der Patienten mit chronischen Rückenbeschwerden bekommen Medikamente dieser Gruppe verschrieben. Allerdings gibt es viele Nebenwirkungen wie Übelkeit, Erbrechen, verschwommenes Sehen, Kopfschmerz, Schläfrigkeit und Sedierung, die in einem Review mit einem relativen Risiko von 1,5 im Vergleich zu einem Placebo auftraten. Der Einsatz dieser Medikamente sollte daher gut überlegt sein [47,52,53,54].

Zudem kommen lokale Injektionen zu Anwendung, die oberflächlich und somit relativ weit von der Wirbelsäule entfernt liegen. Zu diesen Verfahren zählen die Triggerpunktinfiltration, die segmentale Hautquaddelung und die Muskelinfiltration. Dabei werden Spritzen mit Lokalanästhetika und/oder Steroiden in die jeweiligen Gewebe gespritzt [21].

Zudem kann die Anwendung von intramuskulären Calcitonin-Applikationen zu einer kurzzeitigen Beschwerdelinderung bei den Patienten führen [24].

Die wirbelsäulennahen Injektionen von Lokalanästhetika und/oder Steroiden kommen je nach auslösender Ursache in Form von Facettengelenksinfiltration, Spinalanalgesie und epidurale Injektionen zum Einsatz. Es werden lediglich sog. „Single-Shot“-Therapien durchgeführt. Meistens werden die Applikationen mittels Bildwandler, CT oder offenem MRT kontrolliert verabreicht [21,31]. Bei Spinalkanalstenosen konnte durch die Therapie mit epiduralen Steroidinjektionen Kurzzeit-Besserungen von 2-3 Wochen erreicht werden. Über Langzeiterfolge bei dieser Art der Steroid-Therapie bestehen unterschiedliche Ansichten [24].

Eine weitere, nicht medikamentöse Form der Schmerztherapie besteht in der Akupunktur-Behandlung von Schmerzpatienten.

Im Rahmen der physiotherapeutischen Behandlung kommt eine Vielzahl von Maßnahmen in Betracht um die Beschwerden der Patienten zu bessern. Neben Massagen, Wärmeanwendungen, Manuelle Therapie und Krankengymnastik kommen auch verschiedene Elektrotherapieverfahren und Akupressur zur Anwendung [31]. Viele Verfahren bewirken eine Verbesserung der lokalen Durchblutung des behandelten Segments. Die physiotherapeutische Behandlung zielt aber auch auf eine Verminderung der Lendenlordose ab. Es werden die Hüftflexoren und die Knieextensoren gedehnt. Zudem werden Übungen zur Kräftigung der abdominellen und paravertebralen Muskulatur durchgeführt, um die Stabilität der Wirbelsäule zu verbessern [55]. Physiotherapeutische Maßnahmen bewirken eine Schmerzreduktion und eine verbesserte Funktionalität.

Ein relativ neuartiges Konzept bei der konservativen Behandlung ist die multimodale Therapie. Es zielt auf eine inhaltlich und zeitlich abgestimmte interdisziplinäre Vorgehensweise bei der Behandlung von chronischen Schmerzzuständen ab. Dabei werden mehrere verschiedene konservative Therapiekonzepte parallel durchgeführt. Studien zufolge ist dieses Konzept sowohl kostengünstiger als nur separat durchgeführte konservative Therapien und verhilft chronischen Rückenschmerzpatienten zu einer schnelleren Wiedereingliederung ins Berufsleben [10].

Bei der Versorgung mit Orthesen soll eine Verbesserung der Wirbelsäulenstabilität bei degenerativen Erkrankungen oder im postoperativen Verlauf erzielt werden. Man möchte eine Entlordosierung der Wirbelsäule erreichen, weil es dadurch zu einer Erweiterung des Wirbelkanals und der Foramina kommt. Das Tragen eines Korsetts oder eines sog. Lendenmieders bewirkt so eine Schmerzminderung [24,31]. Bei Spinalkanalstenosen führt dies zu einer Laufstreckenverlängerung [24]. Orthesen sollten jedoch nicht permanent getragen werden und zusätzlich durch krankengymnastische Übungen unterstützt werden, da sonst eine Schwächung oder Atrophie der Rückenmuskulatur auftreten kann. Die Therapie mittels

Orthesenversorgung stellt deshalb heutzutage nur noch eine untergeordnete Rolle dar und wurde von den anderen Therapieoptionen weitestgehend verdrängt.

Besonders unspezifische Rückenschmerzen zeigen langfristig eine Verbesserung durch konservative / multimodale Therapie. Diskushernien können sich mit der Zeit nach konservativer Therapie bildmorphologisch verkleinern, wohingegen Wirbelkanalstenosen eine gleichbleibende Symptomatik zeigen oder der Zustand der Patienten sich verschlechtert [56,57].

2.6.2 Operative Therapie

Sind die Schmerzen nach 3-6 Monaten trotz adäquater konservativer Therapie nicht ausreichend therapierbar oder treten neurologische Ausfälle oder Instabilitäten auf, so wird meistens ein operatives Vorgehen in Abwägung der individuellen Gegebenheiten empfohlen [30,48].

Da eine große Vielfalt an Operationstechniken zur Auswahl steht, wird zur Übersicht die Sortierung der Operationsmöglichkeiten in historischer Reihenfolge erfolgen.

Die erste lumbale Fusion wurde 1911 von Albee und Hibbs unabhängig voneinander beschrieben. Für die Spondylodese wurde autologer Knochen und zunächst nicht-korrosionsresistente Drähte verwendet. Nach Einführung korrosionsresistenter Metalle in den 1930er wurden in 1940er Jahren erstmals Schrauben bei Fusionsoperation eingesetzt. Die Schrauben wurden damals am unteren Rand der Lamina im rechten Winkel zu den Facettengelenken eingebracht [58].

Im Laufe der Zeit wurden die Fusionstechniken und operativen Zugangswege weiterentwickelt und die Notwendigkeit zur ventralen interkorporellen Abstützung zur Verbesserung der Primär- und Sekundärstabilität gesehen. Je nach Zugangsart wird eine ALIF (anteriore lumbale interkorporelle Fusion), eine PLIF, also eine posteriore lumbale interkorporelle Fusion, oder eine TLIF, eine transforaminale lumbale interkorporelle Fusion, durchgeführt [30].

Die ALIF wurde 1933 erstmals von Burns beschrieben, 1952 folgte die PLIF und 1998 (praktische Anwendung ab 1993) wurde von Harms und Jeszenski die Erstbeschreibung einer Fusion mittels TLIF veröffentlicht [59].

Bei den Fusionstechniken kann also je nach individueller Situation und Krankheitsbild des Patienten eine dorsale, ventrale oder dorsoventrale Fusion mit oder ohne Reposition zur Anwendung kommen. Liegt eine Spinalkanalstenose vor, kann zeitgleich auch eine Dekompression des Myelons erfolgen. Wird eine Laminektomie oder eine Facettektomie durchgeführt, sollte aus Stabilitätsgründen auch immer eine Fusion mit erfolgen [31]. Bei einer Hemilaminectomie oder einer Laminoplastik ist eine Fusion nicht zwingend nötig. Roy-Camille

fürhte 1963 die Pedikelschrauben bei diesen Operationstechniken ein. Sie verbessern die Fusionsrate und verleihen dem operierten Segment mehr Stabilität [58,60].

Die Indikation zur Fusionsoperation ist bei fortgeschrittenen degenerativen Erkrankungen relativ weit gefasst. So gehören eine Vielzahl von Veränderungen wie z.B. degenerative Bandscheibenbeschwerden, Bandscheibenvorfälle, Spondylolisthesen, Facettenarthrosen, Osteochondrosen, Wirbelsäulendeformitäten und Spinalkanalstenosen in diese Kategorie [59].

Nach der Durchführung lumbaler Fusionen gibt es Bedenken hinsichtlich einer möglichen progredienten Degeneration der benachbarten Segmente. Man nimmt an, dass die Abschnitte über und unter den fusionierten Segmenten größeren Belastungen ausgesetzt werden als zuvor, da in diesen Segmenten der entstandene Bewegungsverlust kompensiert wird. Dadurch schreiten die degenerativen Vorgänge in den angrenzenden Segmenten zu einer Fusion schneller fort und es kommt auch hier zu den bekannten Abnutzungserscheinungen wie Bandscheibendegeneration, Osteophytenbildung an den Facettengelenken und Spinalkanalstenosen [61].

Da in der vorliegenden Population nur Patienten mit TLIF Fusionen untersucht wurden, soll im Folgenden auf diese Technik detaillierter eingegangen werden. Beim TLIF befindet sich der Patient in Bauchlage auf speziellen Lagerungskissen und wird so gelagert, dass die abdominellen Organe nicht komprimiert werden. Der Zugang zum lumbalen Operationsgebiet erfolgt von dorsal durch einen Längsschnitt über den Dornfortsätzen.

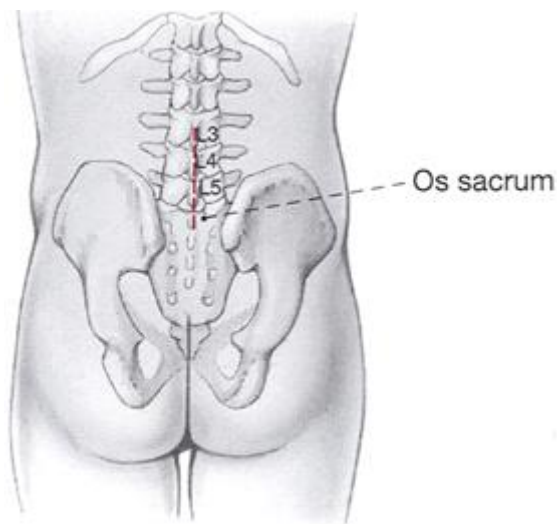


Abb.17: Mittellinien-Zugang, dorsal (übernommen aus [59], Abb.1, S.93)

Anschließend wird die Muskulatur an den Dornfortsätzen abgesetzt und bis zu den Querfortsätzen präpariert. Das Lig. flavum und die interspinösen Bänder werden bei diesem Eingriff nicht beschädigt.

Alternativ kann auch ein paraspinaler Zugang gewählt werden, dieser wird auch Wiltse-Zugang genannt. Es erfolgt ein medianer oder paramedianer Hautschnitt handbreit zur Spinosi-Linie. Nach Eröffnen der Faszie liegt der Zugangsweg zwischen dem M. multifidus und dem M. longissimus. Es kann stumpf mit dem Finger bis zum Facettengelenk weiterpräpariert werden, da diese Muskeln von einem natürlichen Spatium getrennt sind [62].

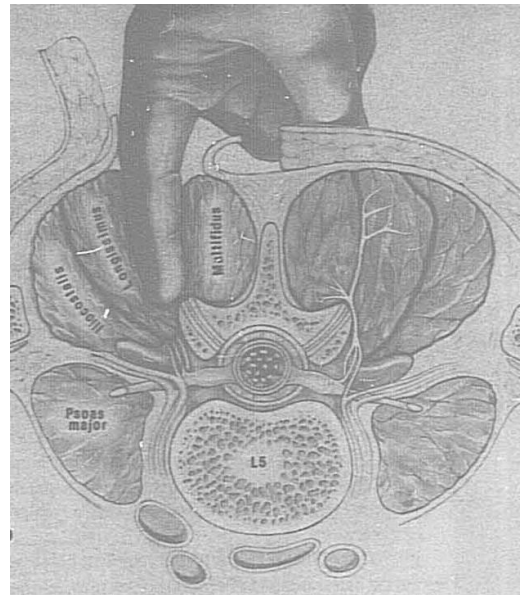
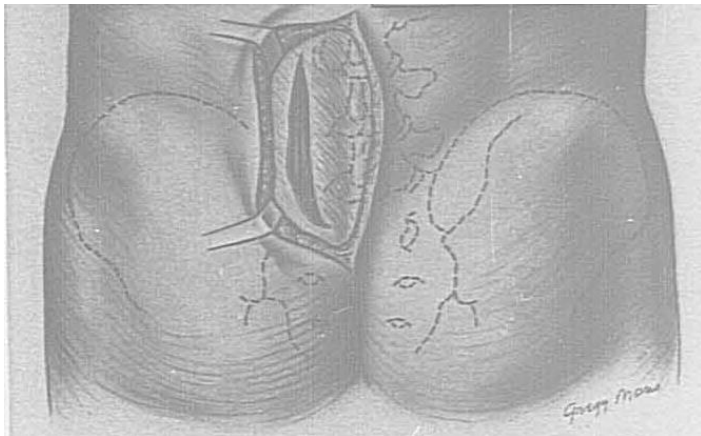


Abb.18 + 19: Paraspinaler Zugang nach Wiltse und Stumpfe Präparation (übernommen aus [62], Abb.3 + 4a, S.697 + 698)

Nachdem die Facettengelenke dargestellt sind, werden die Wirbelkörper mit Pedikelschrauben und Verbindungsstangen miteinander verbunden.

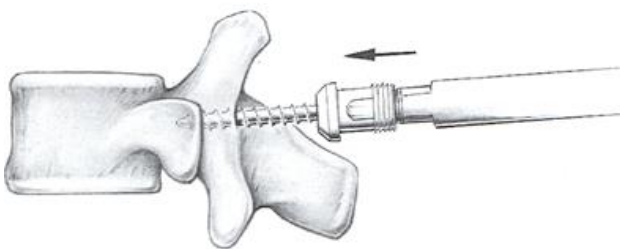


Abb.20 : Einbringen der Pedikelschraube (übernommen aus [59], Abb.6, S.94)

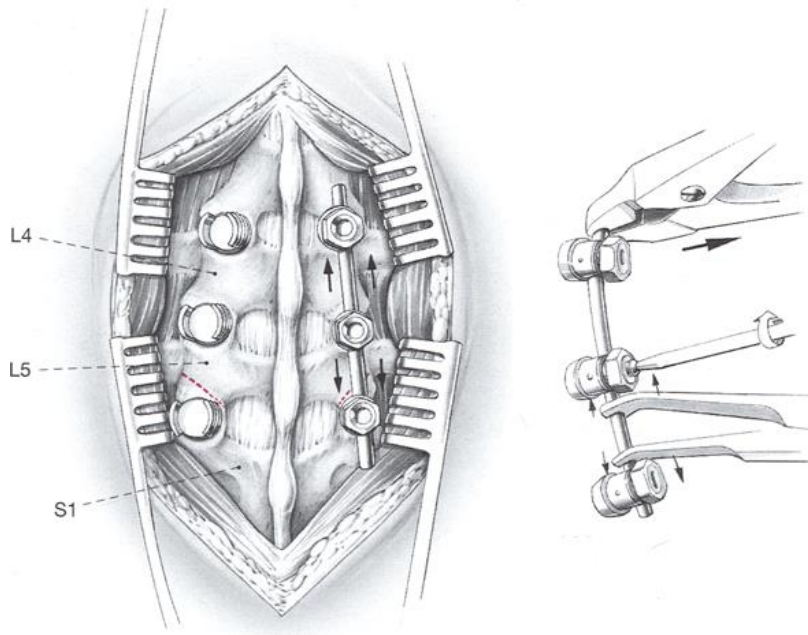


Abb.21: Schraubenposition und Installation der Verbindungsstange Verbindungsstange (übernommen aus [59], Abb.7+8, S.94)

Nach dem Einbringen der Pedikelschrauben werden unilateral die kranialen Gelenkfortsätze und die kapsulären Anteile des Lig. flavum reseziert. Nach Erreichen des lateralen Epiduralraumes wird das Bandscheibenfach dargestellt und mit dem Skalpell eröffnet. Anschließend wird es mit Hilfe von Küretten und Rangeuren ausgeräumt. Der knorpelige Anteil der Endplatten der Wirbelkörper wird abgetragen und es erfolgt eine transforaminale Auffüllung dieses Raumes mit autologem Knochenmaterial (meistens Spongiosa aus dem Beckenkamm). Diese Technik sorgt für eine schnelle knöcherne Durchbauung und somit Stabilisierung des Segmentes.

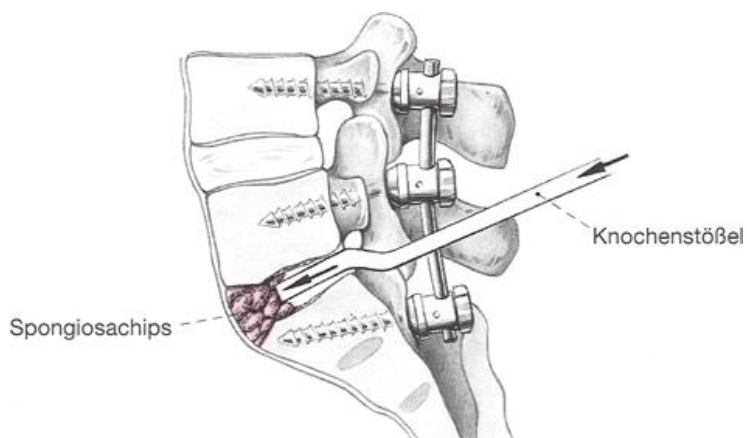


Abb.22: Auffüllen des Bandscheibenfaches mit Spongiosa (übernommen aus [59], Abb.18a, S.97)

Zusätzlich wird ein Cages, der aus Titan oder PEEK (Polyetheretherketo) besteht, in den Zwischenwirbelraum eingebracht. Er dient zur Sicherung der Höhe des ausgeräumten Bandscheibenfaches und sollte in postero-medialer Position eingebracht werden, da der Cage in dieser Position nach einer Studie von Kroppenstedt et al. die geringste Einsinktendenz in die Deckplatten der angrenzenden Wirbelkörper zeigt und die besten Fusionsraten [63].

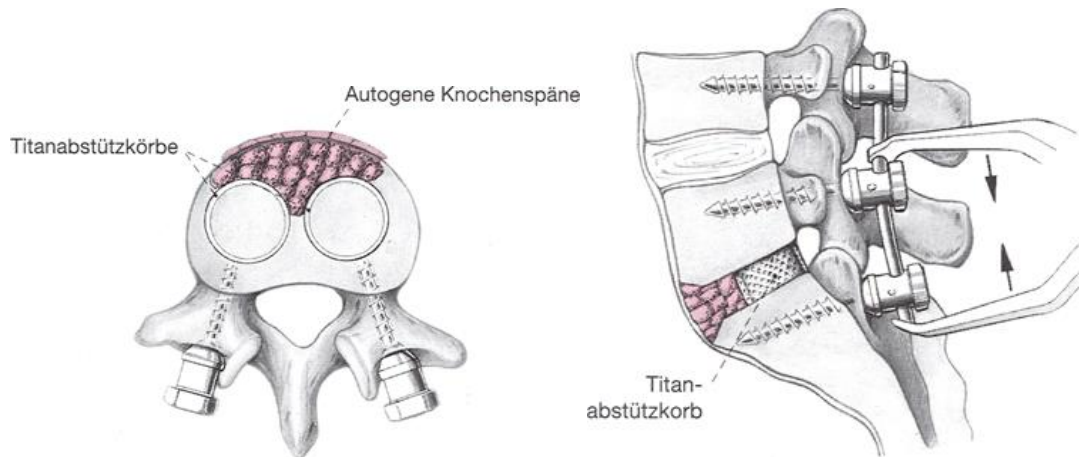


Abb.23+24: Lage des Cages, horizontale und sagittale Ansicht (übernommen aus [59], Abb.19b +20, S.98)

Die einzelnen Operationsschritte können während der OP mittels Bildwandler überprüft werden.



Abb.25 : Lage der Pedikelschrauben und des Cages im sagittalen und horizontalen Schnitt im CT nach einer TLIF-Operation (übernommen aus eigenem Fundus)

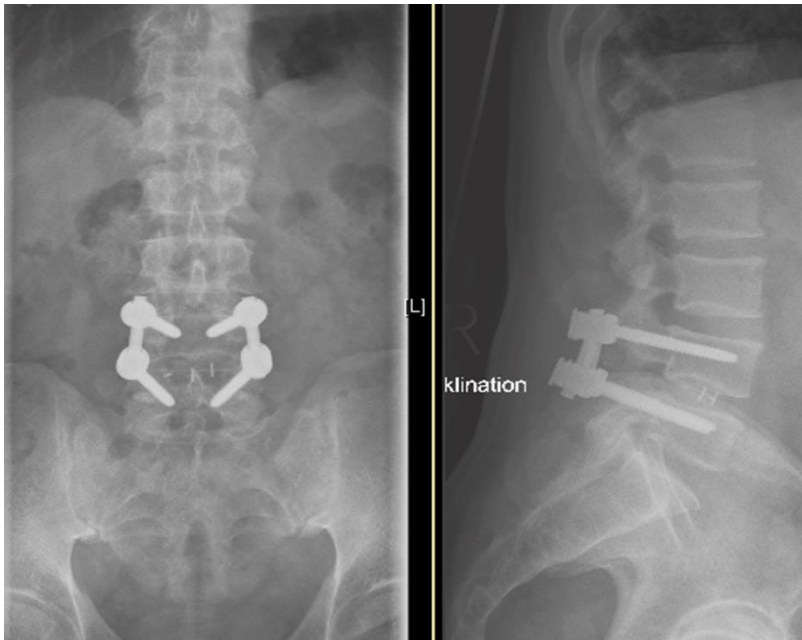


Abb.26: Röntgenbild der LWS a.p. und Inklinationsaufnahme, Lage der Pedikelschrauben und des Cages (übernommen aus eigenem Fundus)

Ziel der operativen Versorgung ist neben der Schmerzreduktion durch Erlangung einer Fusion u.a. die anatomische Reposition einer Spondylolisthese durch die Wiederherstellung des Alignments und der Wirbelsäulenstabilität. Ferner ist das Beheben eventuell aufgetretener neurologischer Defizite, die durch zentrale oder laterale Spinalkanaleinengungen hervorgerufen wurden, möglich [30].

Die Vorteile dieser Operationstechnik liegen in einer effektiven Schmerzreduktion, einer niedrigen Komplikationsrate und einer Fusionsrate zwischen 88-95% (je nach Zugangsweg) [60,64,65]. Das Trauma ist im Vergleich zu den anderen Fusionstechniken relativ gering, da keine Laminektomie erfolgen muss und nur eine einseitige Resektion des Gelenkfortsatzes notwendig ist. Durch die Schonung der Laminae und der interspinösen Bänder werden Strukturen geschont, die für die Stabilität des Segmentes wichtig sind [59].

Komplikationen dieser Operationstechnik können in Form von Pseudoarthrosenbildungen, epiduralen Blutungen, Gefäßverletzungen, Durazerreißen, Nervenschädigungen, epi- und perineurale Narbenbildung, Implantatlockerungen und -brüchen auftreten. Des Weiteren werden Implantatfehlagen und -migration sowie Infektionen beschrieben. [66,67]. Bei einer Studie mit einem Beobachtungszeitraum von 11 Jahren, mussten sich 19 % der Patienten mit einer dorsalen Stabilisierung einer weiteren Operation auf Grund von den oben genannten Komplikationen unterziehen [68].

Bei hochgradigen Spinalkanalstenosen profitierten 80% der Patienten bereits von einer alleinigen Dekompression. Noch bessere Ergebnisse wurden allerdings erzielt, wenn zusätzlich eine Fusionsoperation durchgeführt wurde. Langzeitstudien bei Patienten, deren Spinalkanalstenose chirurgisch versorgt wurde, ergaben bei 50-79% gute bis sehr gute Ergebnisse [24].

Die Entwicklung zu minimal-invasiven Operationsmethoden war auch in der Wirbelsäulenchirurgie gegeben. Der Weichteilschaden sowie der Blutverlust werden bei diesen Operationen im Gegensatz zu den offenen chirurgischen Verfahren gesenkt. Dies führt zu kürzeren Liegezeiten der Patienten im Krankenhaus durch ein postoperativ vermindertes Schmerzniveau und somit zu einer schnelleren Mobilisierung und Integration der Patienten ins Alltagsleben [67].

Es besteht daher die Möglichkeit, Fusionsoperationen durch minimal-invasive Chirurgieverfahren (MIS) durchzuführen. Wie bei den offenen Stabilisierungen wurde 1993 zuerst die MIS-ALIF, gefolgt von der MIS-PLIF (2002) und letztendlich 2006 die MIS-TLIF vorgestellt. Vorteile gegenüber der offenen Operationstechnik liegen wie bereits weiter oben erwähnt in einer Reduktion des Blutverlustes, des Narkosemittelverbrauches, der Gewebe- und Muskelschädigung (der M. sakrospinalis weist signifikant geringere Schädigungen im MRT und bei elektrophysiologischen Untersuchungen bei der minimal-invasiven TLIF auf) sowie der Krankenhausverweildauer der Patienten. Allerdings wurde ein erhöhtes Risiko für Nervenschädigungen im Gegensatz zur offenen Variante beobachtet, da die Sicht ins Operationsfeld eingeschränkt ist und damit die Darstellung der anatomischen Landmarken erschwert wird [66]. Eine andere Studie zeigt zudem, dass das klinische Outcome der Patienten im Vergleich von konventionellen zu minimalinvasiven Operationstechniken gleich ist [69].

