

Aus der Orthopädischen Universitätsklinik mit Poliklinik Tübingen

Ganganalyse und Rasterstereographie bei Patienten vor
und nach Durchführung einer Wirbelsäulenoperation,
klinisch prospektive Studie

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Endreß, Sandra

2019

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. U. K. Hofmann

2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. Badke

Tag der Disputation: 08.08.2019

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	- 3 -
II.	Abkürzungsverzeichnis	- 5 -
III.	Abbildungsverzeichnis.....	- 6 -
IV.	Tabellenverzeichnis	- 7 -
1.	Einleitung	- 8 -
1.1	Die gesunde Wirbelsäule	- 10 -
1.1.1	Anatomie.....	- 10 -
1.1.1.1	Knochen.....	- 10 -
1.1.1.2	Neuroanatomie	- 11 -
1.1.2	Fortbewegung	- 12 -
1.1.2.1	Gangzyklus	- 12 -
1.1.2.3	Ganganalytische Parameter.....	- 16 -
1.1.3	Die menschliche Haltung	- 17 -
1.2	Krankheitsbilder der Wirbelsäule.....	- 19 -
1.2.1	Lumbalgie und Lumboischialgie.....	- 19 -
1.2.1.1	Diagnostik	- 20 -
1.2.2	Spinalkanalstenose.....	- 22 -
1.2.3	Nucleus pulposus Prolaps.....	- 23 -
1.3	Therapie.....	- 26 -
1.3.1	Konservative Therapie	- 26 -
1.3.2	Operative Therapie	- 27 -
1.3.2.1	Dorsale Fusion.....	- 27 -
1.3.2.2	Dekompression	- 28 -
1.3.2.3	Nukleotomie	- 29 -
1.4	Fragestellung	- 30 -
2.	Material und Methoden.....	- 31 -
2.1	Studiendesign	- 31 -
2.2	Patienten.....	- 32 -
2.3	Kontrollgruppe.....	- 33 -

2.4	Messapparatur für die Gang- und Standanalyse und Versuchsablauf ..	33 -
2.4.1	Laufbandergometer.....	35 -
2.4.3	WinFDM-T.....	37 -
2.4.4	Videokamera.....	39 -
2.5	Messapparatur für die Rasterstereographie und Versuchsablauf	40 -
2.6	Numerische Rating Skala (NRS).....	45 -
2.7	Datenverarbeitung.....	46 -
2.8	Statistische Auswertung.....	46 -
3.	Ergebnisse	48 -
3.1	Patienten.....	48 -
3.2	Ganganalyse	50 -
3.3	Standanalyse	55 -
3.4	Rasterstereographie.....	57 -
3.5	Subjektive Ansprache Numerische Rating Skala	64 -
3.5.1	Ergebnisse Numerische Rating Skala dorsale Fusionen	65 -
4.	Diskussion.....	68 -
4.1	Gang- und Standanalyse auf dem Laufband.....	69 -
4.2	Rasterstereographie.....	74 -
4.3	Studienlimitationen.....	78 -
5.	Zusammenfassung.....	80 -
6.	Literaturverzeichnis	81 -
7.	Anhang.....	89 -
7.1	Informationsblatt und Einverständniserklärung für Patienten	89 -
7.2	Screening Bogen.....	92 -
7.3	Zebris Report	93 -
7.4	RasterstereographieReport.....	95 -
7.5	Liste der Veröffentlichungen.....	96 -
8.	Erklärungen zum Eigenanteil	97 -

II. Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
4D	vierdimensional
Abb.	Abbildung
BMI	Body-Mass-Index
cm	Zentimeter
DL	linkes Lumbalgrübchen (dimple left)
DM	symmetrisch gelegener Punkt zwischen rechtem und linkem Lumbalgrübchen
DR	rechtes Lumbalgrübchen (dimple right)
h	Stunde
kg	Kilogramm
km	Kilometer
LF	lumbaledorsale Fusion
M. / Mm.	Musculus / Musculi
m	Meter
min.	Minute
mm	Millimeter
NRS	Numerische Rating Skala
NSAR	Nichtsteroidales Antirheumatikum
pAVK	periphere arterielle Verschlusskrankheit
präop.	präoperativ
postop.	postoperativ
s	Sekunde
SP	Sakrumpunkt
T12	Dornfortsatz des 12. Brustwirbels
Tab.	Tabelle
VP	Vertebra prominens (7. Halswirbel)
WHO	World Health Organisation

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Messapparatur:	- 34 -
Abbildung 2: Versuchsaufbau und Ablauf.....	- 36 -
Abbildung 3: Monitoransicht des WinFDM-T Programms während der Standanalyse.....	- 38 -
Abbildung 4: Monitoransicht des WinFDM-T Programms während der Ganganalyse.....	- 39 -
Abbildung 5: Videokamera der Firma „Canon“ zur Aufnahme der Studienteilnehmer während der Stand- und Ganganalysen.....	- 40 -
Abbildung 6: Versuchsaufbau der Rasterstereographie.....	- 42 -
Abbildung 7: Schematische Darstellung der anatomischen Fixpunkte und verwendeten Parameter der Rasterstereographie.....	- 45 -
Abbildung 8: Altersverteilung im Patientenkollektiv getrennt nach Geschlechtern.....	- 49 -
Abbildung 9: Altersverteilung im Kontrollkollektiv, getrennt nach Geschlechtern.- 49 -	
Abbildung 10: Differenz Fußrotation (°) nach dorsaler Fusion.....	- 52 -
Abbildung 11: Differenz der Schrittlänge nach dorsaler Fusion (cm).....	- 53 -
Abbildung 12: Differenz der Standphase (%) nach dorsaler Fusion	- 53 -
Abbildung 13: Doppelschrittlänge (cm) nach dorsaler Fusion.....	- 54 -
Abbildung 14: Schrittweite (cm) nach dorsaler Fusion	- 54 -
Abbildung 15: Kadenz (Schrittemin) nach dorsaler Fusion.....	- 55 -
Abbildung 16: Differenz der Gesamtbelastungsverteilung zwischen beiden Füßen (%) nach dorsaler Fusion.....	- 56 -
Abbildung 17: Rumpflänge VP-DM (mm) dorsale Fusionen und Differenz der Rumpflänge VP-DM (mm) dorsale Fusionen	- 59 -
Abbildung 18: Rumpfneigung VP-DM (°) dorsale Fusionen und Differenz der Rumpfneigung (°) dorsale Fusionen präoperativ zu postoperativ/perioperativ - 60 -	
Abbildung 19: Lotabweichung (°) dorsale Fusionen und Differenz Lotabweichung (°) dorsale Fusionen perioperativ.....	- 61 -
Abbildung 20: Kyphosewinkel (°) dorsale Fusionen und Differenz Kyphosewinkel (°) nach dorsaler Fusion perioperativ.....	- 62 -
Abbildung 21: Lordosewinkel (°) dorsale Fusionen perioperativ.....	- 63 -
Abbildung 22: Perioperative Schmerzbesserung auf der NRS in Abhängigkeit des Patientenalters und -geschlechtes	- 65 -
Abbildung 23: Besserung in Gruppen zu verschiedenen Messzeitpunkten des gesamten Patientenkollektivs und der Untergruppe nach dorsaler Fusion....	- 66 -

IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Studiendesign mit Übersicht der Messzeitpunkte und Messverfahren - 32 -	
Tabelle 2: Übersichtstabelle der verwendeten Apparaturen, aufgelistet mit Typ und Kontaktdaten.....	- 35 -
Tabelle 3: Deskriptive Statistik und Vergleich biometrischer Daten von Patienten- und Normkollektiv.....	- 50 -
Tabelle 4: Unterschiede der Ergebnisse der Ganganalyse zwischen Normkollektiv und gesamten Patientenkollektiv und Testung auf signifikante Unterschiede.	- 51 -
Tabelle 5: Vergleich innerhalb der Patientengruppe mit dorsaler Fusion zu verschiedenen Messzeitpunkten.....	- 52 -
Tabelle 6: Ergebnisse der Standanalyse zwischen Normkollektiv und gesamten Patientenkollektiv.....	- 56 -
Tabelle 7: Vergleich innerhalb der Patientengruppe nach dorsaler Fusion zu verschiedenen Messzeitpunkten.....	- 56 -
Tabelle 8: Ergebnisse der Rasterstereographie von Normkollektiv und gesamtem Patientenkollektiv und Testung auf signifikante Unterschiede.	- 58 -
Tabelle 9: Rasterstereographische Messergebnisse zu den verschiedenen Messzeitpunkten bei dorsalen Fusionen und longitudinaler Vergleich.....	- 58 -
Tabelle 10: Absolute und relative Häufigkeiten der Besserung der Schmerzintensität in Bezug auf die NRS nach Operation.....	- 64 -
Tabelle 11: Perioperative Werte auf der NRS für die Zeitpunkte präoperativ, postoperativ vor Entlassung, 3 Monate postoperativ und 1 Jahr postoperativ - 66 -	
Tabelle 12: Korrelationsanalyse zu verschiedenen Messzeitpunkten nach dorsaler Fusion in Bezug auf die NRS.....	- 67 -

1. Einleitung

Rückenbeschwerden sind in der modernen Gesellschaft ein sehr häufiges Problem. Dabei sind ca. 70% im Bereich der Lendenwirbelsäule lokalisiert^{1,2}. Bei Rückenschmerzen wird oft vom unteren Rücken gesprochen, „der Region unterhalb des Rippenbogens und oberhalb der Gesäßfalte“³, im englischen „low back pain“. Sie sind die am häufigsten vorkommenden Schmerzen⁴ und ihre Punktprävalenz beträgt geschätzt 9,4% weltweit. Sie liegt bei Männern etwas höher als bei Frauen und der Prävalenz-Höhepunkt wird mit etwa 80 Jahren erreicht⁵. Die Lebenszeitprävalenz wird mit 75-84% angegeben², wobei sich nur maximal ein Viertel davon auf chronische Rückenschmerzen bezieht⁶. Generell können anhaltende Schmerzzustände den zeitlichen Verlauf betreffend unterteilt werden in akute (<6 Wochen), akut persistierende(>6Wochen und <12 Wochen) und chronische (>12 Wochen) Schmerzen^{6,7}. Die oben aufgeführten Zahlen beziehen sich auf arbeitende, als auch auf nicht-arbeitende Personen. Chronische Rückenschmerzen treten gehäuft im mittleren Lebensalter auf¹ mit Höchstwerten in den älteren Altersgruppen⁵. Chronische Lumbalgien haben eine große sozialmedizinische Bedeutung. Von den gesetzlich Versicherten sind 26% der Patienten 2010 aufgrund von Kreuzschmerzen beim Arzt vorstellig geworden^{8,9}. Rückenschmerzen kosten das Gesundheitssystem ca. 8,4 Milliarden Euro pro Jahr (Stand 2006)⁶, hauptsächlich aufgrund von sekundären Kosten wie häufigen Fehltagen am Arbeitsplatz durch Krankschreibungen. Direkte Behandlungs- und Rehabilitationskosten machen nur etwa 15% der Kosten aus^{6,10}. Erkrankungen des muskuloskelettalen Systems stellen die häufigste Indikation der medizinischen Rehabilitation dar¹¹ und sind Spitzenreiter in Bezug auf die Arbeitsunfähigkeitstage in Deutschland¹². Lumbalgien sind der häufigste Grund für Arbeits- bzw. Erwerbsunfähigkeit weltweit⁵. Desweiteren sind bei etwa 12% der Frührentner Rückenschmerzen der Grund für den vorzeitigen Eintritt in den Ruhestand¹³. Nach den psychischen Erkrankungen und Verhaltensstörungen führen also muskulo-skelettale Erkrankungen die Statistiken der

Frühberentungen aufgrund verminderter Erwerbsfähigkeit in den letzten Jahren an³.