Nachdem in den letzten Jahren und Jahrzehnten die Kenntnis über die Biomechanik und Funktion der Wirbelsäule zugenommen hat, wurde die Entwicklung von dynamischen Implantaten weiter vorangetrieben. Weitere Aspekte auf der Suche nach neuen Entwicklungen in der Wirbelsäulenchirurgie sind die Dysbalance zwischen den radiologisch erhobenen Befunden und dem klinischen Outcome der Patienten sowie die zunehmende Unzufriedenheit mit den Fusionsresultaten in Bezug auf die bereits erwähnte Anschlussdegeneration von benachbarten Segmenten. Es ist vom Knie- und Hüftgelenk bekannt, dass die Versteifung eines Gelenkes zu Komplikationen in den benachbarten Gelenken führt. Dies hat dazu geführt, dass man auch in der Wirbelsäule nach einer Operation möglichst physiologische Verhältnisse schaffen möchte [70].

Zu den bewegungserhaltenden (non-fusion) Eingriffen zählen Bandscheibenprothesen, interspinöse Spreizer, Facettengelenkersatzsysteme und dynamische Stabilisierungsoperationen.

Bei den dynamischen Stabilisierungsverfahren werden Pedikelschrauben mit einer beweglichen Verbindung implantiert. Bessere Resultate, als sie bislang für Fusionen im Falle fortgeschrittener Fusionen berichtet wurden, sind bislang nicht dokumentiert.

3 Material und Methoden

3.1 Studienaufbau

In die folgende Studie wurden Patienten eingeschlossen, die eine Indikation zur lumbalen Fusions-Operation hatten.

Die Indikationsstellung erfolgte während der Wirbelsäulensprechstunde in der Poliklinik der Charité, Campus Virchow Klinikum. Neben einer umfassenden Anamnese und klinischen Untersuchung wurden dort auch alle weiteren OP-Vorbereitungen getroffen.

Es wurden 3 Messungen zur dynamischen Messung der Rückenform mit dem Epionics SPINE durchgeführt. Dieses System stellt eine objektive, non-invasive und strahlungsfreie Methode zur Erfassung der segmentalen Wirbelsäulenbeweglichkeit dar. Diese dynamischen Bewegungsübungen wurden zu den Zeitpunkten prä-, sowie 4 und 8 Wochen postoperativ durchgeführt. Dabei wurden die Patienten gebeten jeweils 5 Flexions- und 5 Extensionsbewegungen durchzuführen.

Zu den Messzeitpunkten wurden den Patienten Fragebögen ausgehändigt, in denen ihre persönliche Schmerzsituation und Beschwerden / funktionellen Einschränkungen evaluiert wurden. Wir verwendeten die Fragebögen Oswestry-Disability-Index (ODI), den Short Form Health Survey (SF-36) und den Roland-Morris Fragebogen (RMQ).

Auf der Visuellen-Analog-Scala (VAS) wurde zusätzlich die Schmerzintensität zum Zeitpunkt der Bewegungsübungen festgehalten.

Anhand von MRT- und CT-Bildern wurden einmalig vor der Operation die nachstehenden radiologischen Befunde erhoben: Fujiwara-, Pathria-, Modic- und Meyerding Klassifikation. Aufgrund der Kürze des Nachuntersuchungszeitraumes und unter der Annahme, dass sichtbare Veränderungen bei den Befunden nicht zu erwarten seien, wurde auf eine postoperative MRT- bzw. CT-Diagnostik verzichtet.

Anhand von Röntgenbildern wurden die Winkel für Lumbar Tilt, Sakral Tilt, lumbale Lordose und sakrale Inklination ausgemessen. Dies erfolgte manuell sowohl prä- als auch postoperativ.

Im folgenden Teil werden die einzelnen Scores noch ausführlicher dargestellt.

Mit Hilfe eines Computerprogramms wurden im MRT oder CT Messungen für die Umfänge der Rückenmuskulatur und des M. iliopsoas auf Höhe des pathologischen Segments durchgeführt.

Auch der Verfettungsgrad der autochtonen Rückenmuskulatur wurde ermittelt. Diese Werte wurden jeweils einmalig vor der Operation erhoben.

Einschlusskriterien der Studie

In dieser Studie wurden Patienten mit folgenden Kriterien berücksichtigt bzw. eingeschlossen:

- Alter der Patienten: > 18 Jahre
- Erfolgreiche > 6 Monate dauernde konservative Therapie
- Fortgeschrittene degenerative Wirbelsäulenerkrankung: höhergradige Facettengelenksarthrose oder Osteochondrose, degenerative Spondylolisthese, Spinalkanalstenose
- Erkrankung ausschließlich im LWS-Segment klinisch relevant
- Geplante mono- oder bisegmentale Spondylodese; Technik: Transforaminale lumbale interkorporelle Fusion (TLIF)
- Offener operativer Zugang von dorsal, Mittellinie

Ausschlusskriterien der Studie

Zu den Ausschlusskriterien der Studie zählen folgende:

- nicht-mobilisierbarer Patient
- maligne Grunderkrankungen
- schwere Grunderkrankungen, die eine Kontraindikation zur Operation darstellen
- entzündliche und traumatische Wirbelsäulenerkrankungen
- langstreckige dorsale Stabilisierungen der LWS (> 2 Segmente)
- degenerative Wirbelsäulenerkrankungen außerhalb der LWS
- Dermatologische Erkrankung auf Höhe des zu operierenden LWS-Abschnittes

3.2 Body-Mass-Index

Der Body-Mass-Index (BMI) dient zur Einschätzung des Körpergewichts und errechnet sich mit folgender Formel: Körpergewicht in kg ÷ Körpergröße in m². Sowohl das Alter und Geschlecht der jeweiligen Person, als auch der Muskel- und Fettanteil werden nicht berücksichtigt. In der nachstehenden Tabelle sind die einzelnen Kategorien dargestellt [71].

Kategorie	BMI
Starkes Untergewicht	$\leq 16,0$
Mäßiges Untergewicht	16,0 – 17,0
Leichtes Untergewicht	17,0 – 18,5
Normalgewicht	18,5 – 25,0
Präadipositas	25,0 – 30,0
Adipositas Grad I	30,0 – 35,0
Adipositas Grad II	35,0 – 40,0
Adipositas Grad III	$\geq 40,0$

Tabelle 5: Klassifikation des BMI (übernommen aus [71], S.39)

3.3 Fragebögen zum klinischen Outcome

3.3.1 Evaluation der Schmerzsituation mit Visueller Analog Skala (VAS)

Um die Schmerzsituation der Patienten möglichst einfach und schnell darstellen zu können, verwendeten wir die Visuelle Analog Skala. Die Patienten mussten auf einer Linie ihre subjektive gefühlte Schmerzintensität zum Zeitpunkt der Bewegungsmessungen markieren. An einem Ende der Skala stand „kein Schmerz, am Anderen „ am stärksten vorstellbarer Schmerz“. Wir teilten die Skala dann im Nachhinein in 10 gleichgroße Abschnitte ein. 0 bedeutet gar keine Schmerzen, die 10 steht für den am Stärksten vorstellbaren Schmerz. Es ist ein sehr häufig angewandtes Verfahren um einen schnellen Überblick über die derzeitige Schmerzsituation eines Patienten zu erhalten [50].

3.3.2 Oswestry-Disability-Index

Der Fragebogen des Oswestry-Disability-Index (ODI) wurde 1980 erstmals in der Literatur vorgestellt und ist ein in vielen Sprachen und häufig verwendeter Fragebogen für das funktionelle Outcome von Patienten mit Rückenschmerzen [72]. Veränderungen im Befinden können mit diesem Fragebogen sehr gut aufgezeigt werden und eine ausgesprochen gute Reliabilität ist gegeben [73]. Der ODI korreliert mit dem SF-36 und dem Roland-Morris Fragebogen (beide Fragebögen werden im weiteren Verlauf noch ausführlich erklärt). Während der ODI besser für Patienten mit starken, lang andauernden Beschwerden geeignet ist, sollte der Roland-Morris-Fragebogen bei Patienten mit relativ geringen Einschränkungen angewandt werden [74].

Der ODI-Fragebogen ist in 10 Themengebiete untergliedert, die die Schmerzsituation des Patienten bei alltäglichen Lebenssituationen betreffen. Pro Thema sind jeweils 6 Antwortmöglichkeiten vorgegeben. Mit zunehmender Einschränkung werden die Antworten mit einem Punktwert von 0 bis 5 bewertet, wobei niedrigere Werte geringere Einschränkungen und höhere Werte größere Einschränkungen darstellen (0 bedeutet z.B. keine Schmerzen, diese steigern sich in ihrer Intensität in verschiedenen Abstufungen bis 5). Die Höchstpunktzahl ist demnach 50. Wurden Fragen nicht beantwortet, so verringert sich die maximal zu erreichende Punktzahl pro ausgelassener Frage jeweils um 5 Punkte. Bei mehr als einer angekreuzten Antwort pro Frage, wird die höhere Punktzahl gewertet. Bei der Auswertung wird die erreichte Punktzahl, die durch Addition der einzelnen Werte der Themengebiete errechnet wird, durch die Gesamtpunktzahl dividiert. Man erhält einen Zahlenwert, der mit 100 multipliziert eine Prozentzahl ergibt. Dies ist der Endwert [74].

Niedrige Prozentzahlen stehen für eine geringere, höhere für eine größere Einschränkung.

Scores unter 20% stehen daher für minimale funktionale Einschränkungen, 20-40% für mittelmäßige Einschränkungen, 40-60% für starke Einschränkungen, 60-80% für eine Behinderung und 80-100% für schwere Behinderungen [72].

3.3.3 Evaluation des Gesundheitszustandes: Short Form Health Survey (SF-36)

Wir haben in unserer Studie den 1996 veröffentlichten SF-36 2.0 verwendet. Der SF-36 Fragebogen wird verwendet um herauszufinden, inwiefern die Lebensqualität der Patienten aus ihrer Sicht durch ihre Krankheit beeinträchtigt wird. Es ist kein spezieller Fragebogen für Patienten mit Rückenschmerzen, seine Anwendung umfasst ein breites Spektrum von Krankheiten. Er ist für Personen ab 14 Jahren konzipiert [75].

Da dieser Fragebogen sehr sensitiv gegenüber Änderungen ist, eignet er sich gut um Veränderungen im Befinden der Patienten nach Therapien oder Operation anzuzeigen. Eine Vielzahl von Studien hat die Reliabilität des Fragebogens bestätigt. Zudem ist der Fragebogen auch in Bezug auf seine Länge und seine Reagibilität (individuell unterschiedliche Reaktionsfähigkeit bei Einwirkung von Reizen) sehr gut geeignet. Eine häufige Anwendung des Fragebogens bei Patienten mit Rückenschmerzen ist gegeben [76].

Der SF-36 ist in 36 Punkte aufgeteilt, die zu acht Themengebieten zugeordnet werden können.

Diese 8 Gruppen können wiederum zu 2 Obergruppen zusammengefasst werden. Die Kategorien „Körperliche Funktionalität“, „körperliche Verfassung“, „körperlicher Schmerz“ und „allgemeine Gesundheit“ können unter den Begriff „Physische Gesundheit“ zusammengefasst werden und spiegeln bei der Auswertung den PCS-Wert wider. Die Gruppe der „Mentalen

Gesundheit“ (MCS-Wert in der Auswertung) bilden „Lebensfreude / Vitalität“, „mentale Verfassung“, „soziale Stellung“ und „psychisches Wohlbefinden“ [77].

Bei den Aussagen und Antwortmöglichkeiten gibt es verschiedene Variablen. Von Fragen, die mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden können, kommen auch bis 6-stufige Antwortmöglichkeiten vor, die die Patienten je nach empfundener Belastung auswählen können. Die Auswertung der SF-36 Fragebögen erfolgt mit Hilfe einer Software, die sowohl einen Wert für jede Untergruppe als auch für die beiden Hauptgruppen errechnet. Dabei werden die einzelnen Skalen ausgewertet und einer speziellen Gewichtung unterzogen [75].

Es gibt 2 Möglichkeiten für die Errechnung des erreichten Scores beim SF-36.

Die Ergebnisse werden bei der einen Möglichkeit in Zahlen auf einer Scala von 0 bis 100 angegeben. 100 ist die Höchstpunktzahl, 0 die niedrigste zu erreichende Punktzahl. Je höher der Wert, desto besser ist die physische bzw. mentale Verfassung des Patienten [77,78].

Eine weitere Möglichkeit, die Ergebnisse des Fragebogens auszuwerten, besteht in der Nutzung des sogenannten Norm-Based-Score (NBS). Dieser NBS ermöglicht einen Vergleich zwischen den erzielten Ergebnissen und den Resultaten anderer Studien. Allerdings können die Resultate auch mit den anderen Fragebögen der SF-Familie (z.B. SF-12) verglichen werden. Der Durchschnittswert in der Bevölkerung für jede der acht Untergruppen und die beiden Obergruppen wurde auf 50 festgelegt, die Standardabweichung ist immer 10. Daraus ergibt sich, dass immer wenn der persönliche Score eines Patienten unter 45 liegt oder der Durchschnittswert einer untersuchten Gruppe unter 47 ist, ein reduzierter Gesundheitszustand zur Allgemeinbevölkerung vorliegt. Der NBS ermöglicht somit eine schnelle und einfache Interpretation der Untersuchungsergebnisse [78].

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, darf die NBS nicht mit der 0-100 Skala vermischt werden.

3.3.4 Roland-Morris Disability Questionnaire

Der Roland-Morris-Disability-Questionnaire (RMQ) bezieht sich speziell auf physische Beschwerden von Rückenschmerz-Patienten [79]. Lediglich eine Frage bezieht sich auf die psychische Situation. Er enthält 24 Aussagen zu Situationen des täglichen Lebens. Es sollen die Aussagen mit einem Kreuz versehen werden, die die persönliche Situation der Patienten an dem Tag beschreiben, an dem sie den Fragebogen ausfüllen. In jedem Satz ist die Aussage „wegen meiner Rückenschmerzen“ eingefügt worden um hervorzuheben, dass keine anderen Beschwerden berücksichtigt werden sollen.

Bei der Auswertung des Fragebogens werden alle markierten Aussagen zusammengezählt. Alle Aussagen haben den gleichen Stellenwert, es gibt daher einen Punkt pro markierte Aussage. Somit ergibt sich eine Ergebnisbreite zwischen 0 und 24 Punkten, wobei 0 für keine Beschwerden steht und 24 für maximale Beschwerden steht [74].

Die Test-Retest Reliabilität wird als sehr gut beschrieben, was Änderungen der Befindlichkeit von Rückenschmerzpatienten gut messbar macht. Zudem werden Veränderungen der Patientenbefindlichkeit sensitiv erfasst. Alter und Geschlecht der ausfüllenden Person haben keinen Einfluss auf den Score [74].

3.4 Radiologische Scores

3.4.1 Fujiwara Klassifikation

Die Fujiwara Klassifikation dient der Einteilung der Facettengelenksarthrose im MRT [80].

Genau wie die Bandscheibendegeneration korreliert die Facettengelenksarthrose mit dem Alter der Patienten und erlaubt Rückschlüsse auf die Stabilität des Wirbelsäulensegmentes [81]. Facettengelenksarthrose wird immer im Zusammenhang mit Bandscheibendegenerationen beobachtet, wohingegen Degenerationen der Bandscheibe auch ohne Arthrose der Facettengelenke vorkommen können.

Einteilung	Definition	Charakteristika
Typ 1	normales Gelenk	
Typ 2	geringe Arthrose	Gelenkspaltverschmälerung, kleine Osteophyten
Typ 3	mäßige Arthrose	Gelenkspaltverschmälerung, Sklerose, mäßige Osteophyten
Typ 4	schwere Arthrose	Gelenkspaltverschmälerung, Sklerose, große Osteophyten

Tabelle 6: Fujiwara Klassifikation [80]

3.4.2 Pathria Klassifikation

Diese Klassifikation dient zur Beurteilung der Facettengelenksarthrose im CT [82].

Die 4-stufige Skala von Pathria ist das Standardverfahren für die Stadieneinteilung der Facettengelenksarthrose. Die Reliabilität für die CT-Beurteilung und Einteilung in die 3 Grade stimmte zwischen zwei unabhängigen Radiologen bei der Studie von Pathria et al. zu 63% exakt überein. Ein CT ist für die Beurteilung dieser Thematik besser geeignet als ein MRT, da der Kontrast zwischen dem Knochen und den umliegenden Weichteilen höher ist.

Die Pathria und Fujiwara Klassifikationen können als Indikator verwendet werden, wie stark die degenerativen Veränderungen an der Wirbelsäule eines Patienten fortgeschritten sind.

Einteilung	Definition	Charakteristika
Grad 0	normales Gelenk	
Grad 1	Geringe Arthrose	Gelenkspaltverschmälerung
Grad 2	mäßige Arthrose	Gelenkspaltverschmälerung, Sklerose oder Gelenkvergrößerung
Grad 3	schwere Arthrose	Gelenkspaltverschmälerung, Sklerose und Osteophyten

Tabelle 7 : Pathria Klassifikation [82]

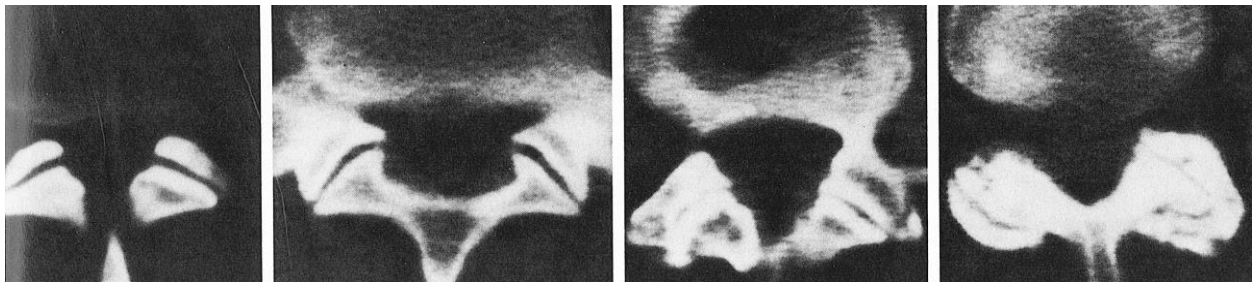


Abb.27: Grade der Pathria Klassifikation, von links nach rechts: Grad 0, Grad 1, Grad 2 und Grad 3 (übernommen aus [82], Abb.2a-d, S.229)

3.4.3 Modic Klassifikation

Zur Beurteilung der endplattennahen Knochenstrukturen von Wirbelkörpern anhand von MRT-Bildern wird die Modic Klassifikation genutzt [48,83]. Die Klassifikation ist in 3 Typen eingeteilt, wobei die gefundenen degenerativen Veränderungen an der Wirbelsäule mit jedem Typ stetig zunehmen. Je nachdem, in welcher Wichtung das vorliegende MRT dargestellt ist, ergeben sich unterschiedliche organische Korrelate. Eine Abbildung hierzu ist weiter unten zu finden (Abb.28). Typ I zeigt Risse in den knorpeligen Endplatten mit einer gesteigerten Durchblutung auf. Bei Typ II wird eine fettige Degeneration des Markraums aufgrund einer Ischämie beobachtet und Typ III ist mit einer subchondralen Sklerose assoziiert. Anhand dieser Einteilung kann eine Instabilität des betrachteten Segments festgestellt werden [84].

Einteilung	Definition	MRT Signalintensität
Typ I	entzündliche Veränderungen	hypointens in T1, hyperintens in T2
Typ II	fettige Degeneration	hyperintens in T1, iso- oder leicht hyperintens in T2
Typ III	Sklerose	hypointens in T1, hypointens in T2

Tabelle 8: Modic Klassifikation [83]



Abb.28: Modic Klassifikation im MRT: von links nach rechts Typ I, Typ II und Typ III; A =T1-Wichtung, B = T2-Wichtung (übernommen aus [85], Abb.1-3, S.1292-1293)

3.4.4 Meyerding Klassifikation

Die Meyerding Klassifikation steht zur Einteilung der Spondylolisthese am seitlichen Röntgenbild im Stand zur Verfügung. Reklinations- und Inklinationsaufnahmen können durch die veränderte Belastung der Wirbelsäule Instabilitäten aufdecken, die im Stand nicht zum Vorschein getreten waren [86].

Degenerativ entstandene Spondylolisthesen führen meist zu einem Wirbelgleiten bis 30%, also bis Grad 2 [87].

Grad	Winkel
Grad 0	0 (normal)
Grad 1	0 % - 25 %
Grad 2	26 % - 50 %
Grad 3	51% - 75%
Grad 4	76% - 100%

Tabelle 9: Meyerding Klassifikation

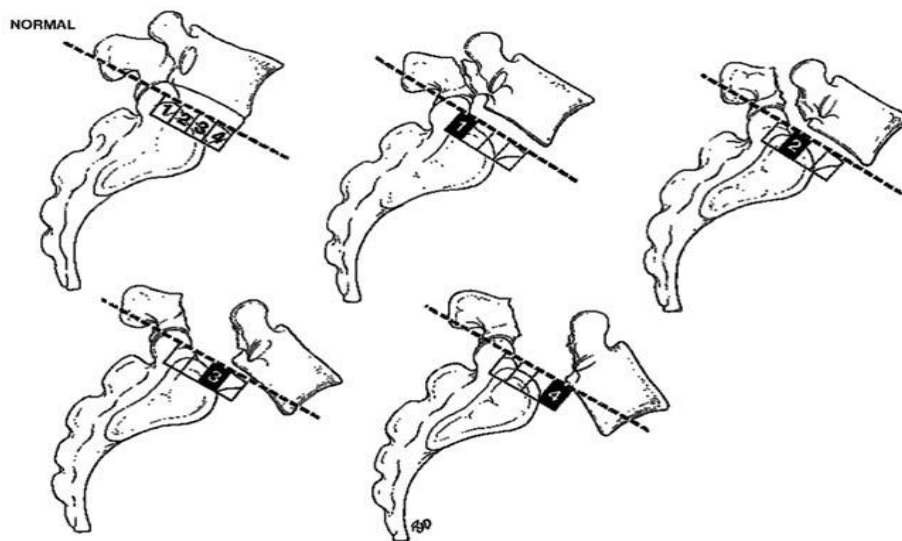


Abb.29: Einteilung des Spondylolisthesegrades nach Meyerding (übernommen aus [48], Abb.10, S.349)

3.4.5 Sakral Tilt

Beim Sakral Tilt wird die Kippung des Sakrums gemessen. Dies erfolgt am seitlichen Röntgenbild des stehenden Patienten. Es wird die Deckplatten-Linie von S1 eingezeichnet und eine dazu senkrechte Bezugslinie. Eine horizontale Linie wird im 90°-Winkel zur Senkrechten eingetragen. Beim Schnittpunkt der Horizontalen und der Deckplatten-Linie von S1 entsteht ein Winkel. Dies ist der Wert für den Sakral Tilt [7].

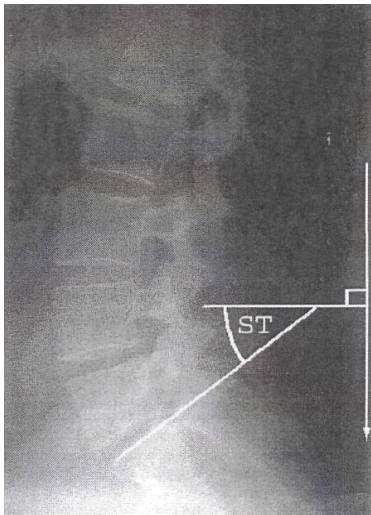


Abb.30: Sakral Tilt (übernommen aus [7], Abb.6, S.1697)

3.4.6 Sakrale Inklinat

Die sakrale Inklinat

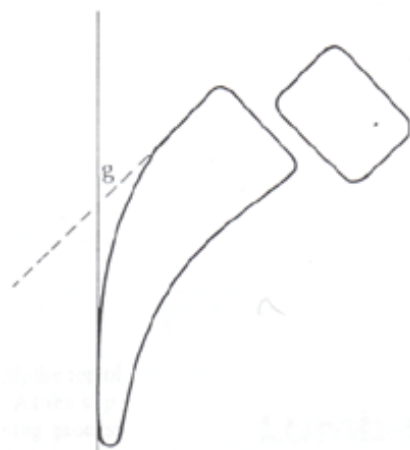


Abb.31: Sakrale Inklinat

3.4.7 Lumbar Tilt

Für diese Messung wird ein seitliches Röntgenbild verwendet, bei dessen Aufnahme der Patient aufrecht steht. Der Lumbar Tilt zeigt an, in welchem Ausmaß die Lendenwirbelsäule gekippt ist. Es werden jeweils die Deckplatten-Linie von den Wirbelkörpern L1 und S1 eingezeichnet und deren Schnittpunkt ermittelt, dieser ergibt einen Winkel. Dann wird dazu die Winkelhalbierende eingezeichnet. An dem Punkt, wo sich die Winkelhalbierende mit einer Senkrechten schneidet, entsteht der Lumbar Tilt-Winkel (siehe Abb. 32) [7].

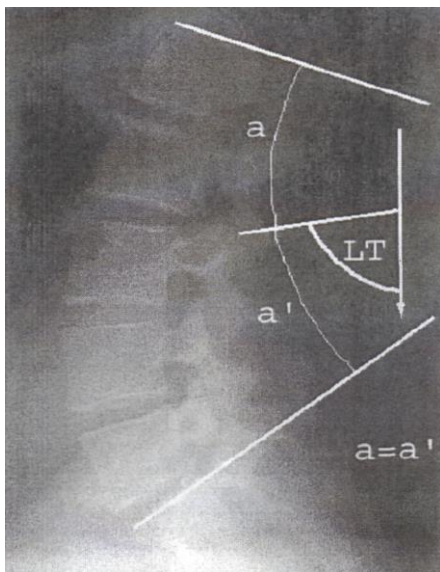


Abb.32: Lumbar Tilt (übernommen aus [7], Abb.5, S.1697)

3.4.8 Lumbaler Lordosewinkel

Ein laterales Röntgenbild am stehenden Patienten wird für die Messung des lumbalen Lordosewinkels benötigt. Im Liegen wäre die Wirbelsäule besonders in den oberen drei lumbalen Segmenten gerader und würde daher verfälschte Ergebnisse liefern [88]. Es besteht allerdings eine große Streuung der Wert bei gesunden Individuen. Die Werte liegen einer Studie zufolge zwischen 26-76° [89], einer weiteren Studie zwischen 38-84° [19]. Mit zunehmenden Alter ist ein Rückgang des Lordose-Winkels zu erkennen [19].

Wie nachstehend in der Abb.33 gezeigt, werden für die Messung des lumbalen Lordosewinkels die Deckplatten-Linien des ersten und fünften Lendenwirbels eingezeichnet. Die jeweils Senkrechten zu diesen beiden Linien schneiden sich in einem Punkt und ergeben den Winkel, der die lumbale Lordose darstellt. Der lumbale Lordosewinkel kann als Verlaufparameter bei Spondylolisthesen verwendet werden [88].

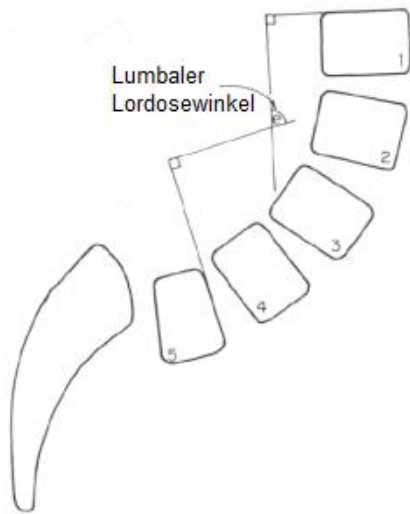


Abb.33: Lumbale Lordose (übernommen aus [88], Abb.6, S.770)

3.5 Muskelumfang und Muskelverfettung

Die Untersuchungen zum Muskelumfang und zur Muskelverfettung wurden im MRT in der T2-Wichtung durchgeführt, da mit dieser Technik die Weichteile sehr gut beurteilt werden können. Stand kein MRT zur Verfügung, wurde anhand eines CT lediglich der Muskelumfang gemessen. Die Messungen wurden präoperativ erhoben. Das Untersuchungsgebiet liegt auf Höhe des operierten Segmentes.

Die Messung des Muskelumfangs erfolgte durch manuelles Einzeichnen der Grenzlinie des M. erector spinae vom umliegenden Gewebe. Der M. psoas wurde ebenfalls auf der gleichen Ebene von Hand vermessen und dient als relative Bezugsgröße, da somit ein Quotient für die Vergleichbarkeit unter den Patienten errechnet werden konnte.

Die Muskelverfettung wurde mit Hilfe von Dichtemessungen erfasst. Beim M. erector spinae wurden jeweils sechs Stichproben (A-F), beim M. psoas zwei Proben (G-H) genommen.

Die Proben wurden einheitlich mit Kreisen der Größe 25 mm² durchgeführt. Der M. psoas wurde als Vergleichsmuskel genutzt, weil degenerative Veränderung hier erst sehr spät auftreten.

Der Grad der Muskelverfettung wurde in 4 Kategorien eingeteilt. Grad 1 bedeutete wenig Verfettung (0-25%), Grad 2 steht für mittlere (25-50%), Grad 3 für hohe (50-75%) und Grad 4 für sehr hohe (größer als 75%) degenerative Muskelverfettung.

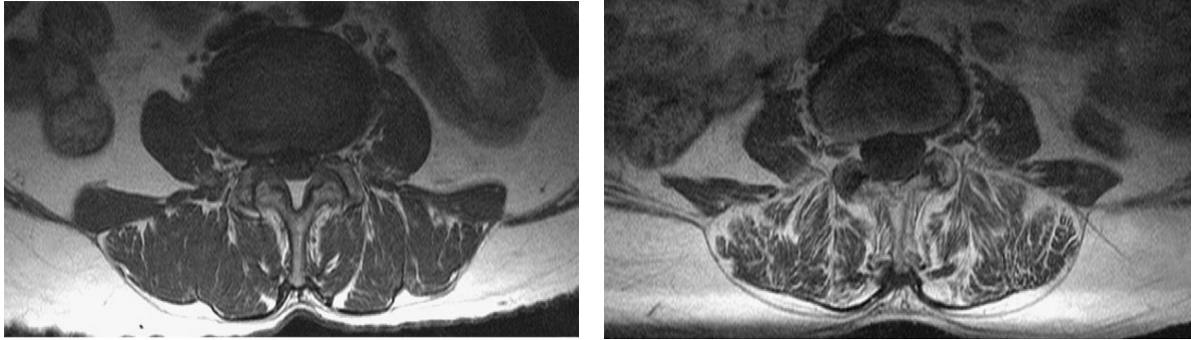


Abb.34 und 35: Axiale MRT-Schichten der LWS (übernommen aus [90], Abb 2a+b, S.319)

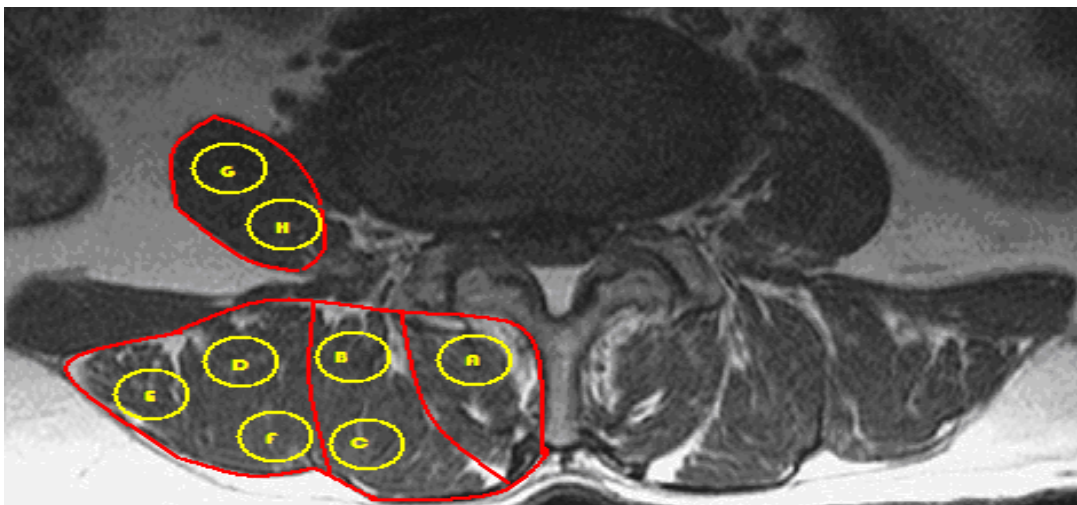


Abb.36: Quadranten-Einteilung der Dichtemessung des M. erector spinea (übernommen aus eigenem Fundus)

3.6 Beweglichkeitsmessungen mit Epionics SPINE

Das Epionics SPINE ist ein Messgerät zur kontinuierlichen, funktionellen Erfassung der Wirbelsäulenbeweglichkeit im Bereich der LWS. Diese non-invasive Methode bietet eine hohe Ort- und Zeitauflösung. In der Studie von Taylor et al. wurde gezeigt, dass mit dieser Messmethode reproduzierbare und untereinander vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können. Diese Ergebnisse wurde im Vergleich mit dem Vicon-System erhoben [9].

Zu den Komponenten des Epionics SPINE gehören folgende:

1. Sensorband
2. Speichereinheit
3. SD-Karte mit USB-Kartenleser
4. PC / Software
5. Befestigungspflaster

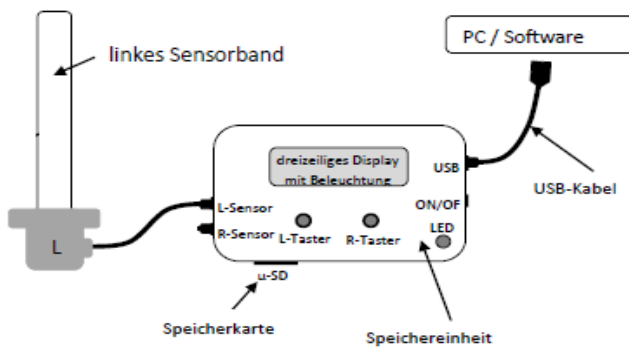


Abb.37: Messeinheit Epionics SPINE
(übernommen aus [91], Abb.1)

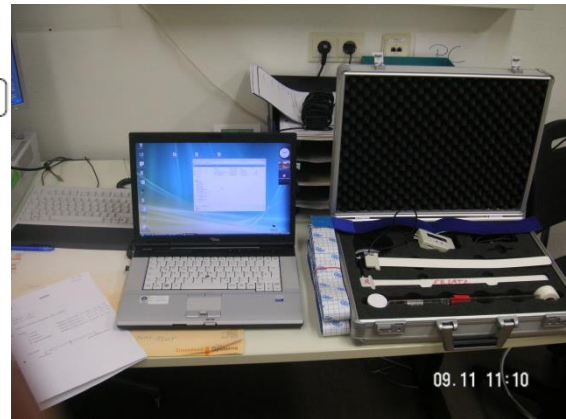


Abb.38: Photo Messequipment
(übernommen aus eigenem Fundus)

Die Sensorelektronik wandelt die Bewegung des Rückens mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) in elektrisch erfassbare Werte um, welche verstärkt und digitalisiert werden. Ein integrierter Lagesensor erfasst die Lage des Sensorbandes in Bezug auf die Erdgravitation. Alle Messdaten werden über eine 4-polige Kabelverbindung zur Speichereinheit übertragen. Als Grundmaterial des Sensorbandes wird eine Elektronikleiterplatte verwendet. Sie setzt sich aus einem 1,5 mm dicken, unflexiblen Bereich und einem 0,5 mm dicken, flexiblen Bereich zusammen. Auf dem unflexiblen Abschnitt ist die Sensorelektronik befestigt, auf dem flexiblen Anteil sind die DMS verklebt. Die jeweils 7 paarigen DMS sind an der Ober- und Unterseite deckungsgleich angebracht. Ihre Länge beträgt 50 mm, so dass eine Gesamtlänge von 35 cm pro Sensorband resultiert.

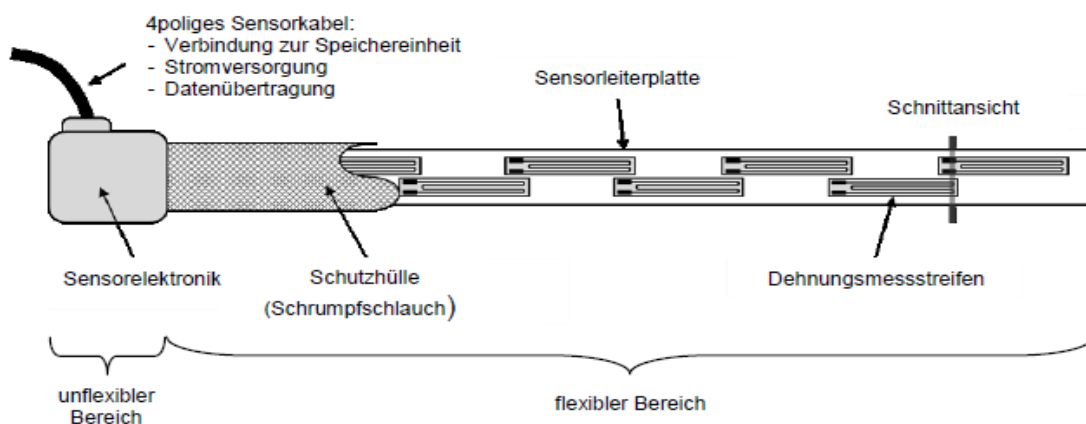


Abb.39: Messsensoraufbau (übernommen aus Archiv von Epionics SPINE)

Die technischen Daten des Sensorbandes werden in der nachstehenden Tabelle 10 dokumentiert.

	Min	Norm	Max	Einheit
Maße (BxHxT) (biegesensitiver Bereich)		25x1,8x375		mm
Maße (BxHxT) (Elektronikgehäuse)		48,5x7,2x28,5		mm
Versorgungsspannung		3,3		V
Stromverbrauch	8	10	15	mA
DMS - Länge		50		mm
DMS - Anzahl		2 x 7		---
R_{DMS}		120		Ω
Betriebstemperatur	10	36	45	$^{\circ}\text{C}$
Messbereich (Winkel α)	-12		+12	$^{\circ}$
Messauflösung		<1		$^{\circ}$
Kabellänge		0,5		m

Tabelle 10: Technische Daten des Sensorbandes (übernommen aus Archiv von Epionics SPINE)

Die Speichereinheit mit den Maßen 50mm x 85mm x 25mm ist die Hauptkomponente des Epionics SPINE und in der unten abgebildeten Grafik dargestellt (Abb.40). Sie beinhaltet die Spannungsversorgung (Akku), steuert die Messabläufe und übermittelt diese über Bluetooth an einen Computer. Zudem können die Messdaten, die mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst werden, auf einer Speicherkarte abgelegt werden.

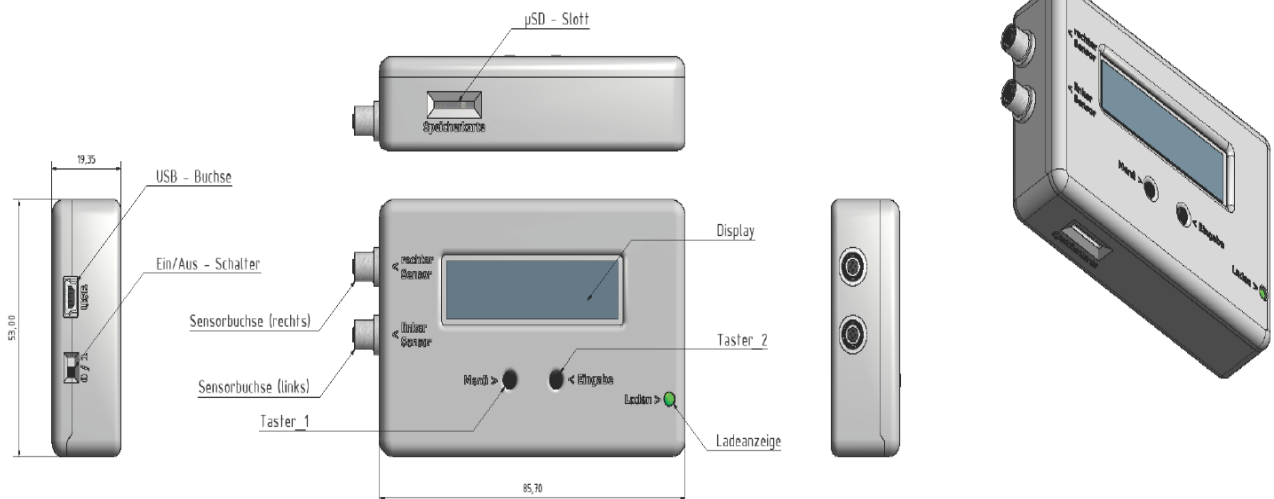


Abb.40: Speichereinheit in verschiedenen Blickwinkeln als 3D-Darstellung (übernommen aus Archiv von Epionics SPINE)

Die Elektronik der Speichereinheit ist wie folgt aufgebaut:

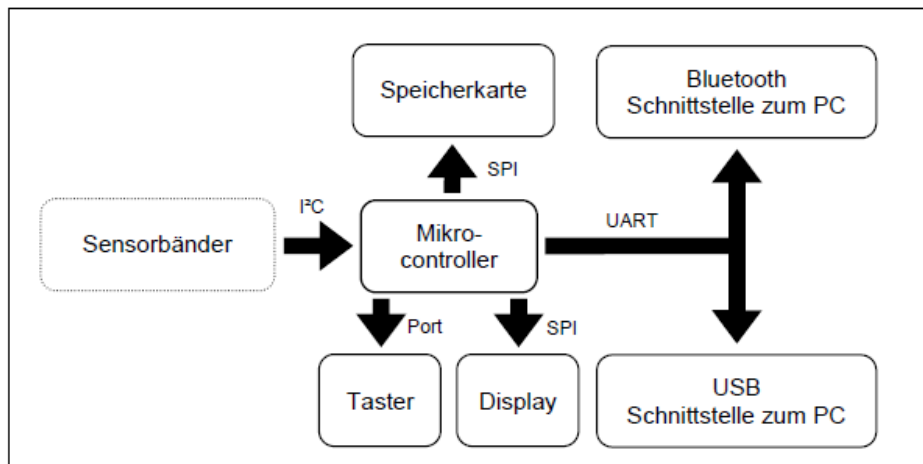


Abb.41: Elektronik der Speichereinheit Schematische Darstellung (übernommen aus Archiv von Epionics SPINE)

Der Mikrocontroller steuert die Anzeige- und Bedienelemente, die Speicherung der Messdaten und die Kommunikation mit der Anwendersoftware und dem Sensorband. Eingaben können über den Taster getätigt werden. Die Datenübertragung der Messungen zum PC erfolgt wahlweise über eine Bluetooth- oder USB-Verbindung. Das komplette System wird von einem 3,7 V Lithium-Polymer-Akkumulator mit einer Kapazität von 1500 mAh versorgt. Dadurch wird ein Betrieb von mindestens 24 Std. gewährleistet und der Akkuladestatus kann im Display nachvollzogen werden. Geladen wird der Akku mit max. 500 mA über eine Mini-USB-Buchse. Ein Spannungsmonitor mit Schalttransistor schützt den Akku vor Tiefentladung. Ab einer Spannung von ca. 3,3 V trennt der Spannungsmonitor über den Schalttransistor die Elektronik vom Akku ab und beugt so irreparable Schäden und Datenverlust vor. Tabelle 11 zeigt die technischen Daten der Speichereinheit im Überblick.

	Min	Norm	Max	Einheit
Maße (BxHxT)		53x20x86		mm
Versorgungsspannung	3,4	3,7	6,0	V
Akkukapazität		1500		mAh
Stromaufnahme mit Sensorbändern und aktiver Speicherkarte	25	27	30	mA
Stromaufnahme mit Sensorbändern und aktivem Bluetooth	40	44	50	mA
Speicherkapazität		1		GB
Abtastrate		100		Hz
Speicherdauer		>24		h
Betriebstemperatur	10		40	°C

Tabelle 11: Technische Daten Speichereinheit (übernommen aus Archiv von Epionics SPINE)

Zur Speicherung der Daten dient eine Micro-SD-Karte mit einer Speicherkapazität von 1 GB, die eine Messdauer von mindestens 24 Std. garantiert. Über einen USB-Kartenleser können die gespeicherten Daten auf einen PC übertragen werden. Aus Mobilitäts- und Flexibilitätsgründen wurde ein Laptop mit spezieller Software genutzt, die später in einem eigenen Kapitel genauer vorgestellt wird.

Das Befestigungspflaster stellt die Verbindung des Sensorbandes zum Rücken des Patienten dar und koppelt dies an das mechanische Epionics SPINE. Es besteht aus einem flexiblen und einem unflexiblen Bereich, wie in Abb. 39 zu sehen ist.

Der unflexible Bereich sichert die Lage des Sensors zu den Referenzpunkten. Der dehnungsfähige, flexible Bereich enthält einen Führungskanal, welcher dem Sensor ein widerstandsloses Gleiten während der Flexions- und Extensionsbewegung erlaubt. Zusätzlich wird das Sensorband bei den Flexionsbewegungen eng an der Wirbelsäule gehalten.

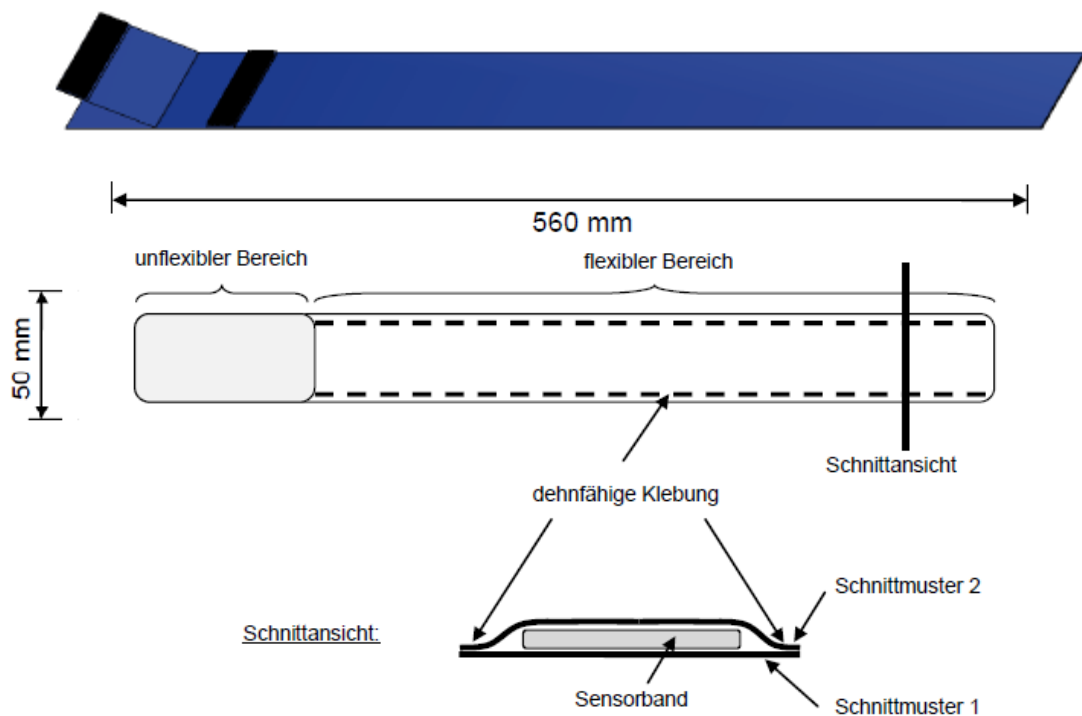


Abb.42: Befestigungspflaster, Aufbau und Maße (übernommen aus Archiv von Epionics SPINE)

Die Klebekraft des Pflasters wird schnell nach Applikation erreicht und hält mindestens 24 Std. an. Ein Klettverschluss sichert den Sensor vor dem Herausrutschen. Das Befestigungspflaster ist 56 cm lang und 50 mm breit. Es beeinflusst weder aktiv noch passiv die Beweglichkeit des Patienten.

3.6.1 Durchführung der Messung

Zuerst findet die Applikation des Pflasters statt. Hierzu ertastet man am Rücken des Patienten die beiden spinae iliacae posteriores superiores und verbindet diese Referenzpunkte mit einer Linie. Bei der Mitte der markierten Linie bzw. direkt über den Proc. spinosi der Wirbelsäule, geht man 5 cm senkrecht nach kaudal und zeichnet eine zweite Linie ein, parallel zur Verbindungslinie der Referenzpunkte, die sog. Referenzlinie. Danach wird das Pflaster wie in der nachfolgenden Grafik auf die Referenzlinie angelegt und aufgeklebt.

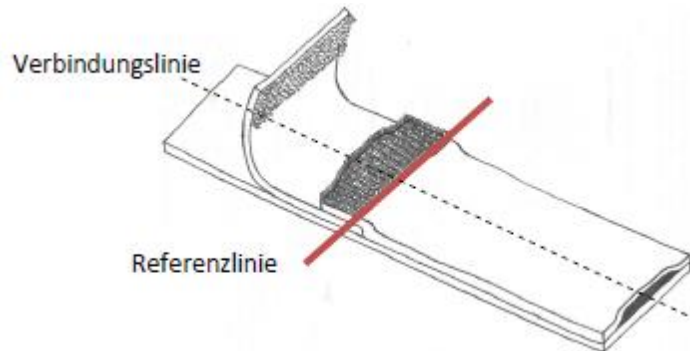


Abb.43: Applikationsdarstellung (übernommen aus [91], Abb.3)

Um einen optimalen Halt des Pflasters zu gewährleisten, müssen einige Vorgehensweisen beachtet werden:

1. Die Haut des Patienten sollte weder verschwitzt noch fettig sein.
2. Bei starker Behaarung muss in den entsprechenden Bereichen rasiert werden.
3. Die Klebung des Pflasters sollte ohne Zug/Dehnung an der Referenzlinie beginnen.
4. Für optimale Haftung das Pflaster festdrücken.
5. Mit der Messung sollte erst ca. 15 min. nach Pflasterapplikation begonnen werden.

Anschließend kann das Sensorband in den vorgesehenen Schlitz im Pflaster eingeführt und mit der Klett-Lasche gesichert werden.

Nach Verbindung des Sensorkabels mit der Speichereinheit kann die Messung beginnen.