Es wird unterteilt in nicht-spezifischen und spezifischen Rückenschmerz. Bei letzterem ist die Rede von Wirbelkörperfrakturen, Osteoporose, Infektionen, Radikulopathien, Bandscheibenvorfällen, Spinalkanalstenosen, Tumoren und Metastasen im Bereich der Wirbelsäule und des Spinalkanals und Spondylarthritiden¹⁴. Von nicht-spezifischem Rückenschmerz ist die Rede, wenn die Untersuchungsergebnisse keine hinreichende Erklärung für die Beschwerden ergeben, keine krankhaften Prozesse oder Pathomechanismen zu finden sind. Gegen eine operative Therapie spricht sich die Nationale VersorgungsLeitlinie bei nicht-spezifischem Rückenschmerz aus³. Für die spezifischen Rückenschmerzen wurde über die letzten Jahrzehnte eine deutliche Verbesserung im Bereich der operativen Verfahren erzielt, so dass dies zu einer zunehmenden Zahl der Wirbelsäulenoperationen führte^{15,16}. In Anbetracht der tendenziell steigenden Operationszahl wird trotz technischer Verbesserungen über einen absoluten Anstieg der unzufriedenstellenden Verläufe berichtet. Daher ist es umso wichtiger, die Indikationsstellung kritisch einzuordnen und das eigene chirurgische Vorgehen zu reevaluieren. Als wesentliche Parameter für eine solche Betrachtung dienen die postoperative Schmerzbesserung und Funktion, wie beispielsweise das Gangbild. Sozio-ökonomisch gesehen ist nicht nur eine Schmerzverbesserung, sondern auch eine Wiederaufnahme der Arbeitstätigkeit als Erfolg anzusehen¹⁷. Angaben zu Schmerzen und Funktion können mithilfe von Fragebögen erhoben werden. Belastbare Daten zu tatsächlichen Änderungen von Haltung und Gangbild gibt es kaum, auch wenn hierfür technisch präzise und unkomplizierte Apparate zur Verfügung stehen^{18,19}.

1.1 Die gesunde Wirbelsäule

1.1.1 Anatomie

1.1.1.1 Knochen

Die Wirbelsäule besteht aus 33²⁰ Wirbeln, davon sieben zervikale, zwölf thorakale, fünf lumbale, fünf sakrale und vier coccygeale Wirbel, die durch Zwischenwirbelscheiben, sogenannte Disci intervertebralis, verbunden sind. Sie kann in vier Segmente untergliedert werden¹. Hierzu gehören die Halswirbelsäule, die Brustwirbelsäule, die Lendenwirbelsäule und die Sakralwirbelsäule, bzw. Os sacrum und Os coccygis, diese beiden Regionen machen beim Erwachsenen je einen Knochen aus, da die Wirbel anders als in den oberen Regionen eine feste Einheit bilden²⁰. Die Doppel-S-Form der Wirbelsäule entsteht durch die Lordose im Bereich der Hals- und Lendenwirbelsäule und durch die Kyphose im Bereich der Brust- und Sakralwirbelsäule.

Alle Wirbel sind grundsätzlich in zwei Teile unterteilt, in einen vorderen Teil, den Wirbelkörper, und in einen hinteren Teil, den Wirbelbogen²⁰. Der Bogen besteht aus zwei Bogenwurzeln und zwei Laminae, die vier artikulare Fortsätze, zwei transverse Fortsätze und einen Dornfortsatz aufweisen. Die Wirbelkörper bilden eine Säule. Man unterteilt biomechanisch in vordere und hintere Säule. Auch die hintere Säule trägt Last und sorgt somit für die Stabilität. Die Wirbelbögen schaffen einen schützenden Raum für das Rückenmark. Zusätzlich zu den Bandscheiben sind die Wirbel auch durch die artikulären Fortsätze verbunden. Die transversen Fortsätze und die Dornfortsätze dienen als Mittelstück für die Muskel- und Ligamentansätze. Die vier Kerben der Bogenwurzeln, jeweils zwei auf der oberen und zwei auf der unteren Seite, werden die intervertebralen Kerben genannt. Diese bilden bei miteinander verbundenen Wirbeln die Foramina intervertebralia, durch welche die Spinalnerven und Blutgefäße ziehen²⁰.

Die Wirbel bestehen aus der harten Knochenrinde (Kortikalis) und der darunter liegenden gut durchbluteten Spongiosa.

Die Zwischenwirbelräume mit den Bandscheiben bestehen aus dem zentralen galertartigen Nucleus pulposus und dem Anulus fibrosus, wobei axial auf den Nucleus auftreffende Kräfte in radiäre Zugkräfte des Anulus umgewandelt werden. Die Bandscheiben besitzen durch ihren hohen Flüssigkeitsanteil eine gute Pufferfunktion. Das Bewegungsausmaß wird durch den Anulus fibrosus und die hinteren Wirbelsäulenstrukturen limitiert. Bandscheiben sind nicht vaskularisiert und ernähren sich durch Diffusion. Im Alter degenerieren sie physiologischerweise.

Der Anulus fibrosus wird durch das hintere Längsband verstärkt, welches dorsal der Wirbelkörper verläuft. Ventral der Wirbelkörper verläuft das vordere Längsband¹.

1.1.1.2 Neuroanatomie

Beim Erwachsenen endet das Rückenmark am Conus medullaris in Höhe des 1. bis 2. Lendenwirbels. In der Cauda equina laufen die lumbalen und sakralen Nervenwurzeln weiter. Die Nervenwurzeln treten durch die Foramina intervertebralia aus.

Die lumbale Wirbelsäule besitzt fünf lumbale Spinalnerven, die von eins bis fünf nummeriert werden. Die entsprechende Nervenwurzel geht immer unterhalb des Wirbels ab, wie zum Beispiel die Wurzel L4 zwischen Wirbel L4 und L5 abgeht²¹.

Werden die Nervenwurzeln durch Kompression geschädigt, so entsteht eine radikuläre Symptomatik, bei der im jeweiligen betroffenen Segment neurologische Symptome wie Sensibilitätsstörungen, Paresen und Reflexausfälle auftreten können¹.

1.1.2 Fortbewegung

1.1.2.1 Gangzyklus

Der Gang ist eine sich durch wiederholende Bewegungsabläufe kennzeichnende Fortbewegungsweise, bei dem sich der Körper durch die abwechselnde Schwingung und Standfestigkeit der Extremitäten vorwärts bewegt²². Das eine Bein fungiert als Stütze, während das andere nach vorne schwingt, um den Standort zu wechseln. Danach findet ein Rollentausch statt und die Aufgaben werden gewechselt. Wenn beide Beine gleichzeitig Bodenkontakt haben, wird dabei das Körpergewicht von einem auf das andere Bein verlagert. Da das Gehen allerdings ein fließendes Ereignis ist, wurde für die akademische Betrachtung ein Anfangspunkt der Bewegung definiert. Ein Gangzyklus beginnt demnach mit dem Augenblick des Aufsetzens eines Fußes, dem sogenannten initialen Bodenkontakt²². Bei Menschen mit physiologischem Gangbild wird der Fuß mit der Ferse aufgesetzt. Da dies aber bei Pathologien wie Paresen oder Arthritis diesen Personen nicht möglich ist, wurde die allgemeine Formulierung des initialen Bodenkontaktes beschlossen²³.

Der Begriff Doppelschritt ist mit einem Gangzyklus gleichzusetzen. Er umfasst zwei nacheinander durchgeführte initiale Bodenkontakte desselben Beines. Jeder Doppelschritt beinhaltet zwei Schritte²².

1.1.2.2 Gangphasen

Generell kann der Gangzyklus in zwei Phasen unterteilt werden, zum einen in die Standphase und zum anderen in die Schwungphase. Dabei sind an die Phasen unterschiedliche funktionelle Anforderungen gebunden. So ist es möglich, dass in einer bestimmten Phase eine Körperhaltung adäquat erscheint, diese aber während einer anderen Phase eine Auffälligkeit darstellt²². Beim freien Gehen werden, um eine Stabilisierung des Rumpfes zu erreichen,

die Abdominalmuskeln und die Rückenextensoren beansprucht²⁴. Ebenso sind zeitliche Abläufe und die Stellung der Gelenkwinkel von Bedeutung.

Während der Standphase hat der Fuß durchgehend Kontakt zum Boden. Während der Schwungphase befindet sich der Fuß frei in der Luft ohne Kontakt zum Boden zu haben. Den Beginn der Schwungphase kennzeichnet die Ablösung der Zehen vom Boden. Die Stand- und Schwungphase wird nach den funktionellen Aufgaben wie Aufnahme der Körperlast, monopedaless Stützen und Vorschwingen des Beines in acht Subphasen untergliedert²².

Zur Aufnahme der Körperlast gehören der initiale Bodenkontakt und die Belastungsantwort. Den Beginn der Standphase kennzeichnet der initiale Bodenkontakt.

1. Initialer Bodenkontakt

Diese Phase ist gekennzeichnet durch den ersten Berührungskontakt des Fußes mit dem Boden. Dabei bereitet sich das Bein auf den Beginn der Standphase vor und bringt sich in die geeignete Position durch das Abrollen über seine Ferse. Der initiale Bodenkontakt folgt somit der terminalen Schwungphase.

2. Belastungsantwort

Die Belastungsantwort beschreibt die bipedale initiale Standphase, mit der ein Gangzyklus begonnen wird. Dabei haben beide Füße Bodenkontakt. Sie beginnt mit dem initialen Bodenkontakt und endet mit der Abhebung des kontralateralen Beines zum Schwung. Die Aufgaben in dieser Phase beinhalten eine Stoßdämpfung, die Stabilität bei der Aufnahme des Körpergewichts und die Weiterführung der Vorwärtsbewegung²². Durch kräftige Drehmomente in den Gelenken verlangt diese Phase den höchsten Grad an Muskelaktivität im gesamten Gangzyklus. Von der tiefen Rückenmuskulatur sind die beidseitigen Rumpffrotatoren und –extensoren beteiligt, um eine Stabilisierung des Rumpfes zu erreichen²⁴.

Zur Phase des monopodalen Stehens zählen die mittlere und die terminale Standphase. Während dieser Phase wird die gesamte Körperlast von dem Standbein getragen, während das kontralaterale Bein den Vorschwung beginnt. In dieser Phase lassen sich durch ihre Dauer Aussagen über die Stützfähigkeit des belasteten Beines treffen.

3. Mittlere Standphase

Diese Phase fängt mit der Abhebung des kontralateralen Beines an und wird durch die Verlagerung des Gewichtes auf den ipsilateralen Vorfuß beendet. Wichtig in dieser Phase ist eine Stabilität von Rumpf und Bein zu erreichen, während die Bewegung über den Fuß hinweg mit der Gewichtslast erfolgt.

4. Terminale Standphase

Der Beginn der Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Ferse vom Boden ablöst. Beendet wird sie durch den initialen Bodenkontakt des kontralateralen Beines. Das Gewicht ruht während der gesamten Phase vor dem Vorfuß. Die alleinige Aufgabe in dieser Phase besteht darin, den Körper über dem stehenden Fuß voranzubewegen.

Zur funktionellen Einheit des Vorschwings des Beines gehören die Vor-Schwungphase, die initiale, die mittlere und die terminale Schwungphase.

5. Vor-Schwungphase

Die Standphase wird beendet, indem die bipedale terminale Standphase durch den initialen Bodenkontakt des kontralateralen Beines eingeleitet wird, so dass wiederum beide Beine Kontakt zum Boden haben. Es handelt sich um eine Phase der Vorbereitung auf den Schwung, indem das Bein positioniert wird. Sie endet mit Ablösen der Zehen des ipsilateralen Beines. Der M. erector spinae der Seite des Referenzbeines wird bei Belastung des kontralateralen Beines beansprucht²⁴.

6. Initiale Schwungphase

Diese Phase beginnt durch das Ablösen des ipsilateralen Fußes vom Boden und endet, wenn die ipsilaterale Tibia die kontralaterale Tibia gekreuzt hat. Währenddessen befindet sich das kontralaterale Bein in der mittleren Standphase. Das Bein wird aus seiner zurückliegenden Position vorwärts gebracht.