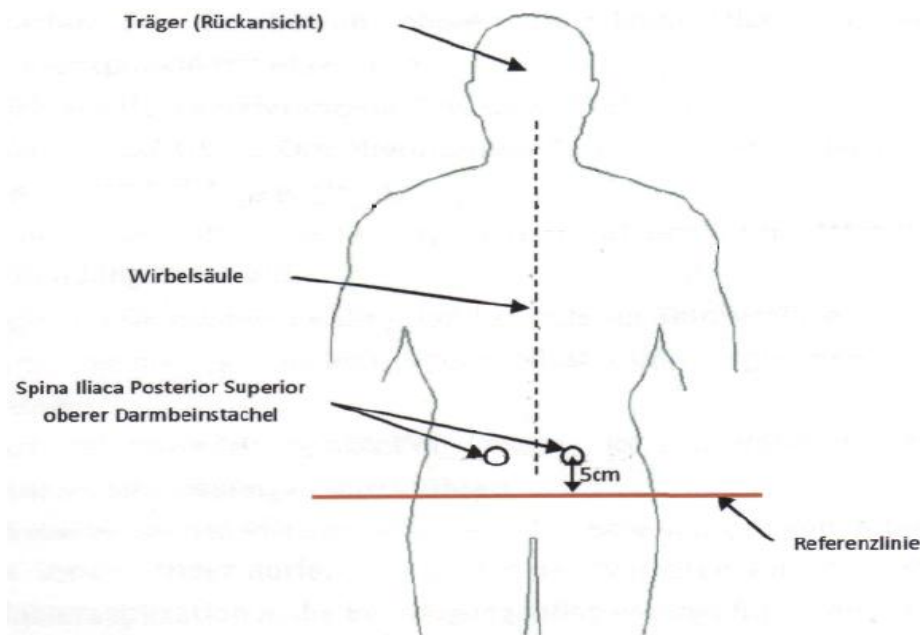


Abb.44: Schematische Darstellung der Referenzpunkte für die Pflasterapplikation (modifiziert übernommen aus [91], Abb.2)



Abb.45: Patient mit Befestigungspflaster (übernommen aus eigenem Fundus)

In unserer Studie wurden die Patienten bei den standardisierten Messungen im Stand gebeten 5 Flexionen und 5 Extensionen durchzuführen. Außerdem wurde eine Messung in „Neutral-Null-Stellung“ getätigt um eine Referenzkurve zu erhalten. Für die Bewegungsübungen sollten die Patienten ihre Schuhe ausziehen, sich in schulterbreitem Abstand mit den Beinen aufstellen und die Arme seitlich vom Körper herabhängen lassen um versehentliche Irritationen des Sensor zu vermeiden. Während der Durchführung der Flexions- bzw. Extensionsbewegung führten die Patienten die jeweilige Bewegung mit durchgestreckten Knien von der Ruhelage bis zu einem individuell, maximal möglichen Punkt aus, um dann wieder in die Ruhelage zurückzukehren.

Die Daten der Messungen wurden mittels der sog. Live-Software aufgezeichnet, die im folgenden Kapitel beschrieben wird. Das Ausmaß der Hüftbeweglichkeit konnte bei den Messungen nicht ausgeschlossen werden, hat allerdings auch keinen Einfluss auf den Messbereich des Sensors.

3.6.2 Live-Software

Die Live-Software dient dazu die Messdaten der Bewegungsübungen zu erfassen und zu speichern.

Die Ergebnisse werden kabellos via Bluetooth vom Speichergerät an den Computer gesendet und dort von der Software verarbeitet.

Das Setup der Live-Software ist in mehrere Registrierkarten unterteilt, die dem Benutzer verschiedene Darstellungen der Daten ermöglichen: „System status“, „Raw data“, „Dynamic plot“, „Cycle Graph“, „Vertebra Graph“, „Kurvaturfläche“, „Position“ und „Raumlage“.

In dem Fenster „Dynamic plot“ besteht die Möglichkeit den Speichernamen für die Messdaten zu bestimmen bzw. zu ändern.

Die Messung beginnt mit dem Befehl „Start“ und muss durch Drücken des „Stop“-Buttons beendet werden, damit eine Speicherung stattfindet.

3.6.3 Analyse-Software

Mit der Analyse-Software können die Messdaten analysiert werden.

Im Hauptfenster stehen mehrere Registrierkarten mit verschiedenen Qualitäten zur Auswahl:

- Raw Data: Messdaten können im Zeitverlauf betrachtet werden, einzelne Sensorsegmente können ein- bzw. ausgeschaltet werden.
- Circle Graph: Zu jedem beliebigen Zeitpunkt der gesamten Messung kann der Zustand der Sensoren wiederhergestellt und visuell nachvollzogen werden. Einen Eindruck zu der Software kann man in der nachstehenden Abbildung 46 gewinnen.
- Dynamic: Die Messdaten werden in einem Geschwindigkeits-Biegewinkel-Diagramm dargestellt und eine Hüllkurve kann berechnet werden.

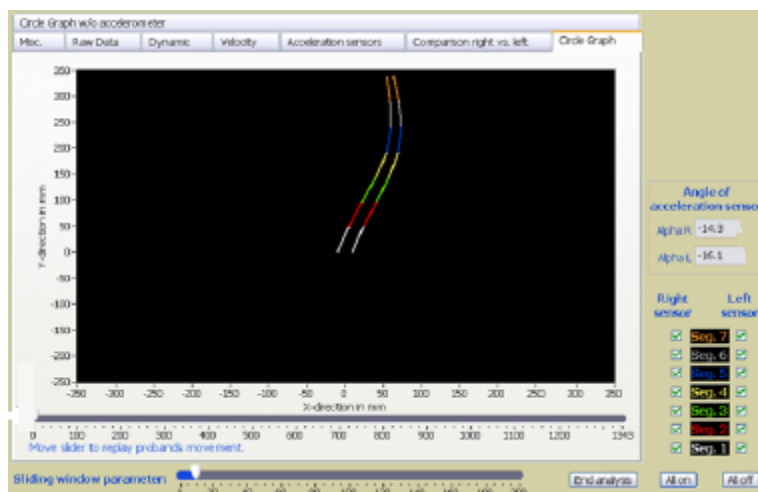


Abb.46: Live-Software Set-up, Circle Graph, Sensorlage im Raum zum Zeitpunkt x von lateral (übernommen aus [91], Abb.12)

3.7 Postoperative Datenerfassung

Die postoperative Datenerhebung nach 4 und 8 Wochen beinhaltete das gleiche Vorgehen wie bei der präoperativen Datenerfassung. Neben den dynamischen Bewegungsmessungen wurden in diesem Zusammenhang auch erneut die Fragebögen ODI, SF-36 und Roland-Morris sowie die Schmerzauswertung mittels VAS-Angabe durchgeführt. Auch die radiologischen Scores Sakral Tilt, sakrale Inklination, Lumbar Tilt und lumbale Inklination wurden einmalig nach der Operation erneut erhoben. Die präoperativ erfassten MRT- und CT-Scores wurden postoperativ nicht erneut erhoben, da hier keine kurzfristigen Veränderungen zu erwarten waren (z.B. in Bezug auf die Muskeldegeneration) und eine unnötige Strahlenbelastung vermieden werden sollte.

3.8 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit einem Computer mit dem Betriebssystem Windows 7. Die Gesamtwerte der Patientendaten wurden mit dem Programm Microsoft Office Excel 2007 errechnet. Die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen, sowie die statistischen Analysen der einzelnen Ergebnisparameter wurden mit dem Programm SigmaPlot Version 11.0 (Systat Software, Inc. SigmaPlot for Windows) und SPSS Statistics 19.0 von IBM ermittelt.

Signifikanzen und statistisch signifikante Unterschiede wurde mittels „Paired t-test“ überprüft. Zur Darstellung korrelativer Zusammenhänge zwischen Änderungen klinischer-, radiologischer- und Bewegungsparameter dienten die „multiple lineare Regressionsanalyse“ und die

„Multivariate Analysis of Covariance (MANCOVA)“. Zum Vergleich zwischen den Untergruppen diente zusätzlich der "Unpaired Student's t-test".

Als statistisch signifikanten Unterschied wurde von einem p-Wert < 0.05 , 95%-Niveau der Vertrauenswahrscheinlichkeit, ausgegangen.

4. Ergebnisse

4.1 Studienpopulation

Alter und Geschlechtsverteilung

In die Studie wurden 37 Patienten mit einem Durchschnittsalter von 65,1 ($\pm 11,3$ Jahren) eingeschlossen.

Davon waren 17 Männer (46%) mit einem Durchschnittsalter am Operationstag von 65,5 ($\pm 11,7$ Jahren); der Älteste war 81 Jahre, der Jüngste 43 Jahre alt.

Bei den 20 Frauen (54%) betrug das Durchschnittsalter am Tag der Operation 64,3 ($\pm 11,2$ Jahre). Die Älteste war 84 Jahre, die Jüngste 36 Jahre.

In den nachfolgenden Diagrammen ist die Studienpopulation in verschiedene Altersklassen unterteilt (30-40 Jahre, 40-50 Jahre, 50-60 Jahre, 60-70 Jahre, 70-80 Jahre und 80-90 Jahre). In Abb.47 ist der Anteil der jeweiligen Altersklasse an der Gesamtpopulation dargestellt, in Abb.48 der jeweilige Prozentsatz an Frauen und Männern in einer Altersgruppe wiedergegeben.

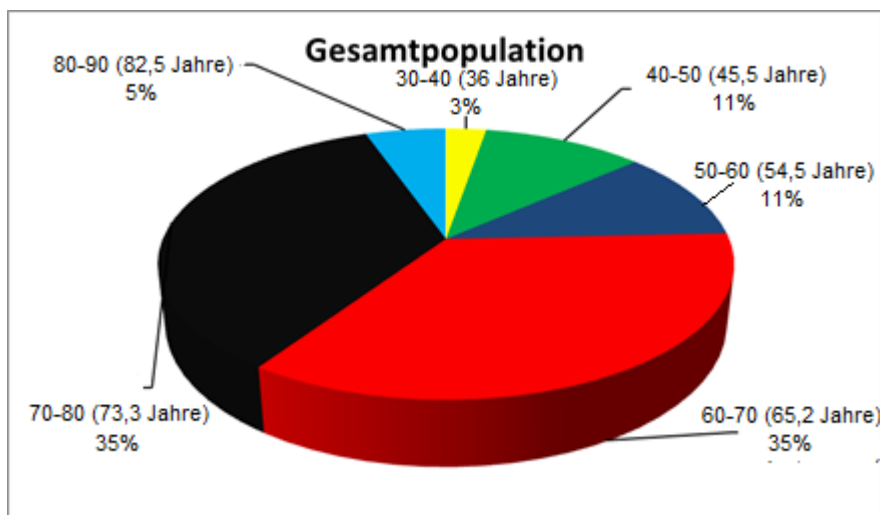


Abb.47: Anteil der Altersklassen an der Gesamtpopulation, in Klammern das jeweilige Durchschnittsalter

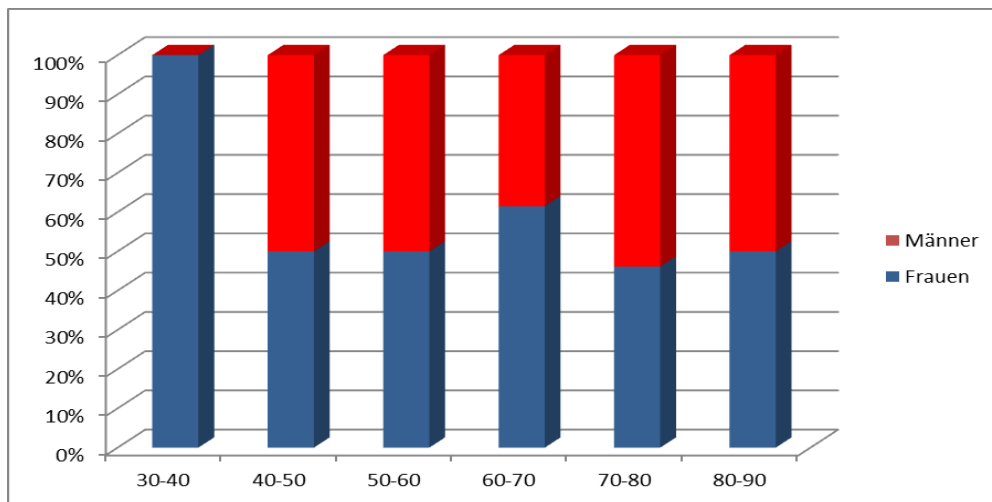


Abb.48: Geschlechtsverhältnis in den jeweiligen Altersklassen

Body-Mass-Index

Der durchschnittliche BMI in der gesamten Studienpopulation lag bei 28,8 (+- 4,7) und variierte zwischen 19,5 und 41,1.

Bei den Männern ergab sich eine Verteilung zwischen 23,1 und 37,2, was einen Durchschnitt von 28,8 (+-3,3) entspricht. Bei den Frauen reichten die BMI-Werte von 19,5 bis 41,1, durchschnittlich ergab dies einen Wert von 29,1 (+-5,7). Zwischen Frauen und Männern gab es damit keine signifikanten Unterschiede bezüglich des BMIs.

Lokalisation der versteiften Segmente

Bei den Operationen der 37 Probanden erfolgten die 27 mono- und 10 bisegmentalen Versteifungen der lumbalen Segmente in nachfolgender Verteilungshäufigkeit (siehe Abb.49). Am häufigsten wurde mit 55,3% das Segment L4/5 operativ versorgt, insgesamt wurden 72,3% der Operationen in den unteren beiden lumbalen Segmenten L4/5 und L5/S1 durchgeführt.

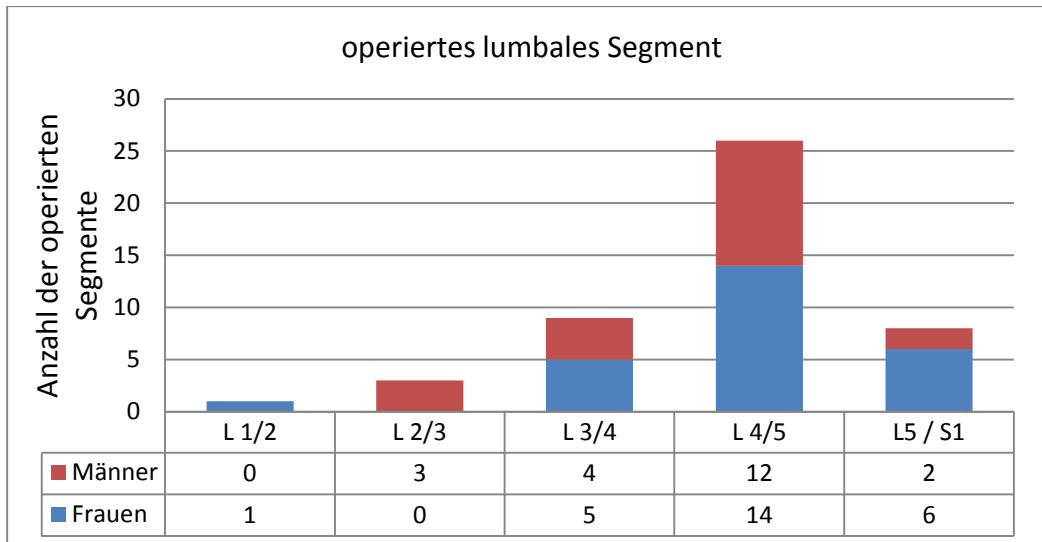


Abb.49: Segment-Lokalisation der lumbalen Versteifungen

4.2 Auswertung der Schmerzsituation

Visuelle Analog Skala

Die Schmerzangabe der Patienten zum Zeitpunkt der Messung auf der Visuellen Analog Skala wird in der folgenden Grafik dargestellt (Abb.50).

Bei den präoperativen Messungen lag der Durchschnittswert bei 6,0 (+- 1,93 Punkten) (Männer: 6,0 +-1,9; Frauen: 6,1 +-2,0). 4 Wochen nach der Operation bei 3,6 (+-1,8 Punkten) (Männer: 3,2 +-1,5; Frauen: 3,8 +-2,1) und 8 Wochen postoperativ bei 3,2 Punkten (+-2,5 Punkten) (Männer: 3,1 +-2,6; Frauen: 3,2 +-2,5). Man kann aus diesen Daten eine signifikante Schmerzreduktion bei den Patienten zwischen den prä- und 8 Wochen-postoperativen Werten um durchschnittlich 2,9 Punkte beobachten. Dies entspricht einer Schmerzreduktion von 47%.

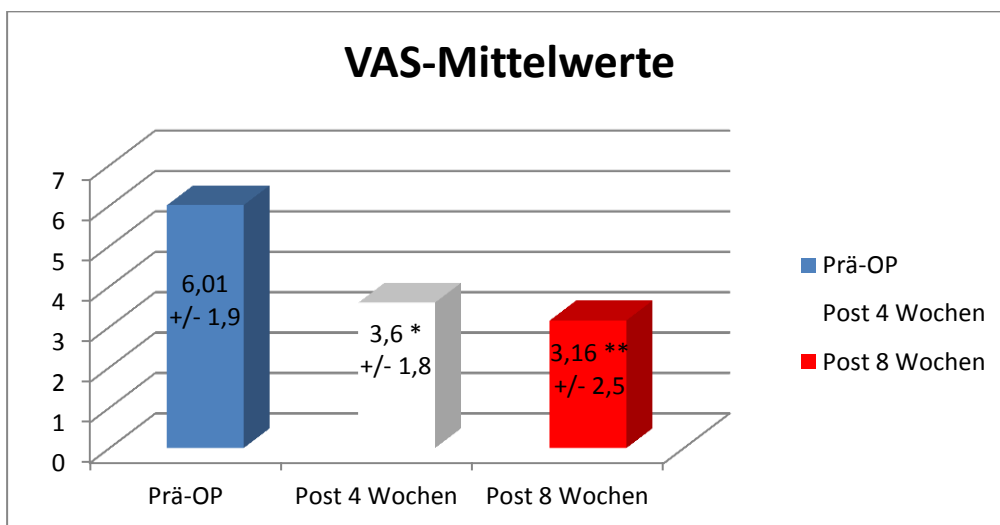


Abb.50: Mittelwerte der VAS im Therapieverlauf +/- Standardabweichung, * sig. prä-OP vs. 4 Wochen post-OP, ** sig prä-OP vs. 8 Wochen post-OP

Die Abnahme der Schmerzen im Therapieverlauf der Patienten anhand der Visuellen Analog Skala ist in einer weiteren Darstellung in Abb.51 aufgezeigt. Vor der Operation hatten 84% der Patienten einen Schmerzwert von 5 oder höher angegeben, 30% sogar 8-10 auf der Schmerzskala. In der Graphik ist dieser Sachverhalt an den blauen Säulen erkennbar. 4 Wochen postoperativ, durch die grauen Säulen gezeigt, wurden die Werte 9 und 10 gar nicht mehr angegeben, 69 % der Patienten hatten einen Wert zwischen 3-5. 8 Wochen nach der Operation lagen 79% der Patienten bei einem Wert von 5 oder niedriger auf der Schmerzskala, 45% sogar zwischen 0 bis 2 (dargestellt durch die roten Säulen).

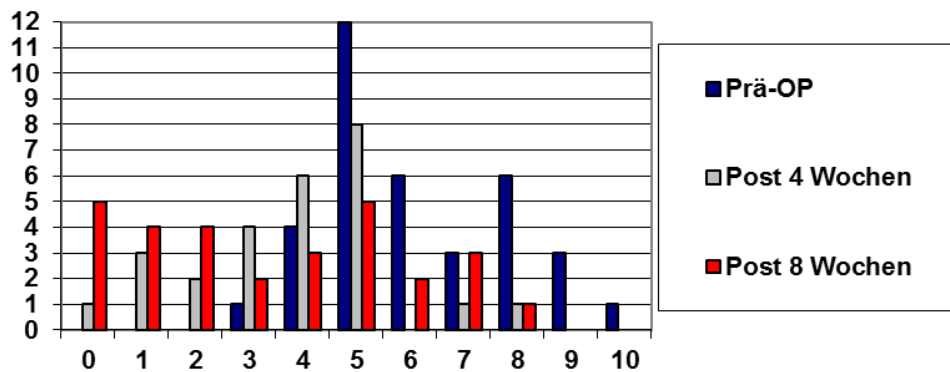


Abb. 51: VAS- Häufigkeitsverteilung im Studienverlauf zu den jeweiligen Messzeitpunkten

Oswestry-Disability-Index

Auch die Ergebnisse des Oswestry-Disability-Index zeigen eine deutliche Verbesserung des Scores im Verlauf der Therapie:

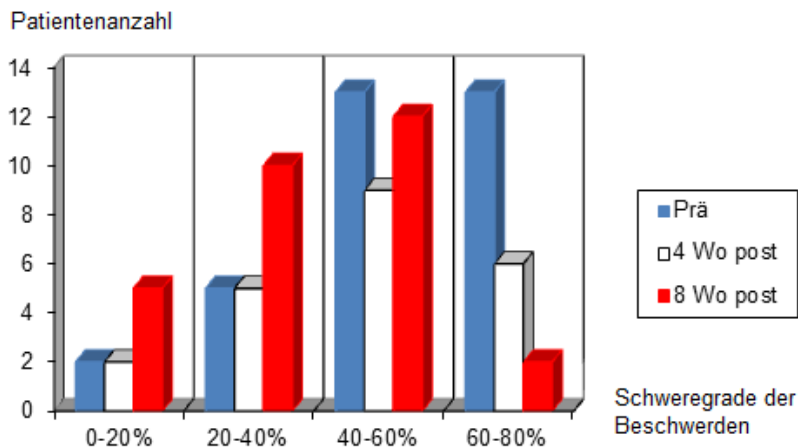


Abb.52: ODI-Ergebnisse gesamt, Aufteilung der Patienten nach Schweregrad der Beschwerden

Die Durchschnittswerte des ODI lagen präoperativ bei 55,1% (+-18,5%) (Männer: 48,1% +-14,39%; Frauen: 60,6% +-16,2%), 4 Wochen postoperativ bei 48,5% (+-20,4%) (Männer: 38,9% +-21,2%; Frauen 53,7% +-18,7%) und 8 Wochen postoperativ bei 37,7% (+-18,3%) (Männer: 35,2% +-20; Frauen: 39,5% +-19,6%). Dies entspricht einer signifikanten Verbesserung von 17,4% zwischen den prä- und 8 Wochen postoperativ erhobenen Werten.

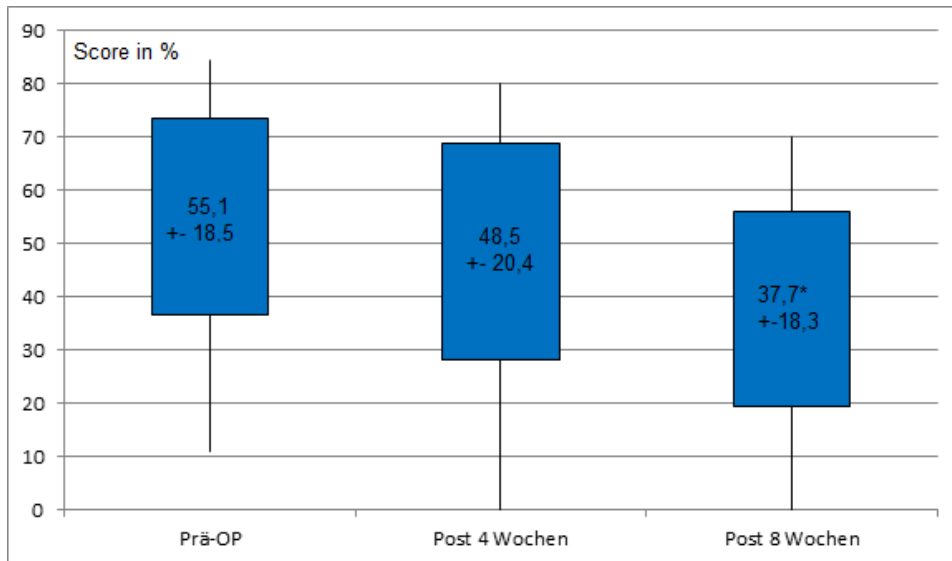


Abb.53: Oswestry-Disability Index in % im Therapieverlauf, * sig. prä-OP vs. 8 Wochen post-OP, Blaue Kästen: Mittelwerte +- Standardabweichungen

Aus den Daten zur Schmerzevaluation / Belastbarkeit der Patienten im täglichen Leben ist auch gut ersichtlich, dass Frauen insgesamt ein höheres Schmerzniveau angeben als die Männer. Präoperativ lagen die durchschnittlichen ODI-Werte der Frauen um 12,5% höher (Frauen: 48,1% +-14,39%; Männer: 60,6% +-16,2%), 4 Wochen postoperativ um 14,8% höher (Frauen: 53,7% +-18,7%; Männer: 38,9% +-21,2%) und 8 Wochen nach der Operation um 4,3% (Frauen: 39,5% +-19,6%; Männer: 35,2% +-20,0%) höher als die Werte der Männer.

SF-36

Die Ergebnisse der SF-36 Fragebogen sind in Tabelle 12 dargestellt.

	Durchschnitt		Frauen		Männer	
	PCS	MCS	PCS	MCS	PCS	MCS
Prä-OP	26,0	42,5	25,5	37,9	26,6	48,2
	+/-7,5	+/-14,5	+/-7,5	+/-13,6	+/-8,5	+/-14,9
Post 4 Wo OP	30,0	40,7	27,9	35,1	33,0	48,8
	+/- 8,6	+/-11,7	+/- 7,0	+/-8,6	+/-9,5	+/-11,7
Post 8 Wo OP	31,3*	42,8	31,7	40,0	30,7	47,3
	+/-8,0	+/-10,6	+/- 7,6	+/-9,2	+/- 7,2	+/-12,2

Tabelle 12: SF-36 Ergebnisse, * sig. prä-OP vs. 8 Wochen post-OP

Beim PCS-Wert, der für den physischen Bereich des SF-36 steht, zeigte sich im Verlauf des Beobachtungszeitraumes eine signifikante Verbesserung der körperlichen Verfassung der Patienten um durchschnittlich 5,32 Punkte, was 17% entspricht. Die mentale Situation (SF-36 MCS) zeigte keine signifikanten Änderungen.

Roland-Morris Fragebogen

Beim Roland-Morris Fragebogen wurden von den Probanden präoperativ im Durchschnitt 13,2 (+/-6,3) Aussagen als zutreffend markiert. Bei den Männern variierte der Score zwischen 4 und 18 Punkten, was zu einem Durchschnittswert von 10,6 (+/-5,5) führte. Die weiblichen Patienten hatten eine Streuung der Werte zwischen 5 und 24 Punkten. Der Durchschnittswert lag bei 15,6 (+/-6,2) Punkten.

4 Wochen nach der Operation lag der Durchschnittswert insgesamt bei 12,75 (+/-7,49) Punkten. Während bei den Männern der Durchschnittswert auf 8,6 (+/-6,6) Punkte gefallen war, war der Durchschnittswert bei den Frauen minimal auf 15,7 (+/-7,0) Punkte gestiegen.

Zum Zeitpunkt der letzten Erhebung des Fragebogens 8 Wochen postoperativ lag der Durchschnittswert der zutreffenden Aussagen bei 9,9 (+/-5,2) Punkten (Männer: 7,4 +/-4,8; Frauen: 11,1 +/-5,2).

Im zeitlichen Verlauf kann bei den Patienten somit eine Reduktion der Schmerzsituation beobachtet werden. Im Gesamtdurchschnitt ist eine Verbesserung zwischen prä- zu postoperativ um 3,4 Punkte entstanden. Betrachtet man die Männer und die Frauen einzeln, so ergab sich bei den Männern eine durchschnittliche Abnahme des Scores um 3,2 und bei den Frauen um 4,5 Punkte. Signifikante Verbesserungen konnten allerdings nicht gezeigt werden.

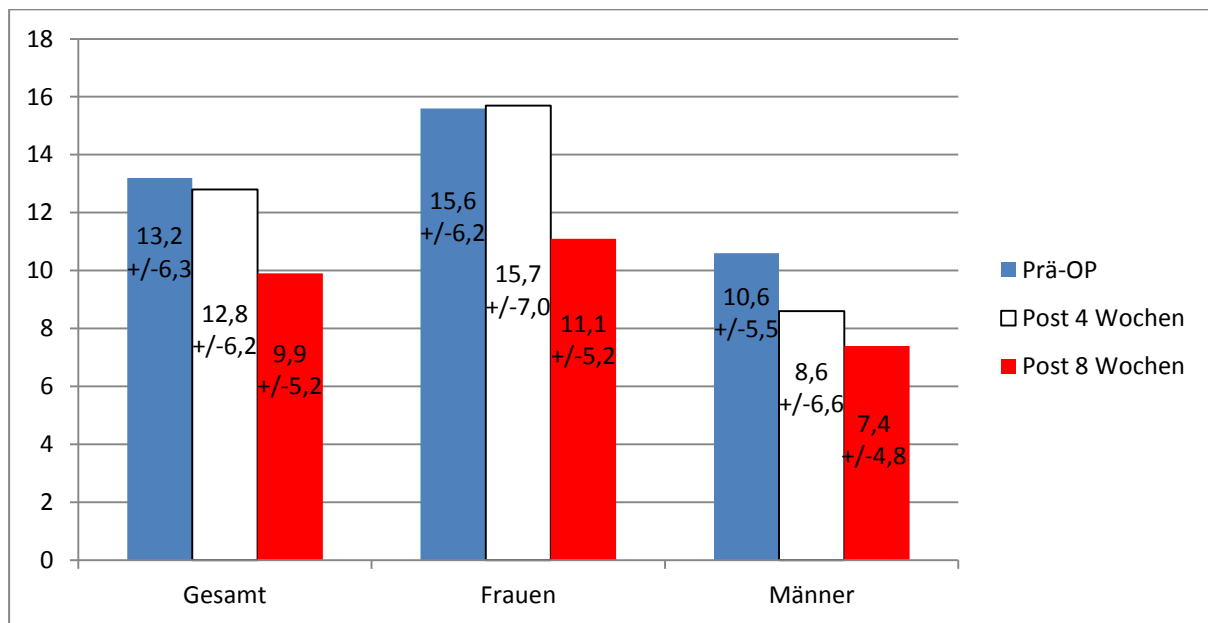


Abb.54: Entwicklung des Roland-Morris-Scores, Darstellung der Mittelwerte +- SD

4.3 Radiologische Scores

Pathria und Fujiwara Klassifikation

Die Beurteilung der Facettengelenke bei unserem Patientenkollektiv ergab die in der Abb.55 dargestellten Ergebnisse. Dabei wurden die Werte für die Fujiwara und Pathria Klassifikation zusammengefasst, da beide Klassifikationen die Facettengelenksarthrose beurteilen. Eine geringe Arthrose wurde bei 10,7% festgestellt, 57,1% wiesen eine mäßige Arthrose auf und bei 32,1% wurde eine schwere Arthrose festgestellt.

Bei den Frauen zeigte sich anhand der MRT- / CT-Bilder bei 73,3% eine mäßige Arthrose und bei 26,6% eine schwere Arthrose.

Bei den Männern sah die Verteilung wie folgt aus: geringe Arthrose: 23,1 %, mäßige Arthrose 38,5% und schwere Arthrose 38,5%.

Die schwere der Facettengelenksarthrose korrelierte nicht mit dem Alter oder Geschlecht der Patienten in der von uns untersuchten Patientenpopulation.

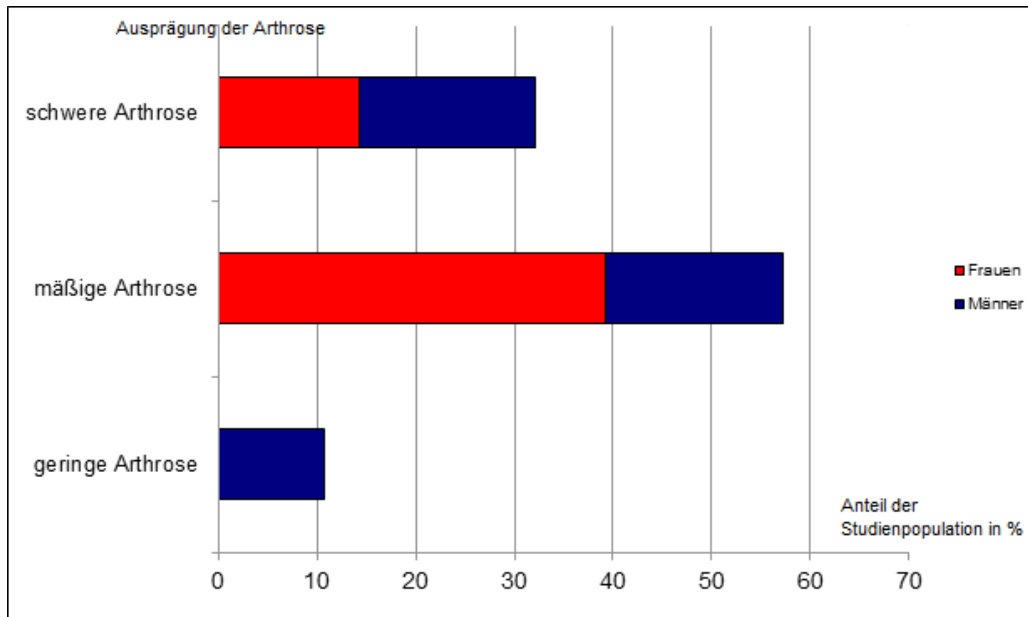


Abb.55: Facettengelenksarthrose nach der Pathria und Fujiwara Klassifikation: Ergebnisse der Studienpopulation in %

Modic Klassifikation

Bei der Auswertung der Modic-Klassifikation zeigten 37,5% der Patienten entzündliche Veränderungen vom Typ I, bei 50% wurden fettige Degenerationen vom Typ II festgestellt und 12,5% der Population wiesen die degenerativen Veränderungen einer Sklerose (Typ III) auf. Eine Alterskorrelation in unserem Patientenkollektiv konnte nicht nachgewiesen werden.

Meyerdig-Klassifikation

Die Beurteilung der Röntgenbilder im Stehen nach Meyerdig in Bezug auf den Spondylolisthese Grad bei den Patienten ergab folgende Ergebnisse:

Meyerdig	Gesamt	Weiblich	Männlich
Grad 0	20	7	13
Grad 1	12	9	3
Grad 2	4	4	0

Tabelle 13: Ergebnisse Meyerdig Klassifikation

Bei 55,6% der Patienten wurde ein Meyerdig Grad 0 festgestellt, 33,3% zeigten Spondylolisthesen 1. Grades und bei 11,1% lag ein Meyerdig Grad 2 vor.

Die Grade 3 und 4 nach Meyerdig waren nicht im Patientenkollektiv vorhanden.

In der nachstehenden Tabelle 14 sind die Durchschnittswerte weiterer in der Studie gemessener radiologischer Scores aufgelistet.

Durchschnittswerte :	Prä-OP	Post-OP
Sakral Tilt	37,73° +-10,0°	37,94° +-10,5°
Sakral Inklination	49,66° +-9,6°	46,47°* +-8,7°
Lumbale Lordose	50,83° +-12,9°	51,4° +-13,8°
Lumbar Tilt	77,31° +-6,2°	77,87°* +-6,1°

Tabelle 14: Radiologische Scores im Verlauf, * sig. Änderungen prä-OP vs. post-OP

Der Winkel der Sakralen Inklination betrug vor der Operation im Durchschnitt 49,66°. Nach der operativen Versorgung zeigte sich eine signifikante Reduktion um durchschnittlich 3,19° (6,42 %) auf 46,47°.

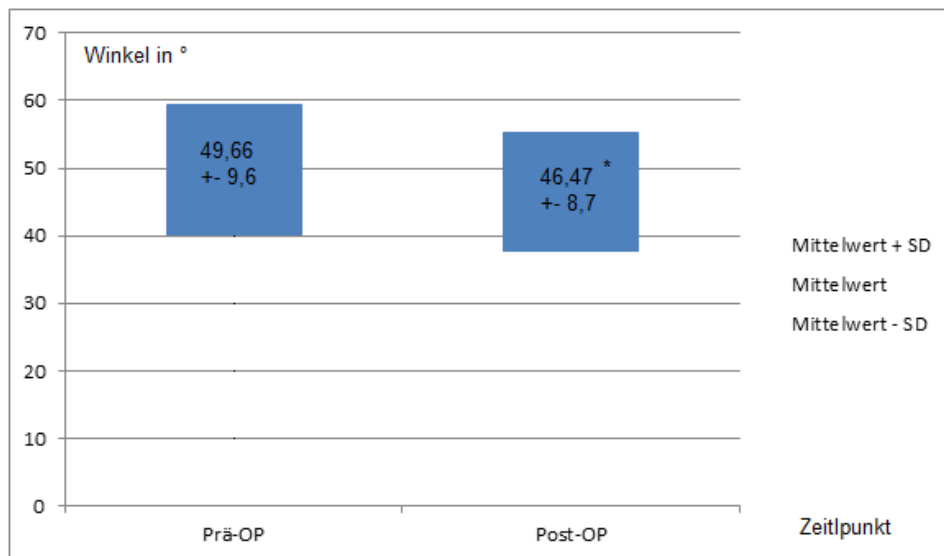


Abb.56: Prä- und postoperativer Durchschnittswert der Sakralen Inklination, * sig. Änderung des Winkels prä- vs. post-OP

Muskelverfettung

Der Durchschnittswert bei der Muskelverfettung beträgt: 1,62 (+-0,65). Daraus ergibt sich eine muskuläre Verfettung, die 1,5-fach höhere Dichtewerte aufweist als der Vergleichsmuskel (Referenz: M. iliopsoas 10,8 cm² +-5,0 cm²). Die Muskelfläche des M. erector spinea beträgt 24,7 cm² +-10,4 cm².

4.4 Auswertung der Bewegungsübungen

Bei der Auswertung der Bewegungsübungen wurde die Gesamtbeweglichkeit der Lendenwirbelsäule in Bezug auf Flexions- und Extensionsbewegungen der Patienten untersucht. Dabei wurden die präoperativen Werte mit den jeweiligen 4 und 8 Wochen postoperativ gemessenen Werten verglichen. Gemessen wurden jeweils bei der Flexion und Extension die Veränderungen der Winkel zum geraden Stand des Patienten.

Des Weiteren wurden die erhobenen Daten der Flexions- und Extensionsmessungen auf Zusammenhänge mit den klinischen und radiologischen Daten untersucht.

Flexion

Es wurden die Flexions-Mittelwerte prä- zu 4 Wochen postoperativ auf Änderungen des Bewegungsausmaßes untersucht. Für die Gesamtbeweglichkeit der LWS konnten keine signifikanten Veränderungen gezeigt werden.

Auch für die Gesamtbeweglichkeit der LWS ließen sich für die Flexionsmessungen präoperativ zu 8 Wochen postoperativ keine signifikanten Änderungen nachweisen.

In Abb.57 ist die Veränderung der Amplitude der Flexionsbewegungen veranschaulicht.

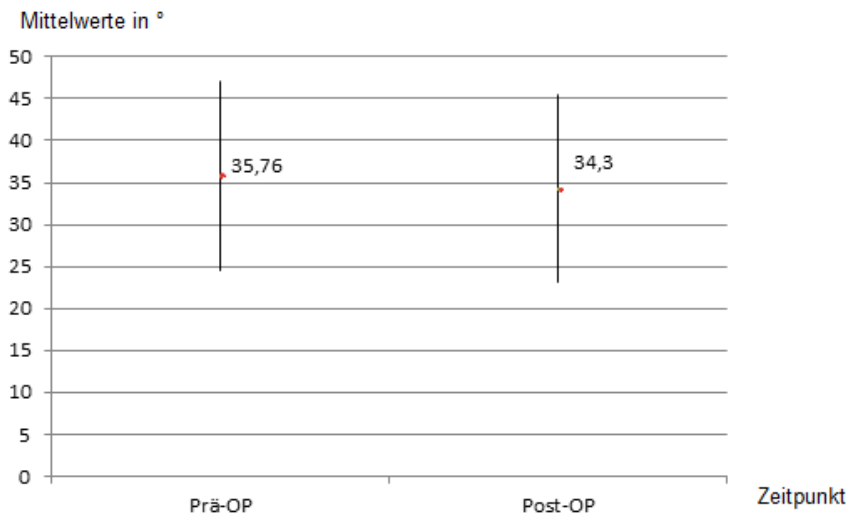


Abb.57: Änderung der ROM Gesamt-Flexion zu den Messzeitpunkten prä- zu 8 Wochen postoperativ, Mittelwert +- SD.

Extension

Betrachtet man die ROM der Extension im Verlauf präoperativ zu 4 Wochen postoperativ, so konnte kein signifikanter Unterschied für die Gesamtbeweglichkeit der LWS festgestellt werden.

Auch für den Zeitraum präoperativ zu 8 Wochen postoperativ waren keine signifikanten Ergebnisse nachweisbar.

Zusammenhänge zwischen den Flexions-/Extensionsbewegungen und den klinischen Scores

Zum Zeitpunkt vor der Operation konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den Flexionsmessungen und den klinischen Scores ermittelt werden.

Die Gesamtbeweglichkeit der LWS zeigten lediglich eine Tendenz, mit dem präoperativ gemessenen MCS-Werten zu korrelieren ($p=0,056$). Diese Tendenz konnte im Verlauf nach 4 und 8 Wochen postoperativ jedoch keine signifikanten Ergebnisse liefern.

In Tabelle 15 werden im späteren Verlauf die signifikanten Ergebnisse zwischen den Flexionsbewegungen zusammen mit den Extensionsmessungen und den klinischen Parametern noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Signifikante Zusammenhänge bei dem Vergleich der Extensionsbewegungen mit den klinischen Parametern konnten präoperativ für die Gesamtbeweglichkeit der LWS und dem PCS-Wert nachgewiesen werden.

Je niedriger die Beweglichkeit der gesamten LWS war, desto niedriger war der PCS-Wert. Zusätzliche signifikante Resultate konnten präoperativ zwischen den Bewegungsmessungen und den klinischen Scores nicht ermittelt werden.

Zu den Zeitpunkten 4 und 8 Wochen postoperativ konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den Extensionsbewegungen und den klinischen Parametern festgestellt werden.

		VAS 4 Wo	VAS 8Wo	PCS Prä
A_Extension	CC	-	-	- 0,450
Gesamt Prä	Sig.			0,013

Tabelle 15: Korrelation der Flexions-/Extensionsmessungen mit den klinischen Parametern.

Darstellung der Korrelationskoeffizienten (CC) und entsprechende Signifikanzen (Sig.)

Zusammenhänge zwischen den Flexions-/Extensionsbewegungen und den radiologischen Scores

Vor der Operation konnten keine signifikanten Korrelationen zwischen den Flexionsbewegungen und den radiologischen Scores des Patientenkollektives festgestellt werden.

4 Wochen postoperativ zeigten sich signifikante Zusammenhänge zwischen der Gesamtflexion der LWS und dem sakralen Inklinationwinkel. Beim Vergleich der Werte 8 Wochen postoperativ wurden keine signifikanten Ergebnisse ermittelt.

Bei den Extensionsbewegungen gab es präoperativ keine signifikanten Korrelationen mit den radiologischen Parametern.

Die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Flexionsbewegungen und den radiologischen Parametern sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

		Lumbale Lordose	Lumbar Tilt	Sakrale Inklination	Sakral Tilt
A_Flexion	CC	NS	NS	- 0,447	NS
Gesamt	Sig.			0,048	

Tabelle 16: Korrelationen zwischen Bewegungsübungen und radiologischen Scores 4 Wochen nach Operation; Darstellung der Korrelationskoeffizienten (CC) und entsprechende Signifikanzen (Sig.), NS = nicht signifikant

Zusammenhang zwischen Muskelverfettung und Bewegungsübungen

Es konnten keine signifikanten Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Muskelverfettung und den Ausmaßen der Flexions-/Extensionsmessungen festgestellt werden.

5. Diskussion

Chronische Rückenschmerzen stellen eine bedeutende Problematik im medizinischen Versorgungssystem dar. Sie sind der zweithäufigste Grund für einen Arztbesuch in Deutschland [92]. Neben der damit verbundenen Beeinträchtigung der Patienten im täglichen Leben ergeben sich daraus auch enorm hohe Kosten im mehrstelligen Milliardenbereich für das Gesundheitssystem [93]. Auf Grund der Entwicklung der Altersstruktur in Deutschland sowie in vielen anderen Industrienationen kann man davon ausgehen, dass die Anzahl der Patienten mit chronischen Rückenschmerzen weiter ansteigen wird. Daher ist es von großer Bedeutung, die Entstehung und Ursachen von Rückenschmerzen, die auf dem Boden struktureller Veränderungen basieren, besser zu verstehen um Rückschlüsse auf die Therapie ableiten zu können. Die Veränderungen der Bewegungsausmasse unter degenerativen Bedingungen und insbesondere nach lumbalen Fusionsoperationen sind noch nicht vollständig erarbeitet und verstanden.

Eine weit verbreitete und allgemein akzeptierte Behandlungsmöglichkeit für konservativ nicht mehr zufriedenstellend therapierbare Rückenschmerzen auf Boden fortgeschrittener degenerativer Veränderung ist eine Fusionsoperation. Sie ist weiterhin der „gold standard“ unter den Therapiemöglichkeiten. Eine technische Variante der Fusion bei chronischen, lumbalen Rückenschmerzen ist die transforaminale lumbale interkorporelle Fusion (TLIF). Ziel dieser Operation ist eine Stabilisierung des degenerativ instabilen Segments, die Reduzierung der

Schmerzen des Patienten, die Wiederherstellung des Wirbelsäulenalignements sowie eine eventuell notwendige nervale Dekompression [30].

Ziel dieser Studie war es einerseits, prä- und postoperativ die dynamische Rückenform und Beweglichkeit der Lendenwirbelsäule von Patienten mit degenerativen, chronischen Wirbelsäulenerkrankungen darzustellen, die mit einer mono- oder bisegmentalen Lumbalfusion (TLIF) behandelt wurden. Dazu wurde mit dem Epionics SPINE erstmals ein non-invasives, kontinuierliches Messverfahren eingesetzt, das zudem keine Strahlenbelastung für den Patienten verursacht. Die Ergebnisse der Flexions- und Extensions-Beweglichkeitsmessungen wurden dann weiterhin mit klinischen und radiologischen Parametern verglichen und auf signifikante Zusammenhänge hin untersucht.

Das Durchschnittsalter unserer Patienten lag bei ca. 65 Jahren. 70% der Studienteilnehmer waren zwischen 60 und 80 Jahren. Der BMI lag durchschnittlich bei 28,7 +- 4,7 und zeigt damit, dass die eingeschlossenen Patienten größtenteils übergewichtig waren. Diese Beobachtungen bestätigen die Erkenntnisse, dass sowohl Alter als auch Übergewicht zu den Risikofaktoren für degenerative Wirbelsäulenerkrankungen gelten [1,13].

Die Segmente, die in unserer Patientenpopulation am häufigsten degenerative Veränderungen der LWS und eine Operationsindikation zeigten, war das Segment L4/5 (Männer: 12, Frauen: 14; ca. 55% der versteiften Segmente in unserem Patientenkollektiv). Dieses Segment gilt als eine der Hauptbewegungsachsen für Flexions-/Extensionsbewegungen der Wirbelsäule. Zudem sind die Segmente in der unteren Lendenwirbelsäule größeren axialen Belastungen ausgesetzt als thorakale oder zervikale Bewegungssegmente. Dass degenerative Prozesse vermehrt an dieser Lokalisation der Wirbelsäule auftreten, ist aufgrund der erhöhten Belastungen in diesem Bereich ableitbar [94].

Bei TLIF-Operationen werden in der Literatur sehr gute Fusionsraten mit um 90% beschrieben [60,95]. Bei der offenen TLIF-Operation entsteht allerdings durch die anatomische Lage der Lendenwirbelsäule und den damit verbundenen Zugangsweg zum Operationsgebiet ein relativ ausgeprägter Gewebeschaden der Weichteile und zum Teil auch größere Blutverluste im Vergleich zu minimalinvasiven Techniken [66].

So wird ferner der Therapieerfolg hinsichtlich weiterer evaluierbarer Faktoren bewertet. Das primäre klinische Therapieziel ist die Reduktion des Schmerzniveaus der Patienten, die postoperative Liegezeit im Krankenhaus, die Rehabilitationszeit und die resultierende Lebensqualität.

Um diese verschiedenen Faktoren messen zu können, wurden spezielle Fragebögen entwickelt, die weit verbreitet sind und standardmäßig angewandt werden. Aufgrund ihrer Sensitivität und

Reliabilität in Bezug auf Veränderungen sind sie ein anerkanntes, standardisiertes Evaluationsmittel. Zu ihnen gehören u.a. die Fragebögen des SF-36, des Oswestry-Disability Index, der Roland-Morris Fragebogen sowie die Visuelle Analog Scala [96].

In unserer Studie nutzten auch wir diese Fragebögen zur Evaluation des Patientenbefindens. Im Beobachtungszeitraum zeigte sich erwartungsgemäß eine signifikant verbesserte klinische Situation der Patienten im Therapieverlauf prä- zu 8 Wochen postoperativ gemessen. Die Hypothese, dass eine Fusionsoperation zu einer Schmerzreduktion bei den Patienten führt, wurde bestätigt. Die VAS-Werte sanken um ca. 47% von 6,01 auf 3,16 8 Wochen postoperativ. Diese Ergebnisse sind Vergleichbar mit den von Kunze et al. gemessenen Werten, wobei der präoperative Wert bei 6,5 lag und der postoperative bei 3,34 [11]. In der Studie wurden die Daten von 143 Patienten retrospektiv analysiert, die sich einer PLIF- oder TLIF-Operation unterziehen mussten.

Die Auswertung der Patientenangaben in unserer Studie im ODI ergab ebenfalls ein deutlich verbessertes subjektives Patientenempfinden mit einer Reduktion des ODI-Wertes um 17%. Älteren Studien zufolge stehen Änderungen ab 4% des ODI-Wertes für ein verbessertes Patientenbefinden [97], neuere Studien definieren die relevante Mindestmarke erst ab Verbesserung von 10 % des ODI-Wertes [98]. Weitere Studien, die sich mit dem klinischen Outcome nach Stabilisierungs-Operationen beschäftigt haben, zeigten ebenfalls signifikante Verbesserungen anhand des ODI-Wertes [11,60,96]. Unsere erhobenen Daten bestätigen also die in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse zum postoperativen Patientenbefinden.