7. Mittlere Schwungphase

Der Beginn manifestiert sich durch die Oppositionsstellung des Schwungbeines zum Standbein. Das Ende wird durch die vertikale Ausrichtung der Tibia des Schwungbeines angezeigt. Diese Phase zeichnet sich durch das Vorschwingen des ipsilateralen Beines aus.

8. Terminale Schwungphase

Den Anfang signalisiert die vertikale Ausrichtung der Tibia. Sobald das Vorschwingen beendet ist und der Fuß Kontakt zum Boden bekommt, ist diese Phase abgeschlossen. Zusätzlich zum vollständigen Vorschwingen ist die Vorbereitung auf den Stand ein wichtiger Punkt in dieser Phase²².

Die Standphase beansprucht innerhalb des Gangzyklus 60% und die Schwungphase 40% der Zeit. Die monopedale Standphase macht 40% der Zeit aus, welche das Pendant zur Schwungphase des kontralateralen Beines darstellt²². Die Dauer der Phasen ist geschwindigkeitsabhängig, sie ist umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit. Wenn die Geschwindigkeit erhöht wird, reduziert sich die Zeit der Stand- und Schwungphase und umgekehrt. Bei steigender Geschwindigkeit wird das Intervall der monopedalen Standphase verlängert und das der bipedalen Phasen verkürzt²⁵.

In dem in der hier präsentierten Studie verwendeten Programm der zebris Medical GmbH (Isny/Deutschland) wird der Gang in Stand- und Schwungphase eingeteilt. Die Standphase wird wiederum in eine Stoßdämpfungsphase, eine

mittlere Standphase und eine Abstoßphase unterteilt²⁶. Die mittlere Standphase entspricht hierbei der monopodalen Standphase.

1.1.2.3 Ganganalytische Parameter

Außer der Dauer der Gangphasen können auch räumliche und zeitliche Informationen, sogenannte ganganalytische Parameter Aufschluss über das Gangbild geben. Der Gang eines jeden Menschen ist sehr individuell, er variiert je nach Alter, Geschlecht, Körpergröße, Gewicht, Umgebung und psychischer Verfassung²⁴. Jedes Individuum weist seine eigene freie Ganggeschwindigkeit auf. Im Durchschnitt beträgt diese etwa 5 km/h, bei Kindern und Älteren ist eine langsamere Gehgeschwindigkeit zu beobachten²⁷. Bei einer Geschwindigkeit von etwa 5 km/h beträgt die Dauer der Standphase etwa 62% und die Dauer der Schwungphase ungefähr 38%^{24,28}.

Um ein Gangbild zu beurteilen, können Merkmale der Gangsymmetrie verwendet werden. Eines dieser Merkmale ist die Schrittlänge. Sie beschreibt den Abstand zwischen den initialen Bodenkontakten beider Füße, das heißt vom initialen Bodenkontakt des ipsilateralen Fußes bis zum Bodenkontakt des kontralateralen Fußes. Die Seite der Schrittlänge bezieht sich auf das Bein, welches seine Schwungphase durch den Bodenkontakt beendet. Sie entspricht keinem festgelegten Wert, sondern ist individuell abhängig von der Gehgeschwindigkeit, der Beinlänge und der Körpergröße. Die Schrittlänge sollte aber symmetrisch sein, also für beide Beine die gleiche Distanz erfüllen²⁴. Im Gegensatz zur Annahme, dass das gesunde Bein den längeren Schritt durchführt, ist es auch manchmal das kranke. Deshalb sind die Schrittlängendifferenzen nützlicher als Maßstab der Symmetrie²⁹.

Die Doppelschrittlänge, also der Abstand zwischen zwei initialen Bodenkontakten des Referenzbeines liegt in der Regel bei 1,4-1,6 m bei Männern und 1,3 bis 1,5 m bei Frauen^{24,29}. Allerdings ist zu beachten, dass diese Normwerte nur für einen 5 m langen Gehweg gültig sind. Menschen tendieren dazu, auf einem längeren Gehweg schneller zu gehen³⁰⁻³² als auf

einem kürzeren³³ und im Freien einen schnelleren Gang zu haben³⁴⁻³⁶ als im Inneren^{33,37}.

Das Gehen auf einem Laufband, wie es auch im Rahmen dieser Studie verwendet wird, unterscheidet sich allerdings zum freien Gehen. Die Schrittlänge ist kürzer^{38,39} und wird mit 1,04 m bei einer Geschwindigkeit von etwa 5 km/h angegeben^{29,40}. Die Standphase verkürzt sich um etwa 5%^{29,41}.

Die Schrittweite ist definiert als die mediolaterale Entfernung zwischen zwei aufgesetzten Fersen während der bipedalen Standphasen. Dabei wird der Referenzpunkt in das Zentrum der Ferse gelegt. Die Normwerte werden mit 5-13 cm angegeben²⁴. Wenn ein Mangel an Gleichgewicht vorhanden ist, wird die Schrittweite größer, um die Unterstützungsfläche zu vergrößern und somit ein besseres Gleichgewicht zu erzielen⁴². Allerdings vergrößert sich die Schrittweite auch mit zunehmendem Alter²⁹.

Die Fußrotation sollte auch eine Symmetrie aufweisen und wird im Stand wie auch während des Gehens mit 7° Außenrotation angegeben²⁴.

1.1.3 Die menschliche Haltung

In der hier präsentierten Studie wird ein Verfahren mit lichteoptischer Vermessung der Wirbelsäule zur Evaluierung der Haltung verwendet. König beschreibt Haltung als „ein Momentbild aus vielen Bewegungsabläufen, sie ist ein dynamisches, labiles Gleichgewicht, ein individueller Kompromiss zwischen Statik und Dynamik“⁴³. Nicht nur durch agonistisch und antagonistisch wirkende Muskelkraft⁴⁴ ergibt sich die individuelle Haltung, auch die Psyche hat einen Einfluss auf Haltungsbilder, sie spiegelt die momentane Gemütsverfassung wider^{45,46}. Für eine „normale“ Körperhaltung sollte ein Zusammenwirken der psychischen und somatischen Komponenten vorliegen, sie sollten sich im Gleichgewicht befinden⁴⁷⁻⁴⁹. Auf einen Schmerzreiz reagiert der Körper immer mit Abweichungen sowohl im Stand- als auch im Gangbild. Als Resultat ergeben sich Fehl- oder Schonhaltungen, da der Körper schmerzverursachenden Bewegungen ausweichen möchte oder diese gar vermeidet²⁴.

Um eine Standstabilität herzustellen, benötigt man in aufrechter Position eine funktionelle Balance. Sie ergibt sich durch ein Zusammenspiel aus der Muskelarbeit und der Justierung der beteiligten Körpersegmente, um somit das Körpergewicht zu verteilen²⁴. Da die Schwerkraft auf den Körper wirkt, besitzt jedes Segment einen Schwerpunkt, der das Zentrum der betreffenden Masse vertritt. Von einer passiven Stabilität spricht man, wenn der Körperschwerpunkt direkt über dem tragenden Segment liegt. Der Körper kann zudem in zwei Funktionseinheiten unterteilt werden. Zum einen wird er in eine Passagier-Einheit untergliedert, welche den Kopf, die Arme, den Oberkörper und das Becken beinhaltet, und zum anderen in eine Antriebseinheit, zu welcher das Becken und die untere Extremität zählen. Das Becken fungiert in beiden Bereichen als Bindeglied²². Eine Beurteilung der Parameter der Becken- und Wirbelsäulenstatik ist bei Wirbelsäulenleiden sinnvoll, da diese sich gegenseitig beeinflussen⁵⁰. Seit dem vergangenen Jahrzehnt gewinnt auch die Erhaltung und Wiederherstellung der sagittalen Balance für die normale Funktion der Wirbelsäule gerade bei operativen Eingriffen wieder vermehrt an Bedeutung. Inzwischen gibt es umfangreiche Literatur, welche zeigt, dass die Rekonstruktion unter Beachtung des sagittalen Profils im Vergleich zum koronaren Profil mehr Auswirkung auf funktionelle Ergebnisse wie Health-related-quality-of-life-(HRQoL-)assoziierte Parameter hat und zu guten Langzeitergebnissen führt⁵¹.

1.2 Krankheitsbilder der Wirbelsäule

1.2.1 Lumbalgie und Lumboischialgie

Lumbalgien sind definiert als Schmerzen auf der Rückseite des Körpers, die vom unteren Rand der 12. Rippe bis oberhalb der Gesäßfalten reichen, mit dorsal (Lumboischialgie), ventral (Lumbofemoralgie) oder ohne (Lumbalgie) ausstrahlende Schmerzen in die Beine, die für mindestens einen Tag andauern⁵. Akute Kreuzschmerzen sind definiert als Schmerzen, die weniger als sechs Wochen andauern. Von subakuten Kreuzschmerzen spricht man, wenn die Schmerzen mehr als sechs, jedoch weniger als 12 Wochen vorhanden sind⁶. Chronischer Rückenschmerz wird mit einer Dauer von mehr als 12 Wochen angegeben⁷. Rückenschmerzen sind subjektiv und ein komplexes Syndrom, welches aus biologischen, ethnischen und psychosozialen Faktoren besteht⁵² und eine große Chronifizierungstendenz aufzeigt⁵³. Sie können vielfältige Ursachen haben, wie Tumorschmerzen, traumatisch oder osteoporotisch bedingte Frakturen, sakroiliakale Dysfunktion, segmentale Instabilität, facettenassoziierte Schmerzsyndrome, strukturelle Defizite durch Kompressionssyndrome wie bei der Spinalkanalstenose oder die Wurzelkompression beim Nucleus pulposus Prolaps (NPP) mit gegebenenfalls progredienten, neurologischen Defiziten, oder nicht-organische bedingte Ursachen, welche kein strukturelles oder funktionelles Korrelat aufweisen können⁵⁴ und somit als nicht-spezifischer Rückenschmerz zu werten sind.

In der Akutphase treten vor allem nach Belastung plötzlich einschießende starke Schmerzen auf. Je nach betroffenem Bereich der Wirbelsäule können die Schmerzen diffus und nicht lokalisierbar sein, oder sie sind eher punktuell zu finden. Zusätzlich verspannt sich die Rückenmuskulatur über der betroffenen Stelle durch die schmerzbedingte Ruhigstellung¹. Es kann auch zu pseudoradikulären Schmerzen kommen, wenn die Wirbelgelenke eine Erkrankung vorweisen.

Chronische Schmerzen führen auch zu psychovegetativen Veränderungen¹. Etwa 75% solcher Patienten aus allgemeinmedizinischen Praxen sind nach 1 Jahr immer noch nicht schmerzfrei⁵⁵. Lediglich 4 % der Rückenschmerzpatienten benötigen aber eine stationäre Behandlung^{54,56}. Allerdings sind vor allem chronische Rückenschmerzpatienten für einen Großteil der entstehenden hohen Kosten verantwortlich, da auch indirekte Kosten wie verlorene Erwerbstätigkeitsjahre entstehen⁵⁷.

1.2.1.1 Diagnostik

Ziel der Diagnostik ist die Ursachenfindung der Beschwerden. Zum diagnostischen Vorgehen gehört die Anamnese mit Erfragen der Schmerzcharakteristika wie Schmerzdauer, -qualität, -lokalisation, -verstärkung, Begleitsymptome und der Frage nach entzündlichen und tumorösen Vorerkrankungen¹. Warnsymptome, die sogenannten „red flags“ (rote Flaggen), sollten stets erfragt werden, um gefährliche Ursachen wie Fraktur, Tumor, Entzündung oder Radikulo-/Neuropathien wie das Kaudasyndrom zu erkennen und eine dringliche Therapie einzuleiten⁶. Psychosoziale Risikofaktoren für eine Chronifizierung, die sogenannten „yellow flags“ (gelbe Flaggen) wie beispielsweise Depressivität, sollten schon bei Erstvorstellung bei akutem Kreuzschmerz in Erfahrung gebracht werden⁶. Daraufhin folgt eine körperliche Untersuchung mit Erhebung des neurologischen Status der unteren Extremität. Dabei sollten die Kennmuskeln und die Dermatome untersucht werden, um die Höhe einer eventuellen Diskushernie zu bestimmen und eine Testung auf Nervendehnungsschmerzen erfolgen. Bei persistierendem Schmerz oder bei Vorliegen von Warnhinweisen sollte eine Röntgenuntersuchung der Lendenwirbelsäule in zwei Ebenen und laterale Funktionsaufnahmen durchgeführt werden. Kontrollen der Entzündungs- und Blutbildwerte sind nicht routinemäßig empfohlen, sondern sollten nur bei Verdacht auf ein tumoröses oder entzündliches Geschehen angewendet werden¹. Wenn zusätzlich Nervenwurzelkompressionssymptome auftreten, kann außerdem eine

elektromyographische und kernspintomographische Untersuchung veranlasst werden.