Bei den SF-36 Fragebögen konnte eine signifikante Änderung des PCS-Wertes um durchschnittlich 5,32 Punkte gezeigt werden. Ware et al. beschreiben eine klinische Bedeutung bei einem Anstieg von 5,42 Punkten für die Patienten [99]. Nach den Standards der Food and Drug Administration (FDA) der USA besteht ein gutes bis exzellentes postoperatives Outcome, wenn sich der ODI um 15 Punkte verbessert und der PCS-Wert mindestens gleich bleibt oder überhaupt irgendeine Verbesserung zeigt [100].

Die Ergebnisse der durchgeführten TLIF-Operationen bei dem betrachteten Patientenkollektiv unserer Studie können folglich nach den Standards der FDA als sehr gut angesehen werden. Die Fusionsoperation als adäquate Therapiemöglichkeit für degenerative Rückenschmerzen wird somit bestätigt, wie bereits in verschiedenen vorangegangenen Studien beschrieben.

Der MCS-Wert des SF-36 blieb bei unserer Auswertung unverändert. Dies könnte seine Ursache in dem kurzen Nachbeobachtungszeitraum von 4-8 Wochen haben. Durch den meist sehr langen Krankheitsverlauf bei chronischen Rückenschmerzen über Monate bis Jahre ist unter Berücksichtigung der belastenden Umstände der Operation als zusätzlicher Stressfaktor, keine

kurzfristige Verbesserung der mentalen Situation der Patienten zu erwarten. Eine weitere Möglichkeit für die annähernd gleich bleibenden MCS-Werte könnte die nicht unerheblich belastende postoperative Phase sein. Die Patienten haben nach der Operation meist ein nicht komplett regrediertes Schmerzniveau, müssen verschiedene Termine wie Reha-Behandlungen und Kontrolluntersuchungen wahrnehmen. Die vollständige Heilung ist noch nicht abgeschlossen und sie bewegen sich noch nicht in ihrem gewohnten heimischen Umfeld. Gerade für ältere Patienten stellt dies eine hohe Belastung dar, weil der Heilungsprozess häufig auch mehr Zeit in Anspruch nimmt als bei jüngeren Menschen. Ältere Patienten haben häufiger Komorbiditäten und leiden an chronischen Erkrankungen, welche den Heilungsprozess beeinflussen [101].

Beim Roland-Morris-Disability Questionnaire konnten Verbesserungen festgestellt werden, allerdings zeigten sich diese nicht signifikant. Dies könnte dem kurzen Nachbeobachtungszeitraum geschuldet sein, weil die Patienten noch nicht wieder den alltäglichen Belastungssituationen nachgegangen sind. Außerdem hat sich in vorausgehenden Studien gezeigt, dass der RMQ besser für Patienten mit relativ geringen Einschränkungen geeignet ist [74]. Eine Fusionsoperation ist jedoch ein erheblicher Eingriff, der Zeit zur Regeneration benötigt. Demnach ist dies hier kritisch hinsichtlich der Auswahl der Methodik zu nennen.

Signifikante Veränderungen bei den radiologischen Parametern des sagittalen Alignments unserer Studie zeigten die Werte des Lumbar Tilt und der sakralen Inklination im Vergleich prä- zu postoperativ. Die lumbalen Lordose-Werte als Gradmesser wiesen keine signifikanten Änderungen zu den Untersuchungszeitpunkten auf.

Die postoperativen Veränderungen der sagittalen Krümmung und somit auch die einzelnen Werte der verschiedenen betrachteten radiologischen Parameter werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Neben der Cage-Form (rechteckige Cages können zu niedrigeren lumbalen Lordose-Werten führen) und Lage, der Patientenlagerung während der OP spielt auch das verwendete Pedikel-Schrauben-System (u.a. vorgegebene Lordose des Stabes) bei der dorsalen Stabilisierung eine entscheidende Rolle. Ein postoperatives Absinken der Werte für die sagittale Wirbelsäulenform scheint die Wahrscheinlichkeit für pathologische Veränderungen in den benachbarten Segmenten der Fusion zu erhöhen [102]. Verschiedene Studien bei gesunden Probanden haben allerdings auch gezeigt, dass eine signifikant große Streubreite bei den Werten der lumbalen Lordose und des Sakral Tilt besteht [19,89].

Die physiologischen sagittalen Alignment Parameter sind größeren Schwankungen unterlegen. Es ist oftmals nur schwer zu definieren, welche Veränderungen schon pathologisch sind und

welche noch als normal angesehen werden können. Das Aufzeigen und Beurteilen von signifikanten Veränderungen dieser Scores ist deshalb schwierig und nicht eindeutig zu bewerten. Studien zeigen allerdings, dass zu große Extreme/Abweichungen von der Norm das Auftreten von chronischen Rückenschmerzen begünstigen. Barrey et al. beschreibt z.B., dass ein Verlust der lumbalen Lordose verstärkt bei Rückenschmerzpatienten zu sehen ist, weil dadurch Instabilitäten des Wirbelsäulenalignements resultieren [103].

Bei chronischen Rückenschmerzpatienten werden in der Bildgebung häufig Zeichen für degenerative Wirbelsäulenveränderungen gefunden, wie z.B. Bandscheibendegenerationen und Osteochondrosen. Solche Zeichen finden sich jedoch auch bei asymptomatischen Patienten. Ein direkter Schluss von der Bildgebung auf die Beschwerden der Patienten ist daher nicht möglich und es ist auch keine prognostische Aussage über das Risiko für Rückenschmerzen eines Patienten anhand eines solitären Röntgenbildes oder anderen bildgebenden Verfahren zulässig. Es ist daher schwierig zu beurteilen, welche Patienten von einer Operation profitieren und welche nicht [34].

22-51% der Bevölkerung ohne Beschwerdesymptomatik weisen im MRT degenerative Veränderungen der Lendenwirbelsäule auf. Bei den über 60 Jährigen sind es sogar 57-80% [104,105]. Bezüglich einer Studie von Cheng et al. aus dem Jahr 2010 ist die Anzahl der gefundenen Pathologien bei den operierten und nicht-operierten Probanden gleich hoch. Die Nicht-Operierten besaßen eine höhere Prävalenz für Bandscheibendegenerationen, die Operierten für Instabilitäten und Wirbelkanalstenosen [106].

Bei einer anderen Studie wurde nach zusätzlichen Wirbelsäulendegenerationszeichen gesucht, indem neben der symptomatischen Segmentebene auch die gesamte restliche Wirbelsäule mittels MRT untersucht wurde. Bei Patienten mit symptomatischen, lumbalen Rückenbeschwerden zeigten sich zudem in 24,7% zervikale und in 4,8% thorakale Begleitpathologien. Bei den Patienten über 60 Jahren machte dies einen Prozentsatz von 34,1 aus. Die häufigsten Befunde waren neben Bandscheibenvorfällen die Wirbelkanaleinengungen. Patienten mit Spinalkanalstenose zeigten mit 30,3% die größte Wahrscheinlichkeit für eine weitere Wirbelsäulenpathologie [107].

Der Nutzen des kompletten Wirbelsäulen-MRT bei einem symptomatischen Befund ist schwer einzuschätzen. Nur ein sehr geringer Teil mit auffälligen Zweitbefunden benötigten eine operative Therapie oder physiotherapeutische Behandlungen [107].

Die genannten Studien verdeutlichen, dass die Ergebnisse der bildgebenden Verfahren immer in Bezug zur angegebenen Symptomatik der Patienten gesehen werden müssen. Die Erhebung von radiologischen Scores und bildmorphologischen nachgewiesenen Wirbelsäulenpathologien

alleine reicht nicht aus, um das Krankheitsbild ausreichend zu erfassen und ein adäquates Therapiekonzept zu erstellen.

Die Beweglichkeit des Rumpfes kommt durch die Bauch- und Rückenmuskelaktivität zustande. Neben dieser Aufgabe verleiht die Rückenmuskulatur dem Oberkörper Stabilität und trägt bei Schwächungen oder Ausfällen einzelner Muskelgruppen zur Entstehung von degenerativen Wirbelsäulenbeschwerden bei. Aus diesem Grund wurden intensive Studien über die Rolle der Muskulatur bei Rückenbeschwerden angestellt, was auch uns veranlasste die muskulären Gegebenheiten dieses Patientenkollektivs zu untersuchen. Es ist davon auszugehen, dass Patienten mit degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen muskuläre Degenerationen aufweisen.

Die Untersuchung der tiefen Rückenstrecker unseres Patientenkollektivs konnte zeigen, dass der M. erector spinae mehrheitlich eine fettige Degeneration aufweist. Ein postoperativer Vergleich oder eine Kontrollgruppe mit Patienten ohne Rückenschmerzen stand uns nicht zur Verfügung, so dass wir keine Aussage über Veränderungen prä- zu post-OP machen können. Der Nachbeobachtungszeitraum wäre wahrscheinlich aber auch zu kurz gewesen um Veränderungen zu objektivieren. Dass Patienten mit chronischen Rückenschmerzen degenerative Veränderungen der Muskulatur aufweisen, ist nicht verwunderlich und in vorangegangenen Studien bereits publiziert worden [14,90,108].

Wird die segmentale Stabilität der Wirbelsäule wie in dem Model von Kirkaldy-Willis et al. beschrieben beeinträchtigt und es finden degenerative Veränderungen an der Wirbelsäule statt, wird zunächst versucht diesen Prozessen mit Kompensationsmechanismen entgegenzuwirken. [14,22]. Eine Möglichkeit hierfür ist durch erhöhten Energieaufwand in Form von gesteigerter Muskelarbeit eine Instabilität der einzelnen Bewegungssegmente auszugleichen. Mit zunehmendem Alter nimmt die Muskelkraft jedoch ab und es entstehen Instabilitäten und somit degenerative Veränderungen an der Wirbelsäule. Pathologische Umstrukturierungen der einzelnen Bewegungssegmente führen wiederum zu Schmerzen und Funktionsverlust bei den Patienten.

In Studien wurde weiterhin gezeigt, dass die Ermüdbarkeit des M. multifidus bei Rückenschmerzpatienten schneller stattfindet als bei Individuen ohne Rückenschmerzen. Auch die Aktivität der Muskeln war insgesamt geringer als bei gesunden Probanden, was sich in einer erniedrigten EMG-Frequenz während Kraftübungen zeigte (Patienten mit chronischen Rückenschmerzen haben eine niedrigere EMG-Frequenz als gesunde Patienten) [108].

Muskelermüdung führt verstärkt zu lumbalen Rückenschmerzen, da die überbeanspruchten Muskeln ihre Aufgaben weniger effektiv nachkommen können. Die Ursachen für ihre Ermüdbarkeit hängen u.a. mit ihrer Durchblutung und ihrer Oxygenierung zusammen. Eine

Abnahme des Oxy-Hämoglobins und ein Anstieg des Desoxy-Hämoglobin während der Muskelarbeit spielen eine entscheidende Rolle bei der Muskelermüdung [109]. Muskeln sind umso leistungsfähiger, je häufiger sie kleine Pausen bei moderaten Belastungen bekommen. Starke Belastungen mit langen Pausen sind ineffektiver. Bei gleichbleibender Kontraktionsstärke werden mit zunehmender Ermüdung zusätzliche Muskeluntereinheiten aktiviert und hochfrequenter elektrische Signale ausgesandt, um das Leistungsniveau aufrecht zu erhalten [109].

Die Stärke der Rumpfmuskulatur nimmt mit dem Alter ab. Da der Muskeldurchmesser proportional zur Kraft des Muskels ist und bei altersbezogenen Vergleichen eine Reduktion des Muskeldurchmessers beobachtet werden konnte, ist hier weiterhin mit funktionellen Einbußen zu rechnen. Durch die Schwächung der Muskulatur und hierdurch verlorengangene Stabilität werden degenerative Veränderungen an der Wirbelsäule hervorgerufen und verstärkt. Es konnte auch gezeigt werden, dass die paravertebrale Muskulatur von Rückenschmerzpatienten einen kleineren Durchmesser besitzt als bei Personen, die nicht von Rückenschmerzen betroffen sind [90].

Ein weiterer Faktor für Muskelschwächungen sind operative Interventionen. Postoperativ kann eine schwerwiegende Beeinträchtigung bei Patienten nach Fusionsoperationen mit offenem und minimal-invasivem Zugang durch die direkte Schädigungen der paravertebralen Muskulatur entstehen. Durch den Zugangsweg zum Operationsgebiet kann es zusätzlich zu Schädigungen des den M. multifidus versorgenden Ramus dorsalis medialis kommen sowie zur Zerstörung des Blutzuflusses zu paraspinalen Muskeln, auf die eine Atrophie folgt. Die isokinetische Muskelkraft bei Flexionsübungen ist nach Rückenoperation bis zu 30% herabgesetzt [110]. Der Multifidus ist daher besonders anfällig für Schädigungen während Operationen, da dieser lediglich vom medialen Ast des dorsalen Ramus innerviert wird und keine intersegmental übergreifende Versorgung mit anderen Nerven besteht. Durch den Einsatz von Retraktoren während der Operation kann es zudem durch Druckschäden zu Ischämien und somit auch zu Nekrosen im Muskel kommen. Durch diese Vorgänge kann ein Kraftverlust resultieren, was die Beweglichkeit und Stabilität der Wirbelsäule beeinträchtigt und postoperativ vermehrt zu Rückenschmerzen führt [17,111]. Es wäre demnach zu erwarten, dass die Degenerationszeichen der Muskulatur unserer Patienten bei Nachuntersuchungen weiter fortschreiten.

Bei den Patienten unserer Studie mit chronischen Rückenschmerzen konnte erwartungsgemäß Zeichen muskulärer Degeneration radiologisch nachgewiesen werden, signifikante Korrelationen zwischen deren Ausmaß mit der Beweglichkeit und den klinischen Parametern der Patienten konnten allerdings nicht aufgezeigt werden.

Für die durchgeführten Bewegungsmessungen ist zu erwarten, dass bei Patienten nach einer dorsalen Fusionsoperation eine Einschränkung der ROM auftritt. Im Gegensatz dazu wurde bei den Messungen mit dem Epionics SPINE festgestellt, dass keine signifikante Änderung der Gesamtbeweglichkeit bei den Flexions- und Extensionsbewegungen vor und nach der chirurgischen Intervention bestand. Die Beweglichkeit der Lendenwirbelsäule bleibt demnach bei den Messungen präoperativ, sowie 4 und 8 Wochen postoperativ stets im gleichen Maße erhalten.

Bei einer Studie von Auerbach et al. 2009 wurde bei der Messung des lumbalen Bewegungsumfanges 24 Monate postoperativ festgestellt, dass die Patientengruppe mit Bandscheibenprothese bei L4/5 einen Zuwachs der Beweglichkeit aufweisen konnte, wohingegen die Gruppe mit Fusionsoperation keine signifikanten Unterschiede bei der lumbalen Gesamtbeweglichkeit zeigte [61]. Die Messungen der ROM wurden vor der Operation und 24 Monate postoperative an Röntgenbildern mit Hilfe einer computer-assistierten Software (Quantitativ Motion Analysis, Medical Metrics, Inc., Houston, TX) ermittelt. Es wurde sowohl das operierte Segment als auch die jeweils benachbarten kranial und kaudal gelegenen lumbalen Segmente in die Messungen einbezogen. Zudem wurde die lumbale Gesamtbeweglichkeit ermittelt. Der segmentale Anteil an der lumbalen Gesamtbeweglichkeit bei Fusionsoperationen war in den operierten Segmenten signifikant erniedrigt. Fusionen bei L5/S1 waren mit einer signifikant erhöhten Beweglichkeit im ersten darüber liegenden Segment verbunden. Diese Beobachtung ließ sich auch bei Fusionen bei L4/5 machen, jedoch waren diese nicht statistisch signifikant. Bei den Fusionsoperationen war die Gesamtbeweglichkeit in der lumbalen Wirbelsäule vor und nach der Operation gleich.

Dieses Ergebnis könnte ein Hinweis dafür sein, dass die nicht-versteiften Segmente der LWS die reduzierte Beweglichkeit des fusionierten Abschnittes kompensieren. Dies führt wahrscheinlich zu erhöhten mechanischen Belastungen in den kranialen und kaudalen Segmenten zu einer Fusion, die die reduzierte ROM der Fusionssegmente auszugleichen versuchen. Daraus könnten sich auf dem Boden vorgeschädigter Segmente im weiteren Verlauf die kontrovers diskutierten Anschlussdegenerationen (ASD) entwickeln.

Ein beschleunigter degenerativer Prozess in den Anschlusssegmenten zu einer Fusion wird als häufige Komplikation dieser Operationstechnik in der Literatur beschrieben. In Studien wird die Wahrscheinlichkeit für ein klinisch symptomatisches Auftreten einer ASD mit 5-36% angegeben, je nach Länge des Nachbeobachtungszeitraumes. Radiologische Zeichen einer ASD werden sogar mit 5-100% angegeben. Für diese Spätkomplikation werden zwei Theorien als Erklärungsmodell herangezogen. Zum einen geht man von einer Druckerhöhung in den

Bandscheiben der benachbarten Segmente aus. Zum anderen wird der Bewegungsverlust der fusionierten Segmente durch eine Hypermobilität der angrenzenden Bewegungssegmente kompensiert. Beides stellt eine erhöhte Belastung der umliegenden Strukturen dar. Dies soll zu beschleunigten und vermehrten degenerativen Schädigungen führen [112,113].

Eine Studie mit einem ähnlichen Patientenkollektiv wie in unserer Studie (Durchschnittsalter: 63; durchschnittlicher BMI: 27,9; PCS-Wert präoperativ: 29,3, häufigste Lokalisation der versteiften Segmente: L4/5; hauptsächlich mono- und bisegmentale Versteifungen) beschäftigte sich mit dem Vorkommen von ASD bei Patienten, die eine PLIF-Operation erhalten hatten. Bei den Patienten dieser Studie mussten sich 13% einer erneuten Operation nach einem durchschnittlichen Zeitintervall von 43 Monaten unterziehen. Risikofaktoren hierfür waren das Alter der Patienten, die Anzahl an fusionierten Segmenten und ob in den angrenzenden Segmenten zu einer Fusion eine Laminektomie durchgeführt wurde (Relatives Risiko 2,4). Die Ausbildung von operationsbedürftigen ASD dauert Studien zufolge mehrere Jahre [114].

In einer prospektiven randomisierten Studie von Ekman et al. aus dem Jahr 2009 wurden Patienten mit konservativer und operativer Behandlung (posterolaterale Fusion) miteinander verglichen [115]. Der Beobachtungszeitraum lag bei mindestens 10 Jahren. Bei den Patienten mit operativer Versorgung zeigte sich eine deutlich häufigere Reduktion der Bandscheibenhöhe im Anschlusssegment zu den operierten Segmenten als bei den konservativ behandelten Patienten (15% vs. 2%). Des Weiteren waren Patienten, bei denen eine Laminektomie durchgeführt wurde, signifikant stärker von einer ASD betroffen als Patienten ohne diesen Eingriff. Man begründet diese Ergebnisse damit, dass eine Laminektomie zu einer Instabilität im jeweiligen Bewegungssegment führt und somit eine stärkere Belastung für diese Segmente entsteht [115].

Ahn et al. beschäftigte sich 2010 ebenfalls mit dem Thema der Anschlussdegeneration nach Fusionsoperationen [116]. Risikofaktoren für eine erneute Operation waren auch hier hohes Alter, degenerative Wirbelsäulenerkrankungen, mehrsegmentale Fusionsoperationen und männliches Geschlecht. Als Ursache für eine ASD wurde eine Hypermobilität als Kompensationsmechanismus einer reduzierten ROM in den Anschlusssegmenten zu einer Fusion postuliert. Ob die Anschlussproblematik jedoch auf Grund der degenerativen Grunderkrankungen der Patienten beschleunigt entsteht oder sich wegen der veränderten Biomechanik der Wirbelsäule entwickelt, kann nicht gesagt werden. Wahrscheinlich tragen allerdings beide Mechanismen dazu bei. In dieser Studie traten Anschlussdegenerationen bevorzugt bei älteren Patienten auf oder nach vorbestehenden degenerativen Erkrankungen wie z.B. Spinalkanalstenosen [116].

In der Studie von Axelsson et al. wurden Patienten in einem Zeitraum von 5 Jahren nach Fusionsoperationen auf Anzeichen für ein Fortschreiten von degenerativen Prozessen in den Anschlusssegmenten untersucht. Es konnte jedoch keine Veränderung der Bandscheibenhöhe, Facettengelenkshypertrophie oder eine Zunahme von Spinalkanalstenosen festgestellt werden. Daraus lässt sich schließen, dass sich die degenerativen Veränderungen in den benachbarten Segmenten nur sehr langsam entwickeln oder pathogenetisch nicht zwangsläufig mit der Fusionsoperation in Verbindung stehen. Patienten mit chronischen Rückenbeschwerden haben teilweise multiple degenerative Zeichen von Wirbelsäulenveränderungen und eventuell eine genetische, funktionelle oder habituelle Disposition. Die Anschlussproblematik könnte sich daher auch im Verlauf der Jahre ohne diese vorbestehende Operation ergeben [117].

Eine weitere Erklärung für die gleichbleibende Gesamtbeweglichkeit der LWS in unserer Studie könnte zudem folgende sein: Vor der Operation verhinderten Schmerzen bei den Flexions- und Extensionsbewegungen der Patienten das Erreichen der bestmöglichen ROM. Bei Patienten mit Spinalkanalstenose oder Facettengelenksarthrose ist zudem bekannt, dass Extensionsbewegungen eine Schmerzverstärkung hervorrufen. Die Bewegungsübungen wurden nicht bis zum maximalen Endpunkt durchgeführt, sondern vorzeitig abgebrochen. Nach der Operation war die Beweglichkeit zwar durch die Fusionsoperation eingeschränkt, aufgrund des verminderten Schmerzniveaus der Patienten haben sie die ROM-Übungen postoperativ jedoch besser ausgeführt und daher ein gleiches Resultat bei den Übungen erzielt.

Die Beobachtung, dass die ROM der LWS nach der Operation gleich bleibt, könnte auch ein wichtiger Aspekt für die Patienten als Entscheidungskriterium für eine operative Versorgung sein. Der Ausdruck Fusion- oder Versteifungsoperation wird in der Bevölkerung sehr häufig als beängstigend empfunden, weil viele damit eine Funktionseinschränkung im täglichen Leben befürchten. Bleib die Gesamtbeweglichkeit der Lendenwirbelsäule allerdings erhalten, sind keine negativen Auswirkungen auf die gewohnte Lebenssituation zu erwarten.

Für die meisten Aktivitäten des täglichen Lebens stellt eine verminderte Flexionsbeweglichkeit der Lendenwirbelsäule keinen einschränkenden Befund dar. Bei den meisten Alltagsbewegungen wird nur ein kleiner Teil des möglichen Bewegungsausmaßes der Lendenwirbelsäule ausgenutzt. Messungen der maximalen Range of Motion mit einem Inclinometer haben für die Flexion der Wirbelsäule ein durchschnittliches Bewegungsausmaß von 52° ergeben, für die Extension 19°. Insgesamt variieren die Angaben zur maximalen ROM in der Literatur bei der Flexion von 42-65° und bei der Extension von 12-29°. Es bestehen demnach große Variationen in der Wirbelsäulenbeweglichkeit, was auch in anderen Studien zu beobachten ist [37,39,43].

Funktionell wird von Patienten bei den Aktivitäten des täglichen Lebens lediglich ein kleiner Prozentsatz ausgenutzt. Bei 15 verschiedenen Aktivitäten des täglichen Lebens waren die erforderlichen Winkel für Flexion / Extension von 3-49 (Median: 9 Grad), was einen Prozentsatz von 4%-59% (Median: 11%) der kompletten Beweglichkeit ausmacht. Das Alter der Patienten stellt einen signifikanten, prädisponierenden Faktor für eine reduzierte Beweglichkeit dar und ist eines der Hauptkriterien für Einschränkungen in täglichen Bewegungsabläufen [40,44].

Der Messsensor des Epionics SPINE ist in 7 Segmente eingeteilt und hat immer die gleiche, standardisierte Größe. Diese Messsegmente stimmen allerdings nicht exakt mit den individuell variablen anatomischen Bewegungssegmenten der Patienten überein. Daraus resultieren Überschneidungen zweier benachbarter Bewegungssegmente bei den Messungen, was dann zu einer Unschärfe bei der Abgrenzung von Bewegungssegmenten führt. Daher war leider auch keine Auswertung der Daten hinsichtlich einer genauen Lokalisation möglich, wie z.B. Bewegungssegmente oberhalb, unterhalb oder auf Höhe der Fusion getrennt voneinander zu analysieren. Die verwendeten Messstreifen in unserer Studie waren ein erster Prototyp der Firma Epionics SPINE. Im weiteren Verlauf wurden die Messsegmente verkleinert, so dass 12 Segmente pro Messstreifen eine höhere örtliche Auflösung hervorbrachten und detailliertere Analysen der Beweglichkeit möglich wurden.

Auch die Applikationsart des Messgeräts beim Patienten birgt eine kleine Fehlerquelle in sich. Durch die externe Befestigung mit Tape auf der Haut des Patienten liegt das Messgerät nicht direkt der Wirbelsäule an, sondern wird durch die dazwischen liegenden Weichteile getrennt. Es könnte dadurch zu einem geringfügigen, variablen Fehler bei der genauen Wirbelsäulenbeweglichkeitsmessung kommen (z.B. adipösen Patienten).