Durch bildgebende Diagnostik wie Röntgen, MRT, Myelographie oder CT kann eine Enge im Spinalkanal entdeckt werden, allerdings gibt es keine genauen Kriterien der Enge um die Diagnose zu stellen⁵⁸. Die radiologischen Hauptkriterien beinhalten knöchernen Verengung, Obliteration des epiduralen Fettes und Wirbelsäulendeformitäten in den sagittalen und frontalen Schichten⁵⁹. Der Goldstandard für die Diagnose der Spinalkanalstenose ist die MRT. Die Sensitivität wird mit 87% bis 96%, die Spezifität mit 68% bis 75% angegeben⁶⁰. Um pathologische Veränderungen zu entdecken, ist es sinnvoll die Aufnahmen beim Patienten in stehender Position durchzuführen. In einigen Studien wurde gezeigt, dass auch bei asymptomatischen Personen über 60 Jahren bei 21% kernspintomographisch eine Spinalkanalstenose nachgewiesen wurde, ohne dass jemals Rückenschmerzen oder Ischialgien bestanden^{61,62}. Deshalb darf die Diagnose nicht allein durch bildgebende Diagnostik gestellt werden. Rückenschmerzen kommen signifikant öfter vor bei Patienten, die degenerative Vorgänge in 3 oder mehr Segmenten aufweisen, als bei Patienten die nur in 1 oder 2 Segmenten Degenerationen aufweisen, verglichen mit Personen ohne degenerative Vorgänge⁶³. Sogar bei gesunden Probanden können bei 20-30% der unter Sechzigjährigen, und bei über 60% der über Sechzigjährigen lumbale Diskushernien im MRT dargestellt werden^{62,64}. Deshalb muss unbedingt auf die Übereinstimmung von Klinik und morphologischem Korrelat in der Bildgebung geachtet werden⁶⁴.

1.2.2 Spinalkanalstenose

Die Spinalkanalstenose entsteht im Regelfall durch degenerative Vorgänge: Durch Bandscheibendegenerationen wird an segmentaler Höhe verloren. Gleichzeitig sinkt die Funktionalität der Bandscheibe selbst. Zusammen führt dies zu einer Protrusion der Bandscheibe, die so nach dorsal in den Spinalkanal drängt. Eine reaktive Hypertrophie des Ligamentum flavum führt zu einer weiteren Verengung des Spinalkanals⁵⁹.

Degenerative Prozesse können auch zu dem Bild einer Osteochondrose führen. Es wird ein Verschleißprozess des Knorpels beobachtet, der mit einer subchondralen Sklerosierung der Wirbelkörperdeckplatten durch zunehmende Belastung einhergeht. Die entstehende Höhenminderung des Zwischenwirbelraums führt zu spondylophytären Anbauten und zu einer Spondylarthrose⁶⁵. Hier muss keine Einengung des Spinalkanals vorliegen. Eine Spinalkanalstenose kann allerdings auch osteochondrotisch bedingt sein, wenn durch die Osteophytenbildung der Spinalkanal und die Foramina intervertebralia einengt werden.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass das Krankheitsbild der Spinalkanalstenose mit zunehmendem Alter in der Prävalenz steigt, hauptsächlich sind ältere Patienten über 65 Jahren betroffen^{58,59}. Bei Personen unter 50 Jahren liegt die Prävalenz bei weniger als 10%, bei Personen über 70 Jahren bereits bei über 20%⁶⁶. In der Framingham Studie wurde bei 191 Personen mittels CT eine Prävalenz der Spinalkanalstenose mit 8,4% angegeben, welche auch mit höherem Alter steigend ist. In einer Untereinheit lag die Prävalenz bei Personen mit Rückenschmerz für eine Spinalkanalstenose bei 18,9%⁵⁸.

Durch Kompression der Nervenwurzeln oder der Cauda equina kommt es zu belastungsabhängigen Schmerzen, Muskelschwäche, Taubheitsgefühl oder Kribbeln in den unteren Extremitäten⁶⁷. Das Gangbild wird gestört und es kommt vor allem bei längeren Gehstrecken zu einer neurogenen Claudicatio¹.

Bei diesen Patienten ist oftmals eine kompensatorisch vornübergeneigte, kyphosierende Haltung der Lendenwirbelsäule beim Gehen zu beobachten, da sie dadurch für eine Entlastung des Rückenmarkkanals sorgen. Die Foramina intervertebralia werden nämlich so erweitert und somit die Nerven entlastet, was oft eine Schmerzerleichterung erzielt. Ebenso werden die Facettengelenke entlastet. Deshalb bevorzugen diese Patienten sitzende Positionen, oder Sportarten bei denen eine Flexion der Wirbelsäule enthalten ist, wie beispielsweise Fahrradfahren¹. Eine lordosierte Haltung, wie beispielsweise beim bergabwärts Gehen, führt zur Verschlimmerung der Symptome⁵⁹.

In der akuten Schmerzphase hilft eine konservative Therapie mittels Stufenbettlagerung, bei der durch die Kyphosierung der Wirbelsäule eine Entlastung des Rückenmarks erreicht wird, sowie eine medikamentöse Therapie mit nicht-steroidalen Antirheumatika (NSAR), Muskelrelaxantien, Kortikosteroiden oder Opioiden^{1,68}. Im chronischen Krankheitszustand helfen physiotherapeutische Übungen zur Stärkung der Rückenmuskulatur, schmerzlindernde Medikamente oder lokale Injektionen⁵⁹. Dies schafft jedoch nicht prinzipiell neuen Raum im Spinalkanal. Bei therapierefraktären Schmerzen ist eine operative Entlastung angezeigt. Die Spinalkanalstenose ist eine der häufigsten Diagnosen für Rückenschmerz, bei der die Indikation zu einer Operation gegeben ist⁶⁹.

1.2.3 Nucleus pulposus Prolaps

Die lumbale Bandscheibenhernie kommt mit 95% am häufigsten auf der Höhe L4/L5 und gefolgt von L5/S1 vor^{1,63,70,71} und liegt zu 90% mediolateral¹. Die Prävalenz der lumbalen Bandscheibendegeneration, welche der erste Schritt in Richtung Bandscheibenhernie ist, steigt mit dem Alter an. Ab einem Alter von 80 Jahren fällt die Häufigkeit wieder⁶³. Jedoch nicht bei jedem führt eine Degeneration zu einem Prolaps und nicht jeder Prolaps führt zu einer klinischen Symptomatik.

Typischerweise kommt es beim symptomatischen Nucleus pulposus Prolaps je nach Lokalisation durch Kompression der abgehenden Nervenwurzel bei mediolateralen Bandscheibenvorfällen zu lumbalgieformen, stechenden Schmerzen im Rücken mit Ausstrahlung in die untere Extremität, Sensibilitätsstörungen im betroffenen Dermatome und Muskelschwäche bis hin zu Lähmungen der versorgenden Kennmuskeln mit Reflexausfällen^{1,72}. Wenn die Cauda equina bei den selteneren medialen Bandscheibenvorfällen komprimiert wird, kommt es zum Cauda equina Syndrom, was mit Reithosenanästhesie, Blasen- und Mastdarmstörung einhergeht und einen absoluten Notfall darstellt und sofortiger operativer Versorgung bedarf¹.

Durch Druckerhöhung wie Husten, Niesen oder Pressen wird das Beschwerdebild verstärkt¹. Aufgrund der starken Schmerzen nehmen die Patienten meist eine Schonhaltung ein.

Von Bandscheibenhernien sind meistens Patienten jüngeren oder mittleren Alters betroffen⁷³. Es gibt eine Korrelation zum Alter und zum BMI⁶³. Bei jungen Leuten stellen ein erhöhter BMI mit nachfolgender Haltungsdeformität durch Überbelastung der Wirbelsäule einen Risikofaktor dar. Es scheint eine familiäre Prädisposition zu geben, da bei Patienten mit positiver Familienanamnese häufiger Bandscheibenvorfälle zu beobachten sind. Bei jüngeren Patienten ist der Hauptauslöser am häufigsten ein Sport-assoziiertes Trauma, wobei bei den Erwachsenen meistens die Belastung durch das Heben schwerer Lasten der Auslöser ist⁷⁴.

Pathophysiologisch kommt es durch altersbedingte und degenerative Vorgänge der Bandscheibe zu einer zunehmenden Dehydratation der gallertartigen Struktur des Nucleus pulposus. Dies führt zu Höhenverlust und zu einem Hervortreten des Nucleus in Richtung des rissigen Anulus fibrosus, was zunächst zu einer Protrusion führt. Im weiteren Krankheitsverlauf wird der Anulus fibrosus durchbrochen und es entsteht ein Prolaps von Bandscheibengewebe. Es wird angenommen, dass die Entstehung der dabei

auch auftretenden Rückenschmerzen durch eine Nervenwurzelischämie und damit verbundene lokale Entzündungsreaktion zustande kommt⁷⁵.

Bei Symptomen ohne neurologische Defizite wird zunächst eine konservative Therapie eingeleitet. Für das Schmerzmanagement werden die Patienten mit einer Kortikoidstoßtherapie¹ und NSAR, Muskelrelaxanzien oder kurzfristig mit schwach oder stark wirkenden Opioiden behandelt⁶⁴.

Bei vorliegendem neurologischen Defizit ist gerade bei akuter Entstehung eine Operation in Betracht zu ziehen, welche im deutschen Sprachraum allgemein ab einem Muskeldefizit von drei oder weniger Kraftgraden auf der Skala für Muskelkraft des British Medical Council liegt⁷⁶.

1.3 Therapie

Es kann zwischen einer konservativen und einer operativen Therapie unterschieden werden. Grundsätzlich sollten nur symptomatische Patienten behandelt werden. Zunächst wird bei Rückenschmerzen der konservativen Therapie nachgegangen, welche aus einer nichtmedikamentösen und medikamentösen Therapie besteht. Bei therapierefraktären Beschwerden ohne neurologische Defizite kann eine elektive operative Therapie in Betracht gezogen werden, wenn in der apparitiven Diagnostik ein entsprechendes Korrelat vorliegt⁶⁴. Ein Notfall wie das Cauda equina Syndrom mit Blasen- oder Mastdarmstörungen oder eine Progredienz neurologischer Defizite unter konservativer Therapie stellen eine dringliche Operationsindikation dar⁷⁷.

1.3.1 Konservative Therapie

Die konservative Therapie besteht bei akuten nichtspezifischen Schmerzen aus möglichst wenig Bettruhe⁶. Körperliche Aktivität führt zu einer schnelleren Linderung der Symptome. Eine Stufenbettlagerung wird durch eine Kyphosierung der Lendenwirbelsäule als erleichternd empfunden. Durch Infiltrationstherapie können lokal Nozigenatoren temporär ausgeschaltet werden. Nicht-opioid Analgetika, Antiphlogistika und Muskelrelaxanzien werden symptomatisch als medikamentöse Erstlinien-Therapie verabreicht. Bei der Spinalkanalstenose und bei dem NPP können weiterhin Kortikosteroide oder Opioide eingesetzt werden^{1,68}. Analgetika sollen nach einem festgelegten Schema und nur so kurzzeitig wie nötig eingenommen werden⁶. Wärme und Massage wirken wohltuend für die verspannten Muskelareale in der akut persistierenden und chronischen Phase. Eine intensive Physiotherapie nützt der Kräftigung der Bauch- und Rückenmuskulatur und ist im akut persistierendem und chronischen Stadium und auch bei älteren Patienten angebracht^{6,59}. Bei chronischen Verläufen ist regelmäßige körperliche Bewegung angezeigt mit zusätzlicher physiotherapeutischer Behandlung¹, sowie auch eine

Rückenschule, in der die Rückenmuskulatur gekräftigt und rückschonendes Verhalten erlernt wird. Zur besseren Schmerzbewältigung wird eine verhaltenstherapeutische Strategie verfolgt⁶⁴.