Ein weiterer Grund für das Ergebnis in unserer Studie, dass keine signifikanten Änderungen bei der Gesamtbeweglichkeit der LWS auftreten, könnte sein, dass die knöcherne Fusion im operierten Segment noch nicht vollständig vollzogen war und somit noch eine minimale Restbeweglichkeit über den Segmenten der Fusionsoperation gemessen wurde.

Verschiedene biomechanische Studien scheinen aufzuzeigen, dass dorsale Instrumentierungen das jeweilige Bewegungssegment allerdings nicht vollständig immobilisieren können. Mit dieser Thematik beschäftigt sich auch eine Studie von Bono et al. aus dem Jahr 2007. Dort wurden vier verschiedene Fusionsarten (u.a. ALIF und PLIF) anhand eines 3-dimensionalen menschlichen Bewegungssegmentes L3-5 auf ihre Residualbeweglichkeit nach Versteifungsoperationen untersucht. Bei der ALIF-Technik wurden Fusionsraten zwischen 0,8-3,3° gemessen, bei der PLIF-Technik 0,7-6,9°. Demnach sind nach Fusionsoperationen kleine Bewegungen im versteiften Segment je nach Technik tolerabel, um noch als solide Fusion zu gelten. Je nach Art

der Fusionstechnik und Lokalisation bestehen Unterschiede in der Ausprägung der Restbeweglichkeit [118].

Man begründet eine Restbeweglichkeit nach Fusionsoperationen mit der Tatsache, dass Knochengewebe unter mechanischer Belastung verbiegbare ist. Durch diese Verformbarkeit sind kleine Bewegungsausmaße in fusionierten Segmenten erklärbar. Ein weiterer Erklärungsansatz ist, dass technisch bedingt keine feste Osteosynthese bei Wirbelsäulenoperationen möglich ist, da die Pedikelschrauben größtenteils in der Spongiosa verankert sind und nicht im stabilerem Knochenanteil der Kortikalis.

Bei der Durchführung der Bewegungsmessungen kommt es auf die Motivation und die Schmerztoleranz der einzelnen Patienten an, wie weit die maximale mögliche Bewegungsamplitude durchgeführt wird. Ängstliche und schmerzempfindliche Patienten brechen die Übungen früher ab als Personen mit geringerem Schmerzempfinden. Nach der Operation hatten manche Patienten noch Bedenken das volle Bewegungsausmaß abzurufen, weil sie keine schädliche Bewegung für das Implantat und ihren Heilungsprozess durchführen wollten. Auch dies ist ein zu beachtender Einflussfaktor auf die Bewegungsmessung.

Da bei den untersuchten Patienten die präoperative Beweglichkeitsmessung erst direkt vor der anstehenden Fusionsoperation durchgeführt wurde, ist anzunehmen, dass sich bereits aufgrund der chronischen Schmerzsituation und der langen Dauer der Erkrankung eine Einschränkung der LWS-Beweglichkeit im Vergleich zu gesunden Patienten manifestiert hat. Dies könnte u.a. durch eine Degeneration oder Atrophie der Rückenmuskulatur verursacht sein. Auch Verspannungen der Muskulatur durch Fehlhaltungen / Schonhaltungen und das Vermeiden von schmerzhaften Bewegungen könnte zu einer schlechteren Beweglichkeit zum Zeitpunkt der ersten Messung geführt haben.

Durch den relativ kurzen Nachbeobachtungszeitraum sind bestimmte Aussagen der Studie noch nicht abschließend zu beurteilen.

Die Patienten haben sich zu den Zeitpunkten 4 und 8 Wochen postoperativ wegen des Operationstraumas noch nicht ausreichend mobilisiert und Gelegenheit gehabt, die paravertebrale Muskulatur wieder aufzubauen. Auch ist durch das Operationstrauma noch immer ein Schmerzeinfluss und Weichteilschaden gegeben und die ossäre Fusion ist noch nicht vollständig abgeschlossen sein. Daher wären Untersuchungen der Beweglichkeit im Langzeitverlauf unter zunehmender Schmerzreduktion und abgeschlossener knöcherner Konsolidierung von hohem Interesse.

Im Vergleich zu den bisherigen Möglichkeiten der Erfassung von Bewegungsumfängen oder sogenannten „Range of motion“ entsteht für die Patienten bei dem in der vorliegenden Studie

genutzten System keine Strahlenbelastung wie z.B. bei der Videofluoroscopie. Zudem erlaubt das System eine kontinuierliche Beurteilung und Beobachtung des gesamten Bewegungsablaufens. Bei den häufig verwendeten Methoden wie den Röntgen-Funktionsaufnahmen oder die klinischen Tests nach Schober und Ott können nur statische Momentaufnahmen der einzelnen Bewegungsabschnitte oder maximale Bewegungsauslenkungen erfasst werden. Auch können die Beweglichkeitsübungen der Patienten mit dem Epionics SPINE nach unterschiedlichen Aspekten analysiert werden. So kann z.B. nicht nur die sagittale Bewegungsrichtung, sondern mit Hilfe der dazugehörigen Software z.B. auch die Geschwindigkeit und andere Qualitäten des Bewegungsablaufes ermittelt werden. Reliabilität und Validität der gemessenen Daten von Epionics SPINE wurde mit dem „motion capturing system Vicon“ verglichen und publiziert [9].

Durch die Aufzeichnung der Bewegungsübungen können neu erhobene Daten mit vorangegangenen Untersuchungen verglichen werden, was zur Therapiekontrolle oder bei Verlaufsuntersuchung nützlich sein kann. Auch ermöglicht es eine bessere Planung des Therapiekonzeptes unter Kollegen, auch wenn diese zur Mitbeurteilung herangezogenen Fachkollegen nicht bei der Untersuchung anwesend waren. Die Untersuchungsergebnisse hängen somit nicht mehr nur von der jeweiligen Erfahrung und den subjektiven Untersuchungsbefunden des behandelnden Arztes ab.

Unerwünschte Nebenwirkungen sind bei der Durchführung der Messungen sehr gering, da es sich bei dem Epionics SPINE – System um eine nicht-invasive Methode handelt.

In Zukunft wird es deshalb von Interesse sein, das System Epionics SPINE weiterzuentwickeln und zu optimieren. Neben der erhöhten Messsensor-Anzahl auf den Messstreifen, um eine höhere Auflösung der Bewegungen zu erhalten, wurde ein zweiter Messstab bei den Übungen hinzugefügt. Die Messstäbe werden parallel zur Wirbelsäule jeweils ca. 5 cm paramedian auf dem Rücken des Patienten platziert. Man erhofft sich, durch diese Veränderungen noch weitere Informationen und Qualitäten von Bewegungen erfassen zu können, wie z.B. Rotationsbewegungen. Vielleicht wird es in Zukunft auch möglich sein, anhand von bestimmten Bewegungsmustern auf die zugrunde liegende Krankheit zu schließen.

Zu den weiteren Kritikpunkten der Studie zählen ein kleines, relativ inhomogenes Patientenkollektiv sowie ein zeitlich kurzer Nachbeobachtungszeitraum. Auch konnte eine lückenlose Datengewinnung nicht bei jedem Patienten realisiert werden und es gibt keine Kontrollgruppe mit gesunden Probanden, um die erhobenen Daten unseres Patientenkollektives zu vergleichen. Manche Patienten hatten bereits eine Wirbelsäulenoperation in der

Vergangenheit, andere nicht. Zudem wurden Nebenerkrankungen der Patienten nicht berücksichtigt.

Insgesamt kann man festhalten, dass die Fusionsoperation als eine adäquate Therapiemöglichkeit bei degenerativen Rückenerkrankungen unseres Patientenkollektives anzusehen ist, was durch die postoperativ verbesserten klinischen Werte unseres Patientenkollektives bestätigt werden konnte. Durch die Schmerzreduktion ist den Patienten ein erheblicher Leidensdruck genommen. Die Möglichkeit, wieder aktiv am gesellschaftlichen Leben teilzunehmen und ein eigenständiges Leben zu führen, wird deutlich verbessert.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass das Epionics SPINE eine gute non-invasive und strahlungsfreie Möglichkeit ist, um die dynamische Rückenform bei Patienten zu messen und auch im klinischen Alltag durchführbar ist. Außerdem konnten die weiter oben diskutierten Veränderungen der Wirbelsäulenbeweglichkeit im Therapieverlauf dargestellt werden.

6. Literaturverzeichnis

1. Gesundheitsberichterstattung, Gesundheit in Deutschland, Rückenschmerzen Kapitel 1.2.5.1., 2006, www.gbe-bund.de.
2. Lawrence JP, Greene HS, Grauer JN. Back pain in athletes. *J Am Acad Orthop Surg* 2006; 14(13): p. 726–35 In: Hammill RR, Beazell JR, Hart JM. Neuromuscular Consequences of Low Back Pain and Core Dysfunction. *Clin Sports Med* 2008; 27(3): p. 449–462.
3. Papageorgiou AC, Croft PR, Ferry S, Jayson MI, Silman AJ. Estimating the prevalence of low back pain in the general population. Evidence from the South Manchester Back Pain Survey. *Spine* 1995; 20(17): p. 1889–94 In: Hammill RR, Beazell JR, Hart JM. Neuromuscular Consequences of Low Back Pain and Core Dysfunction. *Clin Sports Med* 2008; 27(3): p. 449–462.
4. Statistisches Bundesamt, Krankheitskosten, Fachserie 12, Reihe 7.2, Kapitel 5.2, Kosten 2008 nach Krankheiten und Geschlecht. 2010; (Artikelnummer: 2120720089004), www.destatis.de.
5. Gesundheitsberichterstattung des Bundes, Gesundheit in Deutschland, Rückenschmerzen. 2012, www.gbe-bund.de.
6. Sato S, Demura S, Kobayashi H, Nagasawa Y. The Relationship and Its Change with Aging between ADL and Daily Life Satisfaction Characteristics in Independent Japanese Elderly Living at Home. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 2002; 21(4): p. 195-204.
7. Gödde S, Fritsch E, Dienst M, Kohn D. Influence of Cage Geometry on Sagittal Alignment in Instrumented Posterior Lumbar Interbody Fusion. *Spine* 2003; 28(15): p. 1693-1699.
8. Le Huec JC, Charosky S, Barrey C, Rigal J, Aunoble S. Sagittal imbalance cascade for simple degenerative spine and consequences: algorithm of decision for appropriate treatment. *Eur Spine J* 2011; 20(5): p. 699–703.
9. Taylor WR, Consmüller T, Rohlamn A. A novel system for the dynamic assessment of back shape. *Med Eng Phys*. 2010; 32(9): p. 1080-1083.
10. Brömme J, Mohokum M, Disch AC, Marnitz U. Interdisziplinäre multimodale Therapie versus konventioneller Behandlung chronischer Rückenschmerzen. Schmerz, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2015; p. 1-9, DOI 10.1007/s00482-014-1508-1
11. Kunze B, Drasseck T, Kluba T. Posteriore und transforaminale lumbale interkorporelle Fusion (PLIF/TLIF) zur Therapie des lokalisierten Segmentaufbrauchs der LWS. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie* 2011; 149(3): p. 312-316.

12. Bundeszentrale für politische Bildung, Bevölkerungsentwicklung und Altersstruktur, www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61544/entwicklung-der-altersstruktur, 2012; Webseitenzugriff 16.02.2017
13. Statistisches Bundesamt, Jeder zweite Erwachsene in Deutschland hat Übergewicht, www.destatis.de, Pressemitteilung vom 5.11.2014 -386/14
14. Haig AJ. Paraspinal denervation and the spinal degenerative cascade. *Spine* 2002; 2(5): p. 372–380.
15. Putz R, Pabst R. Atlas der Anatomie des Menschen, SOBOTTA, 21. Auflage, Band 2: Rumpf, Eingeweide, untere Extremitäten, Kapitel Rücken. Urban & Fischer Verlag, München Jena 2000; p. 1-47.
16. Wurzinger, LJ. Duale Reihe Anatomie, 1. Auflage, Kapitel C 1: Bewegungssystem – Rumpfwand: Rücken. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2007; p. 224 – 263.
17. Hu ZJ, Fang XQ, Fan SW. Iatrogenic injury to the erector spinae during posterior lumbar spine surgery: underlying anatomical considerations, preventable root causes, and surgical tips and tricks. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2013; DOI 10.1007/s00590-012-1167-9
18. Rückenmuskulatur des Menschen, Stand 04/2013, <http://www.britannica.com/EBchecked/media/121600/Muscles-of-the-back>.
19. Gelb DE, Lawrence MD, Lenke LG, Bridwell KH, Blanke K, McEnery KW. An Analysis of Sagittal Spinal Alignment in 100 Asymptomatic Middle and Older Aged Volunteers. *Spine* 1995; 20(12): p. 1351-1358.
20. Spitzer WO, LeBlanc FE, Dupuis M, et al. Scientific approach to the assessment and management of activity-related spinal disorders: a monograph for clinicians. Report of the Quebec Task Force on Spinal Disorders. *Spine* 1987; 12: p. 1–59 In: Andersson GB. Epidemiological features of chronic low back pain. *Lancet* 1999; 354(9178): p. 581–585.
21. Breusch S, Clarius M, Mau H, Sabo D. *Klinikleitfaden Orthopädie Unfallchirurgie*, 7. Auflage, Kapitel 10 und 18: Wirbelsäule, Neurologie und Neuroorthopädie - Querschnittlähmung. Urban & Fischer Verlag, München 2013; p. 347-407, 715-723.
22. Kirkaldy-Willis WH, Wedge JH, Yong-Hing K, Reilly J. Pathology and pathogenesis of lumbar spondylosis and stenosis. *Spine* 1978; 3(4): p. 319–328.
23. Müller M. *Chirurgie*, 9. Auflage, Kapitel: Neurochirurgie – Wurzelkompressions-syndrome, Medizinische Verlags- und Informationsdienste, Breisach 2007; p. 468-471.

24. Evidence report in: Treatment of lumbar spinal stenosis, Vol. 1. Rockville, MD: AHRQ, June 2001. AHRQ Health Technology Assessment Reports, Numbers 1–60. In: Watters WC 3rd, Baisden J, Gilbert TJ, Kreiner S, Resnick DK, Bono CM, Ghiselli G, Heggeness MH, Mazanec DJ, O'Neill C, Reitman CA, Shaffer WO, Summers JT, Toton JF. Degenerative lumbar spinal stenosis: an evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of degenerative lumbar spinal stenosis. *The Spine Journal* 2008; 8(2): p. 305-310.
25. Boden SD, Davis DO, Dina TS, Patronas NJ, Wiesel SW. Abnormal magnetic-resonance scans of the lumbar spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation. *J Bone Joint Surg Am* 1990; 72(3): p. 403-408.
26. Eck JC, Humphreys SC, Hodges SD. Adjacent segment degeneration after lumbar fusion: a review of clinical, biomechanical and radiologic studies. *Am J Orthop* 1999; 28: p. 336–343.
27. Newman PH, Stone KH. The etiology of spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg* 1963; 45-B: p. 39-59.
28. Wiltse LL, Newman PH, Macnab I. Classification of spondylolysis and Spondylolisthesis. *Clin Orthop Relat. Res.* 1976; 117: p. 23-29.
29. Wiltse LL, Rothman LG. Spondylolisthesis: Classification, diagnosis, and natural History. *Semin Spine Surg* 1989; 1(2): p. 78–94.
30. Wild A, Seiler K, Krauspe R. Operative Therapie bei Spondylolyse und Spondylolisthese. *Orthopäde* 2005; 34(10): p. 995–1006.
31. Niethard FU, Pfeil J. *Duale Reihe Orthopädie, 5. korrigierte Auflage. Teil A: Kapitel 2 + 3: Orthopädische Diagnostik und Therapie, Teil C: Kapitel 1: Wirbelsäule.* Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2005; p. 7-79, 324-384.
32. Gleixner C, Müller M, Wirth S. *Neurologie und Psychiatrie. 6. Auflage, Kapitel: Neurologische Untersuchung, Apparative Diagnostik – Nervenleitgeschwindigkeit.* Medizinische Verlags- und Informationsdienste, Breisach 2007; p. 1-20, 28-30.
33. Trepel M. *Neuroanatomie, 3. Auflage, Kapitel 2: Peripheres Nervensystem.* Elsevier Urban & Fischer, München Jena 2004; p. 21-80.
34. Don AS, Carragee E. A brief overview of evidence-informed management of chronic low back pain with surgery. *Spine Journal* 2008; 8(1): p. 258-265.

35. Ferrell BA. Pain management in elderly people. *J AM Geriatr Soc* 1991; 39: p. 64-73 In: Cloyd JM., Acosta FL jr, Ames CP, Complications and Outcomes of Lumbar Spine Surgery in Elderly People: A Review of the Literature. *J Am Geriatr Soc* 2008; 56(7): p. 1318-1327.
36. Harms J. Diagnostik - Klinische Untersuchung. PDF-Download C02, Webseitenaufruf am 16.4.2013, www.harms-spinesurgery.com.
37. Ng JK, Kippers V, Richardson CA, Parnianpour M. Range of Motion and Lordosis of the Lumbar Spine: Reliability of Measurement and Normative Values. *Spine* 2001; 26(1): p. 53–60.
38. Loeble WY. Measurements of spinal posture and spinal range in spinal movements. *An Phys Med* 1967; 9: p. 103.
39. Mayer TG, Tencer AF, Kristoferson S, Mooney V. Use of non-invasive techniques for quantification of spinal range-of-motion in normal subjects and chronic low-back dysfunction patients. *Spine* 1984; 9(6): p. 588-595.
40. Bible JE, Biswas D, Miller CP, Whang PG, Grauer JN. Normal Functional Range of Motion of the Lumbar Spine During 15 Activities of Daily Living. *J Spinal Disord Tech* 2010; 23(2): p. 106-112.
41. Okawa A, Shinomiya K, Komori H, Muneta T, Arai Y, Nakai O. Dynamic motion study of the whole lumbar spine by videofluoroscopy. *Spine* 1998; 23(16): p. 1743-1749.
42. Post RB, Leferink VJ. Spinal mobility: sagittal range of motion measured with the SpinalMouse: a new non-invasive device. *Arch Orthop Trauma Surg* 2004; 124(3): p. 187–192.
43. Portek I, Percy MJ, Reader GP, Mowat AG. Correlation between radiographic and clinical measurement of lumbar spine movement. *Br J Rheumatol* 1983; 22(4): p. 197-205.
44. Harvey SB, Smith FW, Hukins DWL. Measurement of Lumbar Spine Flexion-Extension Using a Low-Field Open-Magnet Magnetic Resonance Scanner. *Investigative Radiology* 1998; 33(8): p. 439-443.
45. Windolf M, Götzen N, Morlock M, Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems - exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of Biomechanics* 2008; 41(12): p. 2776– 2780.

46. Novevlline RA. Sequire's Radiologie - Grundlagen der klinischen Diagnostik. 2.Auflage, Kapitel 2 und 18: Die bildgebenden Verfahren der Radiologie – Computertomographie, Dreidimensionale CT, Magnetresonanztomographie, Das zentrale Nervensystem - Tiefsitzende Rückenschmerzen und lumbale Bandscheibenerkrankungen. F. K. Schattauer Verlagsgesellschaft, Stuttgart New York 2001; p. 28-37, 520-523.
47. Ragab A, deShazo RD. Management of Back Pain in Patients with Previous Back Surgery. *The American Journal of Medicine* 2008; 121(4): p. 272-278.
48. Fritsch EW. Spondylolisthesis. *Der Orthopäde*, Springer Verlag 2003; 32: p. 340–361. DOI 10.1007/s00132-003-0453-y
49. Park BE, Kitya D. Myelography as a Stand-Alone Diagnostic Procedure for Degenerative Spine Disease in Developing Nations. *World Neurosurgery* 2010; 73(4): p. 285-288.
50. Kretz FJ, Schäffer J. Anästhesie, Intensivmedizin, Notfallmedizin, Schmerztherapie. 5.Auflage, Kapitel 42-44: Schmerzdiagnostik und –anamnese, Methoden der Schmerztherapie und Spezielle Schmerztherapie, Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2008; p. 449-472.
51. van Tulder MW, Touray T, Furlan AD, Solway S, Bouter LM. Muscle Relaxants for Nonspecific Low Back Pain: A Systematic Review Within the Framework of the Cochrane Collaboration. *Spine* 2003; 28(17): p. 1978–1992.
52. Lüllmann, H, Mohr K, Hein L. Pharmakologie und Toxikologie, 16. Auflage, Kapitel 18, 19 und 21: Bewegungsapparat, Nozizeptives System und Zentralnervensystem. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York 2006; p. 252-300, 310-357.
53. Di Iorio D, Henley E, Doughty A. A survey of primary care physician practice patterns and adherence to acute low back problem guidelines. *Arch Fam Med* 2000; 9: p. 1015 – 1021.
54. Cherkin DC, Wheeler KJ, Barlow W, Deyo RA. Medication use for low back pain in primary care. *Spine* 1998; 23: p. 607–614.
55. Bodack MP, Monteiro M. Therapeutic exercise in the treatment of patients with lumbar spinal stenosis. *Clin Orthop* 2001; 384: p. 144–152.
56. Delauche-Cavallier MC, Budet C, Laredo JD, Debie B, Wybier M, Dorfmann H, Ballner I. Lumbar disc herniation Computed tomography scan changes after conservative treatment of nerve root compression. *Spine* 1992; 17(8): p. 927–933.
57. Johnsson KE, Rosen I, Udén A. The natural course of lumbar spinal stenosis. *Clin Orthop Relat Res* 1992; 279: p. 82–86.

58. Kabins MB, Weinstein JN. The history of vertebral screw and pedicle screw fixation. *The Iowa Orthopedic Journal* 1991; 11: p. 127-136.
59. Harms JG, Jeszensky D. Die posteriore, lumbale, interkorporelle Fusion in unilateraler transforaminaler Technik, *Operative Orthopädie und Traumatologie*. Urban und Vogel, München 1998; 10: p. 90-102.
60. Audat Z, Moutasem O, Yousef K, Mohammad B. 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. *Singapore Med J* 2012; 53(3): p. 183-187.
61. Auerbach, JD, Jones KJ, Milby AH, Anakwenze OA, Balderston RA. Segmental contribution toward total lumbar range of motion in disc replacement and fusions: a comparison of operative and adjacent levels. *Spine* 2009; 34(23):p. 2510-2517.
62. Wiltse LL, Spencer CW. New uses and refinements of the paraspinous approach to the lumbar spine. *Spine* 1988; 13: p. 696–706.
63. Abbushi A, Cabraja M, Thomale UW, Woiciechowsky C, Kroppenstedt SN. The influence of cage positioning and cage type on cage migration and fusion rates in patients with monosegmental posterior lumbar interbody fusion and posterior fixation. *Eur Spine J* 2009; 18(11): p. 1621-1628.
64. Hackenberg L, Halm H, Bullmann V, Vieth V, Schneider M, Liljenqvist U. Transforaminal lumbar interbody fusion: a safe technique with satisfactory three to five year results. *Eur Spine J* 2005; 14: p. 551–558.
65. Moore KR, Pinto MR, Butler LM. Degenerative disc disease treated with combined anterior and posterior arthrodesis and posterior instrumentation. *Spine* 2002; 27(15): p. 1680-1686.
66. Villavicencio AT, Burneikiene S, Roeca CM, Nelson EL, Mason A. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion. *Surg Neurol Int* 2010; 1(12), DOI: 10.4103/2152-7806.63905.
67. Tian NF, Wu YS, Zhang XL, Xu HZ, Chi YL, Mao FM. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: a meta-analysis based on the current evidence. *Eur Spine J* 2013; DOI 10.1007/s00586-013-2747-z.
68. Martin BI, Mirza SK, Comstock BA, Comstock BA, Gray DT, Kreuter W, Deyo RA. Are lumbar spine reoperation rates falling with greater use of fusion surgery and new surgical technology? *Spine* 2007; 32(19): p. 2119-2126.