Die WHO empfiehlt ein wöchentliches moderates körperliches Ausdauertraining von 150 Minuten, oder ein leistungsintensiveres Training von 75 Minuten und zusätzlich muskulaturaufbauende Übungen an 2 oder mehr Tagen um muskuloskelettalen Beschwerden vorzubeugen⁷⁸. Sportliche Aktivität reduziert das Risiko für Rückenschmerzen mehr als gezielte Rückenübungen⁷⁹. Orthesen wie Lendenkreuz-Stütz-Bandagen haben eine stabilisierende Wirkung auf die Wirbelsäule und wirken durch ihre einschränkende Mobilität schmerzlindernd¹. Generell sollte bei Patienten eine Edukation durch den Arzt erfolgen, in der sie über das Krankheitsbild informiert und beraten werden⁶.

Bei Frauen können eine gesunde Ernährung mit viel Obst und Gemüse, körperliche Bewegung, wenig Alkoholgenuss und Nichtrauchen als vorbeugende Maßnahmen für die Entwicklung von chronischen Rückenschmerzen gesehen werden⁸⁰.

Arbeitsmedizinisch gesehen beugt eine rückschonende, ergonomische Umgestaltung des Arbeitsplatzes erneuten Rückenschmerzen vor, falls diese mit dem Arbeitsplatz in Verbindung gebracht werden können. 80-90% der Patienten erholen sich innerhalb von 12 Wochen und können ihrer Arbeit wieder nachgehen⁸¹, das soll aber nicht heißen, dass diese Patienten schmerzfrei sind.

1.3.2 Operative Therapie

1.3.2.1 Dorsale Fusion

Die Zahl an spinalen Fusionen bei älteren Patienten hat in den USA in den 2000er Jahren drastisch zugenommen. 1992 wurden nur 14% der Kosten der Wirbelsäulen Chirurgie für dorsale Fusionen ausgegeben, so waren es 2003 fast die Hälfte der Kosten¹⁵.

Dorsale Fusionen sind Versteifungsoperationen der Wirbelsäule. Indikationen für eine dorsale Fusion sind Spondylolisthesis (Wirbelgleiten), Instabilitäten der Wirbelsäule, degenerative Bandscheibenerkrankung mit diskogenem Rückenschmerz, rezidivierende Bandscheibenvorfälle mit Rückenschmerz oder Radikulopathie, Deformitäten der lumbalen Wirbelsäule ggf. mit Ungleichgewicht in der koronaren oder sagittalen Ebene und Stenose der neuralen Foramina⁸².

Bei der dorsalen Instrumentationsspondylodese werden im Regelfall die betroffenen Facettengelenke eröffnet und in die zu fusionierenden Wirbelkörper werden von dorsal jeweils Schrauben im Pedikelverlauf nach ventral ziehend in die Wirbelkörper eingedreht. Zusätzlich zur Anlage dieses dorsalen Fixateur interne wird dann meist das aus den eröffneten Facettengelenken gewonnene Knochenmaterial im Sinne einer Spondylodesestraße dorsal angelagert. Um auch die ventrale Säule knöchern durchbauen zu lassen, kann – je nach Vorgehen über ventrale oder dorsale Zugänge – das Bandscheibenmaterial im betroffenen Bewegungssegment entfernt werden und der Defekt ebenfalls mit Knochen und einem Höhenplatzhalter (zumeist Titan oder Polyetheretherketon-Körbchen) aufgefüllt werden, um so langfristig eine knöcherne Überbrückung zu erzielen^{83,84}.

1.3.2.2 Dekompression

Innerhalb der letzten Jahrzehnte waren die Operationen bei älteren Patienten mit Spinalkanalstenose der schnellstwachsende Bereich der Lumbalchirurgie⁸⁵. In Deutschland war sie 2011 die Hauptdiagnose bei über 50 000 stationären Patienten über 65 Jahre⁸⁶.

Der Zweck einer Operation ist die Entlastung des Spinalkanals mit den Nervenwurzeln, der Dura mater und den Gefäßen. Vor der Operation muss entschieden werden, ob der Patient einzig eine Stenose hat oder zusätzlich noch eine Instabilität. Als dekompressive Operationsverfahren stehen die

Laminektomie, die Hemilaminektomie, die uni- oder bilaterale Hemilaminotomie, die Foraminotomie oder die Fenestration mit unterschneidender Dekompression zur Auswahl⁵⁹.

Die dekompressive Laminektomie ist die am häufigsten angewandte Operationsmethode⁸⁷. Es sollte maximal ein Drittel der medialen Facettengelenke entfernt werden, ansonsten droht lokale Instabilität⁸⁴. Bei der Hemilaminektomie wird ein Teil des Wirbelbogens entfernt, was den Vorteil des Erhaltes der Stabilität besitzt⁶⁸. Zusätzlich zur Dekompression sollte eine Fusion (siehe oben) bei gegebener relevanter Instabilität der Wirbelsäule stattfinden.

1.3.2.3 Nukleotomie

Die Nukleotomie ist die am häufigsten durchgeführte Operation bei Rückenschmerzen und Ischialgien in den USA⁸⁸.

Als relative Operationsindikation wird eine Beschwerdepersistenz ohne neurologische Defizite gesehen. Eine Operation wird für gewöhnlich nach zwei bis zwölf Monaten elektiv und bei gesicherter morphologischer Ursache durchgeführt⁶⁴. Bei akuten bedrohlichen Zuständen, wie dem Cauda equina Syndrom, neurologischen Ausfällen mit Lähmungen, oder einer Progredienz der Defizite unter Behandlung ist eine notfallmäßige Operation eine absolute Indikation⁷⁷. Bei elektiver Indikation war sowohl bei operierten als auch bei nichtoperierten Patienten eine Besserung innerhalb von zwei Jahren zu sehen, wobei die operierten Patienten schneller eine Schmerzreduktion erzielten⁸⁹.

Die Nukleotomie erfolgt entweder in offener oder in mikroskopischer minimal invasiver Technik. Hierbei wird unter größtmöglicher Weichteilschonung von dorsal auf den Rückenmarkskanal zugegangen und an der Dura vorbeipräpariert, so dass dann das überschüssige Bandscheibenmaterial entfernt werden kann⁸⁴.

1.4 Fragestellung

Um das postoperative Ergebnis zu bewerten und so auch Operationsindikationen zu überwachen und zu verbessern, sind Nachsorgeuntersuchungen immer schon eine Standardmethode gewesen. Diese Untersuchungen beinhalten für gewöhnlich eine Befragung der Patienten zu dem aktuellen Schmerzniveau. Dies gilt prinzipiell als einer der führenden Parameter zur Beurteilung des postoperativen Erfolges. Übliche objektivierbare Methoden, wie die bildgebenden Verfahren Röntgen, Computertomographie oder Magnetresonanztomographie reflektieren alleine nicht ausreichend das postoperative Ergebnis, da die Aussagekraft zur Funktion eingeschränkt ist. Funktion kann allerdings, neben Schmerz, als ein Schlüsselparameter zur Beurteilung des postoperativen Ergebnisses angesehen werden. Wichtige Funktionsparameter finden sich im Gangbild und der Haltung eines Patienten. Ziel der hier präsentierten Studie war es zu evaluieren, inwieweit eine eingetretene oder ausbleibende subjektive Besserung der Rückenschmerzen nach Wirbelsäulenoperation anhand von Gangbild oder Haltung objektivierbar ist und wie sich die Gang- und Haltungsveränderungen verändern. Zu diesem Ziel erfolgten neben der Erfragung der erzielten Schmerzlinderung perioperativ eine Stand- und Ganganalyse auf dem Laufband, sowie eine lichtoptische dreidimensionale Vermessung der Wirbelsäule.

2. Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Bei der hier präsentierten Studie handelt es sich um eine klinische prospektive Studie. Sie wurde durch den vorliegenden Ethikantrag (Projektnummer 453/2012BO2) von der Ethikkommission vor Beginn genehmigt. Es wurden Daten von Patienten erhoben, die sich in der Wirbelsäulensprechstunde der orthopädischen Ambulanz des Universitätsklinikums Tübingen vorstellten oder sich im Rahmen des präoperativen Aufklärungsgesprächs einfanden. Die Patienten wurden über die Möglichkeit einer Studienteilnahme angesprochen und bei Interesse dann auf die erforderlichen Ein- und Ausschlusskriterien geprüft. Die Ausschlusskriterien umfassten Verletzungen als Folge von Gangunsicherheit, Tumorleiden oder Infektionen mit Manifestation an der Wirbelsäule und neurologische Defizite wie Paraparesen und Cauda-Symptomatik. Im Falle einer möglichen Teilnahme erfolgte noch einmal ein ausführliches Aufklärungsgespräch mit ebenso Darlegung der Datenschutzrichtlinien. Die Indikation zur operativen Versorgung wurde unabhängig von der Studie gestellt und umfasste Operationsverfahren wie dorsale Fusionen, Dekompressionen und Nukleotomien, welche von einem Spezialist der orthopädischen Wirbelsäulen Chirurgie durchgeführt wurden. Außerdem erfolgten die entsprechenden Messungen an einem Querschnittskollektiv, bei welchem eine der o.g. Operationen vor mindestens einem Jahr stattfand. Als Kontrollkollektiv wurden bei Probanden, die anamnestisch keine Wirbelsäulenbeschwerden oder sonstige Erkrankungen der Wirbelsäule angaben, ebenso gleichermaßen messanalytische Daten erhoben. Bei den durchgeführten Messungen handelt es sich zum einen um eine Stand- und Ganganalyse auf dem Laufband mit integrierten Druckmessplatten und zum anderen um eine rasterstereographische Analyse der Wirbelsäule. Zusätzlich zu jeder Messung machten die Patienten Angaben zur Numerischen Rating Skala (NRS) zur Erfassung des Schmerzniveaus.

Die Patientendaten wurden pseudonymisiert unter Berücksichtigung der Datenschutzrichtlinien und nur mittels individuell zugeteilter Fallnummern mit Initialen der Patientennamen verwendet. Nur Mitarbeiter dieser Studie hatten Zugang zu diesen Daten.

2.2 Patienten

Die Rekrutierung der Patienten der hier präsentierten Studie erfolgte in dem Zeitraum von September 2012 bis Dezember 2013. Die Indikation zur Operation wurde in der universitären Hochschulambulanz der orthopädischen Klinik in Tübingen gestellt. Bei der Rekrutierung wurden die Patienten in einem ausführlichen Gespräch über den Studienablauf und -hintergründe und die Datenschutzrichtlinien aufgeklärt und ihr schriftliches Einverständnis eingeholt. Die Messungen erfolgten zu drei Messzeitpunkten. Die erste Messung wurde präoperativ, die zweite etwa 7 Tage postoperativ vor Entlassung und die dritte am Tag der 3-Monats-Kontrolle durchgeführt. Zum anderen wurde ein Querschnittskollektiv erstellt. Dabei wurden Patienten im Rahmen der jährlichen Kontrolluntersuchungen auf die Studie angesprochen und am Vorstellungstag untersucht (Tabelle 1). Begleitend zu jeder Messung machten die Patienten Schmerzangaben nach der NRS.

	prä-operativ	post-operativ	3-Monats-kontrolle	Querschnitts-kollektiv >1 Jahr	Kontroll-kollektiv
NRS	x	x	x	x	
Rasterstereographie	x	x	x	x	x
Standanalyse	x	x	x	x	x
Ganganalyse	x	x	x	x	x

Tabelle 1: Studiendesign mit Übersicht der Messzeitpunkte und Messverfahren

NRS = Numerische Rating Skala

2.3 Kontrollgruppe

Das Probandengut setzte sich aus dem Bekanntenkreis von Mitarbeitern der orthopädischen Universitätsklinik Tübingen zusammen. Nach anamnestischen Angaben lag bei allen Personen kein Wirbelsäulenleiden vor. Alle Probanden wurden ausführlich über die Studie informiert, bekamen eine individuelle Fallnummer zugewiesen und unterzeichneten ebenfalls die Teilnahme- und Datenschutzerklärung. Im Anschluss wurden die entsprechenden Messungen durchgeführt.

2.4 Messapparatur für die Gang- und Standanalyse und Versuchsablauf

Die Messapparatur für die Stand- und Ganganalyse wurde von der orthopädischen Universitätsklinik Tübingen zur Verfügung gestellt und bestand aus einem Laufbandergometer des Herstellers „daum electronic gmbh“ (Fürth/Deutschland), welches über integrierte Druckmessplatten verfügt, die von der Firma „zebris Medical GmbH“ (Isny/Deutschland) entwickelt wurden. Die erhobenen Daten wurden in einem speziell zugehörigen Programm namens „Win-FDM-T“ gespeichert und analysiert und konnten sofort über eine Kabelverbindung auf dem angeschlossenen Arbeitslaptop dargestellt werden. Zusätzlich konnten aufgrund des entsprechenden Video-Sync.-Ausgangs am Laufband zeitgleich mithilfe einer Videokamera Echtzeit-Aufnahmen synchron auf den Rechner übertragen werden. Dies erlaubte retrospektiv eine Überprüfung des Gangmusters. Der Versuchsaufbau wird auf Abbildung 1 dargestellt.

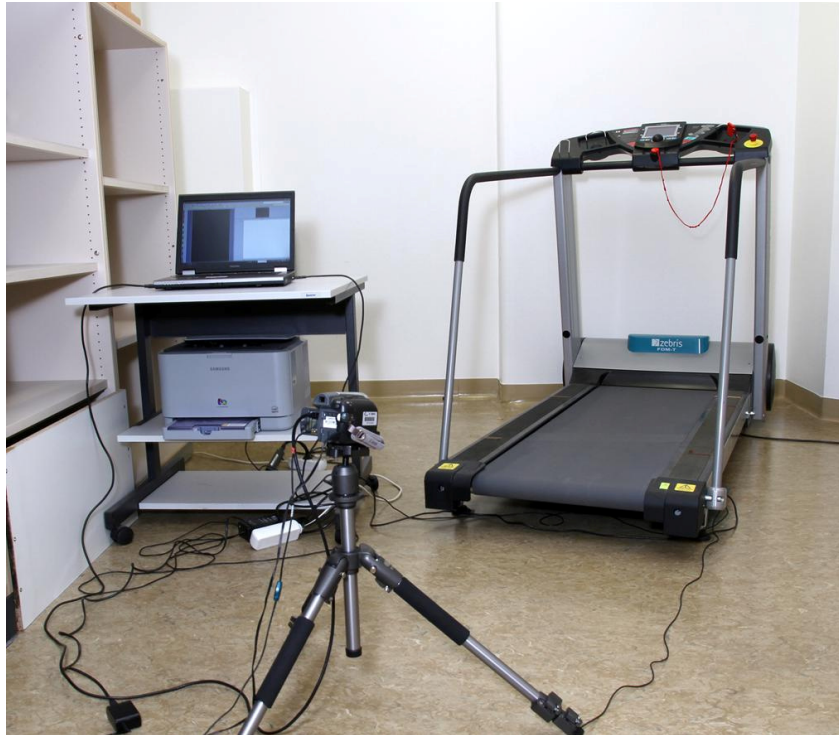


Abbildung 1: Aufbau der Messapparatur:

Angeschlossener Laptop mit „Win-FDM-T Software“ (links), angeschlossene Videokamera der Firma „Canon“ zur Aufnahme des Gangbildes (Mitte), Laufband der Firma „daum electronics gmbh“ mit integrierten Druckmessplatten der Firma „zebris Medical GmbH“ (rechts).

Die Patienten stiegen nach einer Nullkalibrierung auf das Laufband. Über einen Messzeitraum von 10 Sekunden wurde bei der Standanalyse die prozentuale Kraft- und Druckverteilung auf den rechten und den linken Fuß aufgezeichnet, ohne dass sich der Patient auf den Seitenträgern abstützte. Die Messung wurde drei Mal wiederholt und ein Mittelwert aus diesen Messungen berechnet. Nach der Messung bestand die Möglichkeit, die Ergebnisse im Report anzusehen.

Für die Ganganalyse wurde eine angenehme, für den Patienten beschwerdeadaptiert maximale Laufgeschwindigkeit eingestellt, beginnend bei 0,5 km/h mit einer Steigerung der Geschwindigkeit in Schritten um 0,1 km/h. Soweit es das Beschwerdebild zuließ, sollte der Studienteilnehmer ohne Schuhe und ohne sich an den Seitenträgern festzuhalten sich auf dem Laufband bewegen. Nachdem die individuelle Geschwindigkeit ermittelt worden war, erfolgte ein Messzyklus über 20 Sekunden. Die entsprechenden Messwerte wurden dann von der Software automatisiert berechnet ausgegeben.²⁶

	Firmenname	verwendetes Gerät	Kontaktadresse
Rasterstereograph	DIERS International GmbH	DIERS formetric 4D	Dillenbergweg 4 D-65388 Schlangenbad info@diers.de
Laufband	Daum electronic gmbh	ergo_run premium8	Flugplatzstraße 100 D-90768 Fürth verkauf@daum- electronic.de
integrierte Druckmessplatten	Zebris Medical GmbH	Zebris WinFDM-T Gait Analysis System (Version 2.5.1)	Am Galgenbühl 14 D-88316 Isny info@zebris.de
Videokamera	Canon Deutschland GmbH	Typ MD216	Europark Fichtenhain A10 D-47807 Krefeld impressum@canon.de

Tabelle 2: Übersichtstabelle der verwendeten Apparaturen, aufgelistet mit Typ und Kontaktdaten

2.4.1 Laufbandergometer

Das Laufband ist ein Gerät der Firma „daum electronic gmbh“ vom Typ „ergo_run premium8“⁹⁰. Die Lauffläche des Ergometers beträgt 1,50 m x 0,50 m. Die adjustierbare Steigung kann in 0,5% Schritten von -2% bis 15% gewählt werden. Die Geschwindigkeit ist wählbar zwischen 0,2 km/h und 24 km/h und ist in 0,1 km/h Schritten, auch während der Messung, flexibel regulierbar. Die maximale Tragkraft des Laufbandes liegt bei 150 kg⁹⁰⁻⁹². Außerdem besitzt das Ergometer zwei seitliche Führungsstangen als Hilfe und Sicherheit zur seitlichen Stabilisation der Patienten und Probanden. Ein Anhalten des Laufbandes bei Gefährdung der Teilnehmer durch eine zu schnell gewählte Geschwindigkeit wird durch ein rotes Sicherheitsseil gewährleistet, welches an den Personen befestigt ist, das sich in diesem Falle vom Armaturenbrett ablöst (Abbildung 2).



Abbildung 2: Versuchsaufbau und Ablauf.

Links: Laufbandergometer der Firma „daum electronic gmbh“. Die Lage der integrierten Druckmessplatten der Firma „zebris Medical GmbH“ sind durch die braunen Streifen auf der seitlichen Verkleidung markiert. Rechts: Proband während einer Messung der Ganganalyse mit Befestigung der Sicherheitschnur.

2.4.2 zebris FDM-T System

Das speziell zur Analyse der statischen und dynamischen Kraftverteilung entwickelte FDM-T System der Firma „zebris Medical GmbH“ arbeitet mit im Laufbandergometer integrierten Druckmessplatten, welche über eine kalibrierte Messsensormatrix verfügen. Darin sind sensible Drucksensoren eingearbeitet, die es ermöglichen, eine Gang- und Standanalyse auszuwerten. Um eine korrekte Messung zu gewährleisten, sollte das Betreten des Laufbandes barfuß erfolgen. Durch ein spezielles Verfahren können bei dem FDM-T System Bewegungen des Laufbandes kompensiert werden, wodurch bei der Analyse stabile Gangmuster ausgewertet werden können⁹³. Aufgrund der großen Sensorflächen ist die Erfassung mehrerer Schrittzyklen möglich, wobei eine hohe Messgenauigkeit vorliegt. Die kapazitiven Messsensoren befinden sich auf einer in Reihen und Spalten angeordneten Matrix auf den Messplatten⁹⁴. Der Messbereich des Systems umfasst 1-120 N/cm² mit einer Messgenauigkeit von $\pm 5\%$ ^{19,91}. Dabei besitzen die Messplatten 7168 kapazitive Sensoren bei einer Sensorfläche von 108,4 x 47,4 cm⁹¹. Die Auflösung beträgt bei dieser

Anzahl 1,4 Sensoren/cm^{2,92}. Das Prinzip der kapazitiven Sensoren beruht auf einer Kapazitätsänderung zweier Elektroden, die die Platten eines elektrischen Kondensators bilden. Bei den kapazitiven Drucksensoren kommt es aufgrund eines Durchbiegens der Membran durch das auf die Füße verteilte Körpergewicht zu einer Verminderung des Plattenabstandes und dadurch zu einer Kapazitätsänderung, dem sogenannten Sensoreffekt⁹⁵. Dieser entstandene Wert wird als Druckmesswert berechnet und an die Software WinFDM-T weitergegeben.

Über eine USB-Schnittstelle kann das FDM-T System mit einem PC verbunden und die Messdaten übertragen werden⁹¹.

2.4.3 WinFDM-T

Der von zebris entwickelten Software WinFDM-T (Version 2.5.1) ist es möglich, Kraft- und Druckmesswerte unter der Fußsohle während des Stehens und Gehens zu ermitteln. Im Programm selber war es möglich über eine Datenbank Projekte anzulegen, in denen wiederum die Studienteilnehmer und deren Messungen organisiert werden können. Die Messungen der Stand- und Ganganalyse wurden über den angeschlossenen PC gesteuert und erfolgten mit einer Videoaufnahme der Studienteilnehmer von deren Rückseite aus, welche auch zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden konnten. Im Anschluss an die Kalibrierung erschien die Messplatte und das Videobild auf dem Monitor. Bereits während der Messung konnte am Monitor die in unterschiedlichen Farben dargestellte Belastungsverteilung der beiden Füße mitverfolgt werden. Die verschiedenen Farben der Fußdruckbilder zeigen die unterschiedlichen Intensitäten der Druckeinwirkungen unter den Füßen an (Abbildung 3).