69. Terman SW, Yee TJ, Lau D, Khan AA, La Marca F, Park P. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: comparison of clinical outcomes among obese patients. *J Neurosurg Spine* 2014; 20: p. 644–652.
70. Errico TJ. Why a mechanical disc? *The Spine Journal* 2004; 4(6): p. 151–157.
71. World Health Organisation. BMI classification. Webseitenzugriff am 16.4.2013, http://apps.who.int/bmi/index.jsp?introPage=intro_3.html.
72. Fairbank JC, Couper J, Davies JB, O'Brien JP. The Oswestry low back pain disability questionnaire. *Physiotherapy* 1980; 66(8): p. 271-273.
73. Gronblad M, Hupli M, Wennerstrand P, Järvinen E, Lukinmaa A, Kouri JP, Karaharju EO. Intercorrelation and test–retest reliability of the Pain Disability Index (PDI) and the Oswestry Disability Questionnaire (ODQ) and their correlation with pain intensity in low back pain patients. *Clin J Pain* 1993; 9(3): p. 189–195.
74. Roland M, Fairbank J. The Roland-Morris Disability Questionnaire and the Oswestry Disability Questionnaire. *Spine* 2000; 25(24): p. 3115-3124.
75. Bullinger M. Erfassung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität mit dem SF-36-Health Survey, Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz. Springer-Verlag 2000; 43: p. 190-197.
76. Zanolli G, Jönsson B, Strömqvist B. SF-36 scores in degenerative lumbar spine disorders. *Acta Orthopaedica* 2006; 77(2): p. 298-306.
77. Ware JE. SF-36 Health Survey Update. *Spine* 2000; 25(24): p. 3130-3139.
78. Ware JE. User's Manual for the SF-36v2 Health Survey. Second Edition, Chapter 7, 2007; p. 81-84.
79. Roland M, Morris R. A Study of the natural history of low back pain, Part I: Development of a reliable and sensitive measure of disability in low-back pain. *Spine* 1983; 8(2): p. 141-144.
80. Fujiwara A, Tamai K, Yamato M, An HS, Yoshida H, Saotome K, Kurihashi A. The relationship between facet joint osteoarthritis and disc degeneration of the lumbar spine: an MRI study. *Eur Spine J* 1999; 8(5): p. 396-401.
81. Fujiwara A, Tamai K, An HS, Kurihashi T, Lim TH, Yoshida H, Saotome K. The Relationship Between Disc Degeneration, Facet Joint Osteoarthritis, and Stability of the Degenerative Lumbar Spine. *Journal of Spinal Disord* 2000; 13(5): p. 444–450.
82. Pathria M, Sartoris DJ, Resnick D. Osteoarthritis of the facet joints: accuracy of oblique radiographic assessment. *Radiology* 1987; 164(1): p. 227-230.

83. Modic MT, Masaryk TJ, Ross JS, Carter JR. Imaging of degenerative disk disease. *Radiology* 1988; 168(1): p. 177-186.
84. Toyone T, Takahashi K, Kitahara H, Yamagata M, Murakami M, Moriya H. Vertebral bone-marrow changes in degenerative lumbar disc disease. An MRI study of 74 patients with low back pain. *J Bone Joint Surg Br* 1994; 76: p. 757–764.
85. Zhang YH, Zhao CQ, Jiang LS, Chen XD, Dai LY. Modic changes: a systematic review of the literature. *Eur Spine J* 2008; 17: p. 1289–1299.
86. Meyerding HW. Spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Br* 1931, 13: p.39 In: Fritsch EW. *Spondylolisthesis. Der Orthopäde*, Springer Verlag 2003; 32: p. 340–361. DOI 10.1007/s00132-003-0453-y
87. Rosenberg NJ. Degenerative spondylolisthesis: Predisposing factors. *J Bone Joint Surg Am* 1975; 57(4): p. 467–474.
88. Wiltse LL, Winter RB. Terminology and Measurement of Spondylolisthesis. *The Journal of Bone and Joint Surgery* 1983; 65(6): p. 768-772.
89. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J* 2002; 11(1): p. 80–87.
90. Lee JC, Cha JG, Kim Y, Kim YI, Shin BJ. Quantitative Analysis of Back Muscle Degeneration in the Patients With the Degenerative Lumbar Flat Back Using a Digital Image Analysis Comparison With the Normal Controls. *Spine* 2008; 33(3): p. 318–325.
91. Bedienungsanleitung SpineDMS-System (Prototyp). Epionics Medical GmbH, Potsdam, Stand 24.08.2009
92. Fink W, Haidinger G. Die Häufigkeit von Gesundheitsstörungen in 10 Jahren Allgemeinpraxis. *Z Allg Med* 2007; 83: p. 102–108.
93. Statistisches Bundesamt. Hüftgelenksarthrose und Rückenschmerzen häufigste Reha-Diagnosen. 2003; Pressemitteilung Nr. 280 vom 1.7.2005.
94. Börm W, Meyer F. *Spinale Neurochirurgie - Operatives Management von Wirbelsäulenerkrankungen*, Kapitel 6: Krankheitsbilder - degenerative Erkrankungen. Schattauer, Stuttgart New York 2008; p. 55-113.
95. Wu RH, Fraser JF, Härtl R. Minimal Access Versus Open Transforaminal Lumbar Interbody Fusion. *Spine* 2010; 35(26): p. 2273–2281.
96. Glassman S, Gornet MF, Branch C, Polly D, Peloza J, Schwender JD, Carreon L. MOS Short Form 36 and Oswestry Disability Index outcomes in lumbar fusion: a multicenter experience. *Spine Journal* 2006; 6(1): p. 21-26.

97. Meade TW, Dyer S, Browne W, Townsend J, Frank AO. Low back pain of mechanical origin: randomized comparison of chiropractic and hospital outpatient treatment. *BMJ* 1990; 300: p.1431–1437.
98. Hägg O, Fritzell P, Nordwall A. The clinical importance of changes in outcome scores after treatment for chronic low back pain. *Eur Spine J* 2003; 12(1): p.12–20.
99. Ware JE, Kosinski M, Keller SK. SF-36 Physical and Mental Health Summary Scales: A User's Manual. Boston, The Health Institute, 1994. In: Glassman S, Gornet MF, Branch C, Polly D, Pelozo J, Schwender JD, Carreon L. MOS Short Form 36 and Oswestry Disability Index outcomes in lumbar fusion: a multicenter experience. *Spine Journal* 2006; 6(1): p. 21-26.
100. FDA Protocol G000137. A prospective, randomized clinical investigation of recombinant human bone morphogenetic protein-2 and compression resistant matrix with the CD Horizon spinal system for posterolateral lumbar fusion in patients with symptomatic degenerative disc disease. Medtronic Sofamor Danek, Memphis, Tennessee, 2002 In: Glassman S, Gornet MF, Branch C, Polly D, Pelozo J, Schwender JD, Carreon L. MOS Short Form 36 and Oswestry Disability Index outcomes in lumbar fusion: a multicenter experience. *Spine Journal* 2006; 6(1): p. 21-26.
101. Mitnitski AB, Mogilner AJ, MacKnight C, Rockwood K. The accumulation of deficits with age and possible invariants of aging. *Scientific World Journal* 2002; 2: p. 1816-1822.
102. Bridwell KH. Point of View. *Spine* 1996; 21: p. 1807 In: Gödde S, Fritsch E, Dienst M, Kohn D. Influence of Cage Geometry on Sagittal Alignment in Instrumented Posterior Lumbar Interbody Fusion. *Spine* 2003; 28(15): p. 1693-1699.
103. Barrey C, Jund J, Nosedo O, Roussouly P. Sagittal balance of the pelvis-spine complex and lumbar degenerative diseases: a comparative study about 85 cases. *Eur Spine J* 2007; 16: p.1459–1467.
104. Jensen MC, Brant-Zawadzki MN, Obuchowski N, Modic MT, Malkasian D, Ross JS. Magnetic resonance imaging of the lumbar spine in people without back pain. *N Engl J Med* 1994; 331(2): p. 69-73.
105. Boden SD, Davis DO, Dina TS, Patronas NJ, Wiesel SW. Abnormal magnetic-resonance scans of the lumbar spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation. *J Bone Joint Surg Am* 1990; 72(3): p. 403-408.

106. Cheng F, You J, Rampersaud YR. Relationship between spinal magnetic resonance imaging findings and candidacy for spinal surgery. *Canadian Family Physician* 2010; 56(9): p. 323-330.
107. Han I-H, Suh SH, Kuh SU, Chin DK, Kim KS. Types and Prevalence of Coexisting Spine Lesions on Whole Spine Sagittal MR Images in Surgical Degenerative Spinal Diseases. *Yonsei Med Journal* 2010; 51(3): p. 414-420.
108. Danneels L, Cools AM, Vanderstraeten GG, Cambier DC, Witvrouw EE, Cuyper HJ. Differences in electromyographic activity in the multifidus muscle and the iliocostalis lumborum between healthy subjects and patients with sub-acute and chronic low back pain. *Eur Spine J* 2002; 11: p. 13-19.
109. Movahed M, Ohashi JY, Kurustien N, Izumi H, Kumashiro M. Fatigue sensation, electromyographical and hemodynamic changes of low back muscles during repeated static contraction. *Eur J Appl Physio* 2010; 111(3): p. 459-467.
110. Kahanovitz N, Viola K, Gallagher M. Long-term strength assessment of postoperative discectomy patients. *Spine* 1989; 14: p. 402–403 In: Park Y, Ha JW. Comparison of One-Level Posterior Lumbar Interbody Fusion Performed With a Minimally Invasive Approach or a Traditional Open Approach. *Spine* 2007; 32(5): p. 537–543.
111. Gejo R, Matsui H, Kawaguchi Y, Ishihara H, Tsuji H, Serial changes in trunk muscle performance after posterior lumbar surgery. *Spine*, 1999; 24(10): p. 1023-1028.
112. Ghiselli G, Wang JC, Bhatia NN, Hsu WK, Dawson EG. Adjacent segment degeneration in the lumbar spine. *J Bone Joint Surg Am* 2004; 86-A(7): p. 1497-1503.
113. Park P, Garton HJ, Gala VC, Hoff JT, McGillicuddy JE. Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature. *Spine* 2004; 29: p. 1938–1944.
114. Sears WR, Sergides IG, Kazemi N, Smithc M, Whitec GJ, Osburg B. Incidence and prevalence of surgery at segments adjacent to a previous posterior lumbar arthrodesis. *The Spine Journal* 2011; 11(1): p. 11–20.
115. Ekman P, Möller H, Shalabi A, Yu YX, Hedlund R. A prospective randomised study on the long-term effect of lumbar fusion on adjacent disc degeneration. *Eur Spine J* 2009; 18(8): p. 1175–1186.
116. Ahn DK, Park HS, Choi DJ, Kim KS, Yang SJ. Survival and Prognostic Analysis of Adjacent Segments after Spinal Fusion. *Clin Orthop Surg* 2010; 2(3): p. 140-147.
117. Axelsson P, Johnsson R, Strömqvist B. Adjacent segment hypermobility after lumbar spine fusion: No association with progressive degeneration of the segment 5 years after surgery. *Acta Orthopaedica* 2007; 78(6): p. 834–839.

118. Bono CM, Khandha A, Vadapalli S, Holekamp S, Goel VK, Garfin SR, Residual Sagittal Motion After Lumbar Fusion: A Finite Element Analysis With Implications on Radiographic Flexion-Extension Criteria. Spine 2007; 32(4): p. 417–422.

7. Anhang

7.1 Abkürzungsverzeichnis

Abb. = Abbildung

Ah = Ampere-Stunden

ALIF = Anteriore lumbale interkorporelle Fusion

ASD = Adjacent segment degeneration

BMI = Body-Mass-Index

BWS = Brustwirbelsäule

bzw. = beziehungsweise

ca. = Zirka

CC = Korrelationskoeffizienten

cm = Zentimeter

cm² = Quadratzentimeter

CT = Computertomographie

DMS = Dehnungsmessstreifen

d.h. = das heißt

EMG = Elektromyographie

FDA = Food and Drug Administration

GB = Gigabyte

HWS = Halswirbelsäule

Hz = Hertz

LWS = Lendenwirbelsäule

Lig. = Ligamentum

Max. = maximal

mAh = Milli-Ampere-Stunden

Mrd. = Milliarden

MRT = Magnetresonanztomographie

Min = Minute

Mm = Millimeter

NBS = Norm-based-score

NLG = Nervenleitgeschwindigkeit
NS = Nicht signifikant
ODI = Oswestry-Disability-Index
OP = Operation
Patient (en) = Pat.
PC = Personalcomputer
PLIF = Posteriore lumbale interkorporelle Fusion
Proc.= Processus
RMQ = Roland-Morris Disability Questionnaire
ROM = Range of motion
Food and Drug Administration = FDA
SD = Standardabweichung
SF- 36 = Short-Form 36
SF-36 PCS = Short-Form 36 Health Survey Physical status
SF-36 MCS = Short-Form 36 Health Survey Mental status
Sig. = Signifikanzen
Sog. = Sogenannt(e)
Std. = Stunde
STIR-Wichtung = Short-Tau Inversion Recovery-Wichtungen
TLIF = Transforaminale lumbale interkorporelle Fusion
u.a. = unter anderem
USB = Universal Serial Bus
V = Volt
VAS = Visuelle Analog Skala
WK = Wirbelkörper
WS = Wirbelsäule
3D = Dreidimensional

7.2 Fragebögen

Oswestry Disability Index

1. Schmerzintensität Punkte

- Ich toleriere den Schmerz gut ohne Gebrauch von Schmerzmedikamenten..... (0)
- Der Schmerz ist stark, aber ich komme ohne Schmerzmedikamente aus..... (1)
- Schmerzmedikamente führen zur kompletten Beschwerdefreiheit..... (2)
- Schmerzmedikamente führen zur Beschwerdeminderung..... (3)
- Schmerzmedikamente führen nur zu wenig Beschwerdeminderung..... (4)
- Schmerzmedikamente führen zu keiner Beschwerdeminderung und bringen nichts.... (5)

2. Körperpflege (waschen, anziehen, etc.)

- Ich kann mich gut selbst versorgen ohne zusätzlichen Schmerz zu verursachen..... (0)
- Ich kann mich gut selbst versorgen, aber es erzeugt zusätzlich Schmerzen..... (1)
- Es ist schmerzhaft sich selbst zu versorgen, ich bin langsam und vorsichtig..... (2)
- Ich brauche manchmal Hilfe, aber ich versorge mich meistens selbst..... (3)
- Ich brauche jeden Tag Hilfe in den meisten Angelegenheiten der Pflege..... (4)
- Ich kann mich nicht selbst anziehen, waschen mit Schwierigkeiten und bleibe im Bett..... (5)

3. Gewichte heben

- Ich kann schwere Gewichte heben ohne zusätzlichen Schmerz..... (0)
- Ich kann schwere Gewichte heben, aber mit zusätzlichen Schmerz..... (1)
- Schmerzen halten mich vom Heben schwerer Gewichte vom Boden ab, aber ich kann es machen wenn sie günstig liegen, z.B. auf dem Tisch..... (2)
- Schmerzen halten mich vom Heben schwerer Gewichte vom Boden ab, aber ich kann leichte bis mittelschwere Gewichte heben wenn sie günstig liegen..... (3)
- Ich kann nur sehr leichte Gewichte heben..... (4)
- Ich kann gar nichts heben oder tragen..... (5)

4. Gehstrecke / Hilfen

- Ich habe überhaupt keine Schmerzen beim Gehen..... (0)
- Ich kann vor Schmerzen nicht mehr als 1000 m gehen..... (1)
- Ich kann vor Schmerzen nicht mehr als 500 m gehen..... (2)
- Ich kann vor Schmerzen nicht mehr als 200 m gehen..... (3)
- Ich kann nur mit Gehstock oder -stütze laufen..... (4)
- Ich liege die meiste Zeit in Bett und muss zur Toilette kriechen..... (5)

5. Sitzen

- Ich kann in jedem Stuhl so lange sitzen wie ich möchte..... (0)
- Ich kann nur in einem speziellen Stuhl so lange sitzen wie ich möchte..... (1)
- Ich kann vor Schmerzen nicht mehr als 1 Stunde sitzen..... (2)
- Ich kann vor Schmerzen nicht länger als 30 Minuten sitzen..... (3)
- Ich kann vor Schmerzen nicht länger als 10 Minuten sitzen..... (4)
- Ich kann vor Schmerzen überhaupt nicht sitzen..... (5)

6. Stehen

- Ich kann stehen solange ich möchte ohne zusätzliche Schmerzen..... (0)
- Ich kann stehen solange ich möchte aber mit zusätzlichen Schmerzen..... (1)
- Ich kann vor Schmerzen nicht länger als 1 Stunde stehen..... (2)
- Ich kann vor Schmerzen nicht länger als 30 Minuten stehen..... (3)
- Ich kann vor Schmerzen nicht länger als 10 Minuten stehen..... (4)
- Ich kann vor Schmerzen überhaupt nicht stehen..... (5)

7. Schlafen

- Schmerzen stören meinen Schlaf nicht..... (0)
- Ich kann nur gut schlafen, wenn ich Tabletten einnehme..... (1)
- Selbst wenn ich Tabletten einnehme, kann ich nicht länger als 6 Stunden schlafen..... (2)
- Selbst wenn ich Tabletten einnehme, kann ich nicht länger als 4 Stunden schlafen..... (3)
- Selbst wenn ich Tabletten einnehme, kann ich nicht länger als 2 Stunden schlafen..... (4)
- Ich kann vor Schmerzen kaum schlafen..... (5)

8. Sexualleben

- Mein Sexualleben ist normal und verursacht keine zusätzlichen Schmerzen..... (0)
- Mein Sexualleben ist normal, aber es verstärkt meine Schmerzen..... (1)
- Mein Sexualleben ist nahezu normal, aber es ist sehr schmerzhaft..... (2)
- Mein Sexualleben ist erheblich eingeschränkt durch Schmerzen..... (3)
- Mein Sexualleben ist nahezu unmöglich durch Schmerzen..... (4)
- Schmerzen lassen ein Sexualleben nicht zu..... (5)

9. Soziale Stellung

- Mein soziales Leben ist normal und verursacht keine zusätzlichen Schmerzen..... (0)
- Mein soziales Leben ist normal, aber es verstärkt meine Schmerzen..... (1)
- Schmerzen haben keine wesentlichen Auswirkungen auf mein soziales Leben,
abgesehen von Einschränkungen meiner sportlichen Tätigkeiten..... (2)
- Schmerzen schränken mein soziales Leben ein, ich gehe selten aus..... (3)
- Schmerzen beschränken mein soziales Leben auf zu Hause..... (4)
- Ich habe durch meine Schmerzen kein soziales Leben..... (5)

10. Mobilität

- Ich kann überall hinfahren ohne zusätzliche Schmerzen..... (0)
- Ich kann überall hinfahren, aber es verursacht zusätzliche Schmerzen..... (1)
- Der Schmerz ist schlimm, aber ich kann mehr als 2 Stunden fahren..... (2)
- Schmerzen halten mich vom Fahren, die mehr als 1 Stunde dauern, ab..... (3)
- Schmerzen beschränken mich auf kurze Fahrten unter 30 Minuten..... (4)
- Schmerzen lassen gerade nur Fahrten zum Arzt oder Krankenhaus zu..... (5)

Roland-Morris Disability Questionnaire

1. Wegen meiner Rückenschmerzen bleibe ich den größten Teil des Tages zu Hause.
2. Ich wechsle 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 überrauniger 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.

Fragebogen zum Gesundheitszustand (SF-36)

1. Wie würden Sie Ihren Gesundheitszustand im Allgemeinen beschreiben?

- Ausgezeichnet..... 1
- Sehr gut..... 2
- Gut..... 3
- Weniger gut..... 4
- Schlecht..... 5

2. Im Vergleich zum vergangenen Jahr, wie würden Sie Ihren derzeitigen Gesundheitszustand beschreiben?

- Derzeit viel besser als vor einem Jahr..... 1
- Derzeit etwas besser als vor einem Jahr..... 2
- Etwa so wie vor einem Jahr..... 3
- Derzeit etwas schlechter als vor einem Jahr..... 4
- Derzeit viel schlechter als vor einem Jahr..... 5

3. Im Folgenden sind einige Tätigkeiten beschrieben, die Sie vielleicht an einem normalen Tag ausüben. Sind Sie durch Ihren derzeitigen Gesundheitszustand bei diesen Tätigkeiten eingeschränkt? Wenn ja, wie stark?

TÄTIGKEITEN	Ja, stark eingeschränkt	Ja, etwas eingeschränkt	Nein, überhaupt nicht eingeschränkt
a. anstrengende Tätigkeiten, z.B. schnell laufen, schwere Gegenstände heben, anstrengenden Sport treiben	1	2	3
b. mittelschwere Tätigkeiten, z.B. einen Tisch verschieben, staubsaugen, kegeln, Golf spielen	1	2	3
c. Einkaufstaschen heben oder tragen	1	2	3
d. mehrere Treppenabsätze steigen	1	2	3
e. einen Treppenabsatz steigen	1	2	3

f. sich beugen, knien, bücken	1	2	3
g. mehr als 1 Kilometer zu Fuß gehen	1	2	3
h. mehrere Straßenkreuzungen weit zu Fuß gehen	1	2	3
i. eine Straßenkreuzung weit zu Fuß gehen	1	2	3
j. sich baden oder anziehen	1	2	3

4. Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund Ihrer körperlichen Gesundheit irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause?

SCHWIERIGKEITEN	JA	NEIN
a. Ich konnte nicht so lange wie üblich tätig sein	1	2
b. Ich habe weniger geschafft als ich wollte	1	2
c. Ich konnte nur bestimmte Dinge tun	1	2
d. Ich hatte Schwierigkeiten bei der Ausführung (z.B. ich musste mich besonders anstrengen)	1	2

5. Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund seelischer Probleme irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause (z.B. weil Sie sich niedergeschlagen oder ängstlich fühlten)?

SCHWIERIGKEITEN	JA	NEIN
a. Ich konnte nicht so lange wie üblich tätig sein	1	2
b. Ich habe weniger geschafft als ich wollte	1	2
c. Ich konnte nicht so sorgfältig wie üblich arbeiten	1	2

6. Wie sehr haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen Wochen Ihre normalen Kontakte zu Familienangehörigen, Freunden, Nachbarn oder zum Bekanntenkreis beeinträchtigt?

- Überhaupt nicht..... 1
- Etwas..... 2
- Mäßig..... 3
- Ziemlich..... 4
- Sehr..... 5

7. Wie stark waren Ihre Schmerzen in den vergangenen 4 Wochen?

- Ich hatte keine Schmerzen..... 1
- Sehr leicht 2
- Leicht..... 3
- Mäßig..... 4
- Stark..... 5
- Sehr stark..... 6

8. Inwieweit haben die Schmerzen Sie in den vergangenen 4 Wochen bei der Ausübung Ihrer Alltagstätigkeiten zu Hause und im Beruf behindert?

- Überhaupt nicht..... 1
- Ein bisschen..... 2
- Mäßig..... 3
- Ziemlich..... 4
- Sehr..... 5

9. In diesen Fragen geht es darum, wie Sie sich fühlen und wie es Ihnen in den vergangenen 4 Wochen gegangen ist. Wie oft waren Sie in den vergangenen 4 Wochen...

BEFINDEN	Immer	Meistens	Ziemlich oft	Manchmal	Selten	Nie
a. ...voller Schwung	1	2	3	4	5	6
b. ...sehr nervös	1	2	3	4	5	6
c. ...so niedergeschlagen, dass Sie nichts aufheitern konnte?	1	2	3	4	5	6
d. ...ruhig und gelassen	1	2	3	4	5	6
e. ...voller Energie?	1	2	3	4	5	6
f. ...entmutigt und traurig	1	2	3	4	5	6
g. ...erschöpft	1	2	3	4	5	6
h. ... glücklich	1	2	3	4	5	6
i. ...müde	1	2	3	4	5	6

10. Wie häufig haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen Ihre Kontakte zu anderen Menschen (Besuche bei Freunden, Verwandten usw.) beeinträchtigt?

- Immer..... 1
- Meistens..... 2
- Manchmal..... 3
- Selten..... 4
- Nie..... 5

11. Inwieweit trifft jede der folgenden Aussagen auf Sie zu?

AUSSAGEN	Trifft ganz zu	Trifft weitgehend zu	Weiß nicht	Trifft weitgehend nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
a. Ich schein etwas leichter als andere krank zu werden	1	2	3	4	5
b. Ich bin genauso gesund wie alle anderen, die ich kenne	1	2	3	4	5
c. Ich erwarte, dass meine Gesundheit nachlässt	1	2	3	4	5
d. Ich erfreue mich ausgezeichneter Gesundheit	1	2	3	4	5

12. Wie würden Sie Ihren derzeitigen Gesundheitszustand beschreiben?

sehr gut o gut o mittelmäßig o schlecht o sehr schlecht o

8. Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Sören Zeitler, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Non invasive, quantitative Erfassung der dynamischen Rückenform und Beweglichkeit mit dem Epionics SPINE© bei Patienten mit mono- und bisegmentaler Lumbalfusion: Prä- und postoperative Verlaufsuntersuchungen nach lumbaler Fusions-Operation“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Hamburg, den 17.07.2017

Unterschrift

9. Lebenslauf

"Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht."

10. Danksagung

Zum Gelingen einer Doktorarbeit bedarf es neben der eigenen Anstrengung vielerlei Unterstützung, um ein solches Projekt zu realisieren. Mein Dank gebührt deshalb folgenden Personen:

Zunächst möchte ich Prof. Dr. med. Dr. h.c. Haas für die Überlassung des Themas danken.

Des Weiteren bedanke ich mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater PD Dr. med. Alexander Disch und meiner Betreuerin Dr. med. Claudia Druschel sowie bei Prof. Dr. med. Klaus-Dieter Schaser für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Forschungsthemas. Sie standen mir stets mit Rat und Tat zur Seite.

Für das Vertrauen, das mir im selbständigen Umgang mit den Patienten der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie entgegengebracht wurde und mir so ermöglichte eigene Ideen einzubringen, möchte ich mich ganz besonders bedanken.

Zudem möchte ich mich bei der Firma Epionics Spine und allen Ihren Mitarbeitern bedanken. Ohne die Bereitstellung des Messsystems und der dazugehörigen Software wäre die Arbeit in ihrer jetzigen Form nicht durchführbar gewesen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern Dipl. biol. Maren Zeitler und Dr. med. Nikolaus Zeitler sowie meiner Frau Catherine Zeitler für hilfreiche Diskussionen und die Motivation während meines gesamten Studiums.