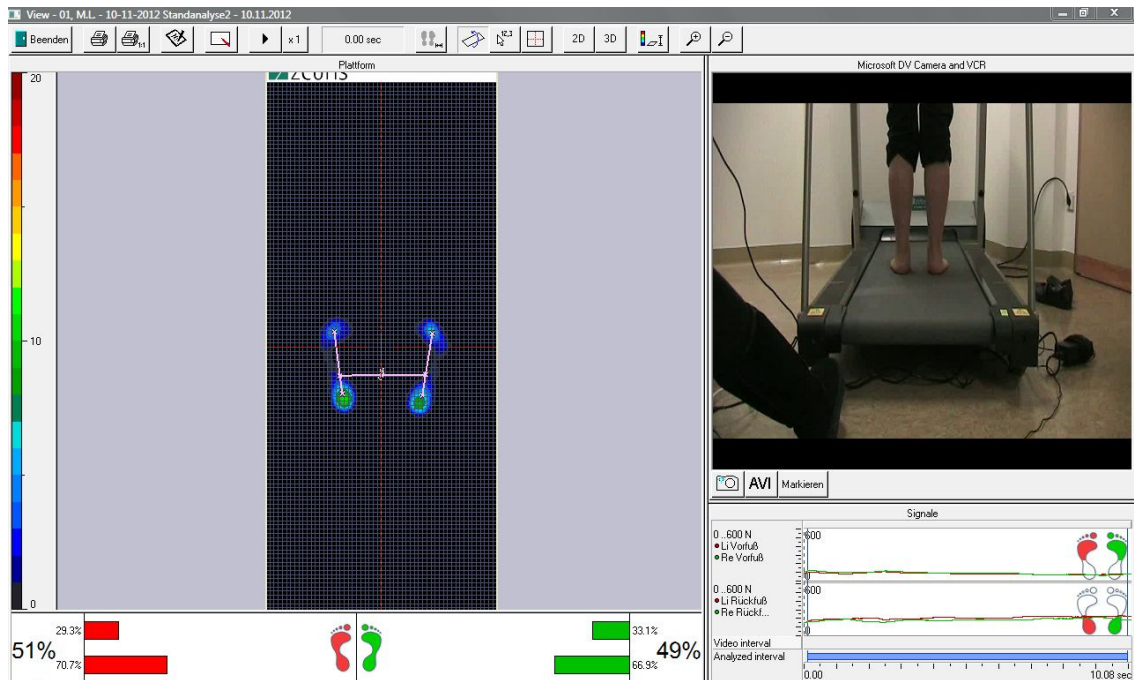


Abbildung 3: Monitoransicht des WinFDM-T Programms während der Standanalyse. Messplatten (links), Gesamtbelastungsverteilung des rechten und linken Fußes (unten links), Ansicht der Videokamera (oben rechts), Druck-/ Kraftverlauf während der Messung (unten rechts).

Bei der Ganganalyse war das Programm in der Lage während der laufenden Analyse die Schritte der entsprechenden linken und rechten Körperseite zuzuordnen. Am Monitor konnte man die Schritte und die Videoaufnahme synchron beobachten²⁶ (Abbildung 4).

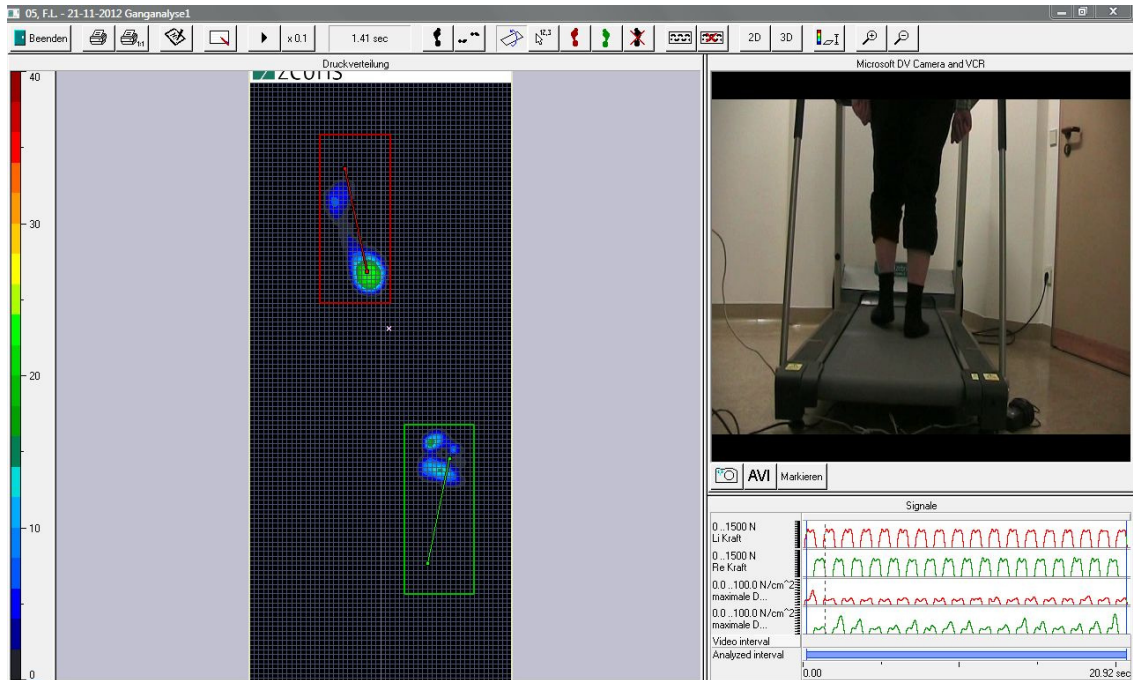


Abbildung 4: Monitoransicht des WinFDM-T Programms während der Ganganalyse. Schritte mit Abrollvorgängen auf den Messplatten (links) mit Erkennung des linken Fußes (rot) und des rechten Fußes (grün), Ansicht der Videokamera (oben rechts), Druck-/ Kraftverlauf während der Messung (unten rechts).

2.4.4 Videokamera

Die Videokamera der Firma „Canon“ des Typs MD216⁹⁶ (Abbildung 5) war mit dem Laufband und dem Computer verbunden, um Echtzeit-Aufnahmen der Stand- und Gangmessungen zu übertragen und in der Software „Win-FDM-T“ darzustellen. Dabei wurde die Kamera so positioniert, dass sie die Rückseite des Studienteilnehmers filmte, wobei nur dessen Beine zu sehen waren. Bei langen Hosenbeinen mussten diese entsprechend hochgekrempelt werden.



Abbildung 5: Videokamera der Firma „Canon“ zur Aufnahme der Studienteilnehmer während der Stand- und Ganganalysen.

2.5 Messapparatur für die Rasterstereographie und Versuchsablauf

Die Rasterstereographie ist eine strahlenfreie, lichteoptische Vermessung der Wirbelsäulenoberfläche. Es wurde bereits in den 1980er Jahren ein berührungsloses Verfahren von Hierholzer und Drerup entwickelt, das durch automatische Identifizierung anatomischer Fixpunkte die Beziehung zwischen Wirbelkörper und Oberflächenkrümmung erkennt und eine 3D Rekonstruktion des Verlaufs der Wirbelsäule erstellen kann^{97,98}. Hierfür wurde in der hier präsentierten Studie das Gerät DIERS formetric 4D der Firma „DIERS International GmbH“ (Schlangenbad/Deutschland) verwendet (Abbildung 6), das ein genormtes Streifenmuster auf den Rücken des Patienten projiziert⁹⁷. Das physikalische Vermessungsverfahren basiert auf dem Prinzip der Triangulation⁹⁹. Wenn man zwei bestimmte Punkte, Punkt 1 und Punkt 2, im Raum auf einer Geraden kennt und den Abstand dieser beiden Punkte weiß, kann man die Lage eines beliebigen Zielpunktes P im Raum mit den Winkelmessungen jeweils von dem Zielpunkt zu Punkt 1 und 2 bestimmen. Der

bekanntem Abstand der Verbindung zwischen Kamera und Lichtquelle und die Strahlen von und zum zu vermessenden Objekt formen hierbei ein Dreieck. Die dreidimensionale Rekonstruktion der Oberflächenpunkte ist durch das Zusammenführen des Kamerabildes und des Diapositivbildes des Projektors möglich. Die Bildkoordinaten errechnen sich aus korrespondierenden Punkten im Videobild und im Diapositivbild. Die Korrespondenz wird über Nummern der Rasterlinien bestimmt^{100,101}.

Das auf den Rücken projizierte Linienmuster deformiert entsprechend⁹⁹ und wird mittels der Linienkrümmungen von der Computersoftware DICAM basic mithilfe der Photogrammetrie zu einer dreidimensionalen Oberfläche verarbeitet⁹⁷. Mithilfe des Streifenmusters können mit einer einzigen Aufnahme die Distanz zu allen Punkten innerhalb des Musters bestimmt werden¹⁰⁰.

Das DIERS formetric 4D verfügt über eine optische Einheit mit Streifenprojektor und Videokamera, die mit ca. 600 000 Messpunkten eine hochauflösende Vermessung der Wirbelsäule erreicht und ca. 60 Bilder pro Sekunde aufnehmen kann. Die zu vermessende Person stellt sich mit dem vollständig entkleideten Rücken zur Kamera auf eine markierte Linie, welche einen Abstand von ca. 2 m zur Projektionseinheit hat. Es sollte eine natürliche Standhaltung eingenommen werden, die Beine gestreckt und in hüftbreiter Position, der Blick ist nach vorne gerichtet. Zur Anpassung der Aufnahmehöhe der unterschiedlich großen Personen gibt es eine motorbetriebene Hubsäule, die über die Tastatur des angeschlossenen PCs bedient werden kann. Ein schwarzer Samtstoff bildet den Hintergrund der Aufnahmen, da durch den Kontrast zum menschlichen Körper Reflektionen vermieden werden können. Der Raum wird abgedunkelt. Nachdem das in hellen und dunklen Streifen projizierte Rastermuster im Computerbildschirm erscheint, ist eine Aufnahme möglich. Im rekonstruierten 3D Bild werden automatisch die anatomischen Fixpunkte wie der Vertebra prominens (VP), der Sakrumpunkt (SP), das rechte (DR) und das linke Lendengrübchen (DL) bestimmt und anschließend von der Computersoftware verschiedene Parameter anhand dieser Fixpunkte berechnet⁹⁷. Diese vier genannten anatomischen Fixpunkte zeichnen sich durch ihre maximale Krümmung aus und werden somit von dem Programm mit einer

Genauigkeit von 1 mm erkannt¹⁰¹. Die Krümmungen werden durch verschiedene Farben dargestellt und es können konvexe (rot), konkave (blau) und sattelförmige (grün) Areale unterschieden werden⁹⁹. Dies kann allerdings bei adipösen Personen problematisch werden, da deren Oberflächenkonturen die automatische Detektion dieser Punkte erschweren. Für diesen Fall einer nicht regelrechten automatischen Platzierung erlaubt die Software eine manuelle Korrigierung dieser Punkte. Die erstellten Bilder können mithilfe der Software gespeichert, ausgewertet und verwaltet werden. Es wird ein zweiseitiger Report erstellt, auf welchem eine Rekonstruktion der Streifenabbildung mit dem VP, dem SP, dem DR und dem DL abgebildet sind, sowie weitere Diagramme zum Wirbelsäulenprofil.

Die 4D Funktion dient der Analyse der Körperhaltung über einen zeitlichen Verlauf von maximal 60 Sekunden, die allerdings in der aktuellen Studie keine Verwendung fand.

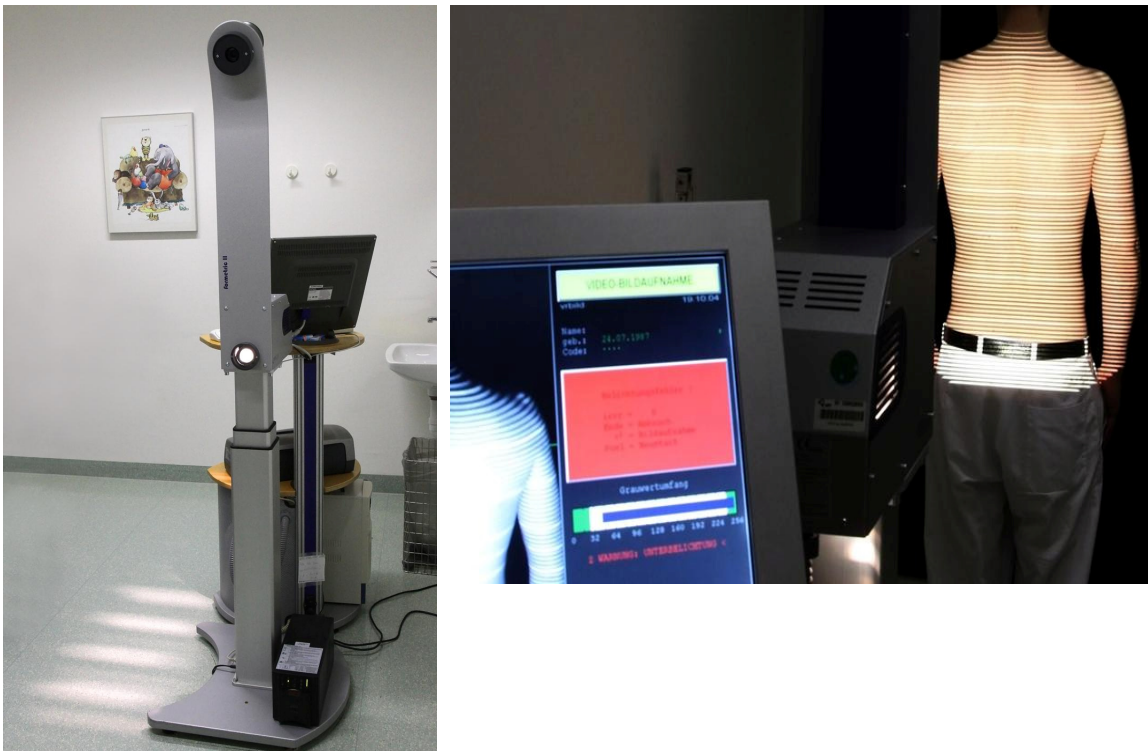


Abbildung 6: Versuchsaufbau der Rasterstereographie.

Links: Rasterstereograph DIERS formetric 4D der Firma „DIERS International GmbH“. Rechts: Proband während einer Messung mit Projektion des Rastermusters.

2.5.1 Formanalyse des Rückens

Zunächst sind die Ergebnisse der Rekonstruktion als dreidimensionale Koordinaten gegeben. Um ein auswertbares Ergebnis zu erhalten, müssen aus diesen Koordinaten Formeigenschaften der Oberfläche beschrieben werden, die unabhängig von der Lage im Raum sind. Hierfür werden sogenannte Invarianten aus den Koordinaten berechnet, die aber selber unabhängig von den Koordinaten sind. Ein Beispiel für eine Invariante ist die Länge einer Strecke. In dem hier präsentierten Beispiel der Rasterstereographie werden die Flächenkrümmungen als Invarianten verwendet, „da sie nur die Form, aber nicht die Lage eines Körpers beschreiben“ (DIERS biomedical solutions 2010, S.6)¹⁰⁰. Für die dreidimensionale Angabe der Krümmungen wird der Mittelwert der Krümmungspunkte verwendet, die sogenannte mittlere Krümmung. Mit diesem Wert lassen sich konvexe und konkave Formen durch eine Farbskala im Computerprogramm sichtbar machen. Die rote Farbe steht für konvexe, die weiße für ebene, und die blaue für konkave Bereiche. Die Intensität der Färbung spiegelt die Stärke der Krümmung wider¹⁰⁰.

Charakteristische Punkte können deshalb ebenfalls als invariant bestimmt werden, wenn sie anhand der Krümmungsverteilung definiert werden. So ergibt sich durch die Bestimmung anhand der charakteristischen Krümmungsform des VP, des SP, des DR und des LR ein körpereigenes Koordinatensystem, das für weitere Messwertbestimmungen verwendet werden kann. Dabei sind diese Punkte unabhängig von der Position der Person zum Aufnahmesystem und können bei unterschiedlichen Messungen miteinander verglichen werden¹⁰⁰. Außerdem erlauben diese vier Punkte eine Assoziation zwischen Skelett und Rückenoberfläche, da beispielsweise der VP als skelettaler Referenzpunkt erkannt wird¹⁰².

2.5.2 Verwendete Parameter in der Rasterstereographie

Insgesamt berechnet das Programm DICAM basic 30 Parameter. Im Folgenden werden die der hier präsentierten Studie verwendeten Parameter erläutert (s. Abbildung 7).

Der Parameter der Rumpflänge VP-DM ist definiert als der Abstand zwischen dem Vertebralpunkt und dem Mittelpunkt der Verbindungslinie zwischen den Fixpunkten DR und DL, welcher die Abkürzung DM trägt.

Die Rumpfneigung VP-DM errechnet sich durch den Winkel zwischen einer äußeren Schwerelinie und der Verbindungslinie von VP-DM. Dieser Parameter kann je nach Haltung der zu vermessenden Person ein positives oder negatives Vorzeichen haben. Dabei ist eine nach vorne gebeugte Haltung als positives und eine nach hinten lehrende Haltung als negatives Vorzeichen definiert.

Bei der Lotabweichung VP-DM wird der Winkel zwischen der Verbindungslinie von VP-DM und einer Schwerelinie durch VP berechnet.

Der Lordosewinkel T12-DM ergibt sich aus den Oberflächentangenten der Wendepunkte der Brustkyphose und der Lendenlordose. Der Winkel berechnet sich aus der Höhe des Punktes T12, welcher der geschätzten Höhe des 12. Brustwirbels entspricht, und des Fixpunktes DM, welcher den Mittelpunkt der Strecke DR und DL darstellt. Der Kyphosewinkel berechnet sich aus dem Winkel gemessen zwischen der Oberflächentangente des Vertebra prominens und der Höhe des Processus spinosus von T12^{48,100}.

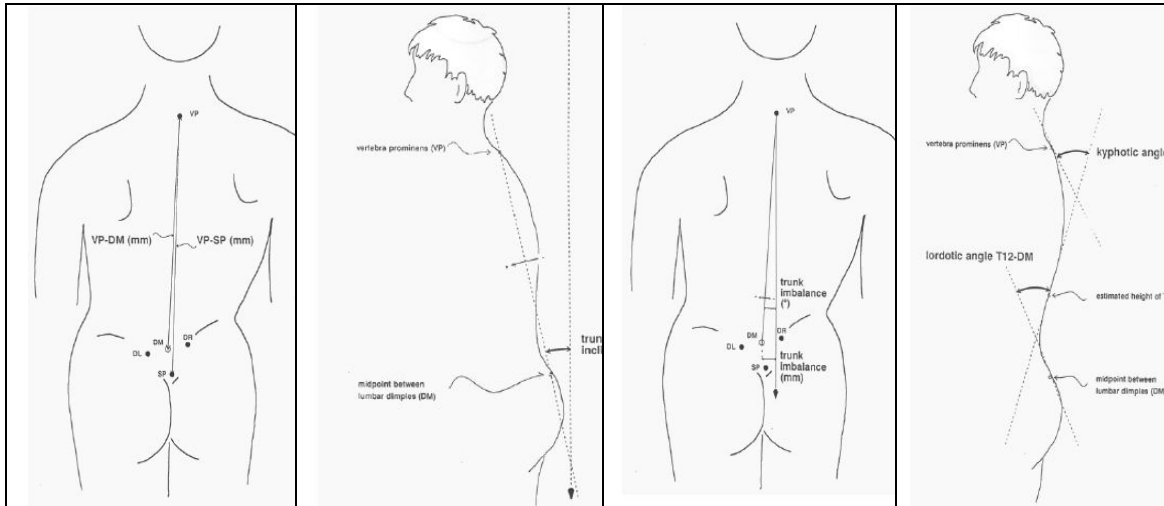


Abbildung 7: Schematische Darstellung der anatomischen Fixpunkte und verwendeten Parameter der Rasterstereographie.

Von links nach rechts: Rumpflänge VP-DM, Rumpfneigung VP-DM, Lotabweichung VP-DM Lordosewinkel T12-DM. Optische Wirbelsäulenvermessung: Informationen zur Auswertung DIERS formetric III 4D mit freundlicher Genehmigung von DIERS Biomedical Solutions.

2.6 Numerische Rating Skala (NRS)

Begleitend zu den objektiven Messungen während der Studie wurde auch das subjektive Schmerzempfinden mittels der NRS evaluiert. Dies ist eine valide Methode für eine Auskunft über die Schmerzintensität¹⁰³. Die Befragung der Patienten erfolgt über eine Darstellung auf einer horizontalen Linie, auf welcher mittels Balken Zahlen von 0 bis 10 dargestellt sind. Die Zahl 0 entspricht der Abwesenheit von Schmerzen, die Zahl 10 soll dem maximalen vorstellbaren Schmerz entsprechen. Die Patienten sollen eine Zahl wählen, die ihrem Schmerzlevel am ehesten entspricht. Es liegen keine Normwerte vor, allerdings kann man eine Unterteilung in Schweregrade vornehmen. Werte zwischen 0-3 deuten auf geringe Schmerzen hin, Werte von 4-6 auf moderate Schmerzen und Werte von 7-10 auf starke Schmerzen¹⁰³. Die Patienten wurden zu jedem apparativen Messzeitpunkt auch nach dem subjektivem Schmerz befragt, den sie mithilfe der NRS angeben konnten. Dieses Verfahren ist eine gute Möglichkeit zur Verlaufskontrolle der Schmerzintensität bei Erwachsenen.

2.7 Datenverarbeitung

Jeder Teilnehmer wurde anonymisiert angelegt. Die über das Softwareprogramm „WinFDM-T“ erhobenen Daten wurden in einen Report umgewandelt. Dieser Report konnte im Format ASCII auf eine externe Festplatte exportiert werden. Bei der Rasterstereographie wurden über die Computersoftware DICAM basic anatomische Fixpunkte und die daraus errechneten Parameter in einer zweiseitigen Analyse festgehalten. Zu allen Messzeitpunkten wurde ein subjektives Schmerzempfinden mittels der NRS von den Teilnehmern angegeben. Sowohl die Daten der Gang- und Standanalyse, der Rasterstereographie und der NRS wurden in eine Excel-Tabelle eingetragen, um sie für die statistische Auswertung vorzubereiten.

2.8 Statistische Auswertung

Als Auswertungsprogramm wurde die Statistiksoftware SPSS ((IBM (Armonk/USA) SPSS 22.0) verwendet. Die Messwerte wurden für das präoperativ/postoperativ/3-Monatskollektiv, das Querschnitts- und das Kontrollkollektiv zunächst einzeln ausgewertet um im Anschluss untereinander verglichen zu werden.

Es erfolgte eine Überprüfung der Variablen auf Normalverteilung anhand von Histogrammen. Innerhalb des Studienkollektivs erfolgte eine weitere Unterteilung in dorsale Fusionen, Dekompressionen bei Spinalkanalstenosen und Nukleotomien. Die Angaben werden je nach Normalität als Median (Minimum-Maximum) oder als Mittelwert (\pm Standardabweichung) wiedergegeben. Graphisch dargestellt wurden die Auswertungen mittels Histogrammen, Boxplots, Kreisdiagrammen und Bland-Altman Plots.

Die Messwerte der Laufbandanalyse setzten sich aus einem Mittelwert aller durchgeführten Schritte aus einer Messung mit Angabe der Standardabweichung zusammen und wurden jeweils für den linken und rechten Fuß ermittelt. Für bilaterale Variablen der Laufbandanalyse, wie Fußrotation,

Schrittlänge oder Standphase wurden Parameter für die Gangsymmetrie errechnet. Hierfür wurde die absolute Differenz zwischen beiden Seiten berechnet.

Die Standmessung wurde auf einem einseitigen Report, bei dem die Gesamtbelastungsverteilung in Prozent des rechten und des linken Fußes miteinander verglichen wurde, von der Software ausgegeben. Die Standmessung wurde 3 mal wiederholt, anschließend wurde aus diesen Messungen ein Mittelwert gebildet.

Die Verbesserung der Schmerzintensität der angegebenen Werte auf der NRS wurden in Bezug auf die verschiedenen Messzeitpunkte nach Besserung gruppiert und in Prozent angegeben (> 75% hervorragend, 30-74% moderat, < 30% keine relevante Besserung).

Demographische Charakteristiken und das Auslesen unterschiedlicher Messungen wurden mittels Chi-Quadrant-Test, Mann-Whitney-U-Test oder t-Test miteinander verglichen. Das zweiseitige Signifikanzlevel der p-Werte liegt bei 0,05. Es erfolgte keine alpha-Adjustierung für multiples Testen.

3. Ergebnisse

3.1 Patienten

92 Patienten konnten in diese Studie eingeschlossen werden, davon 42 männliche und 50 weibliche Teilnehmer. Messungen zu einem präoperativen, postoperativen und 3-Monats-Zeitpunkt konnten bei 43 Patienten durchgeführt werden, hierunter 29 dorsale Fusionen, 8 Dekompressionen und 6 Nukleotomien. Ein Querschnittskollektiv, bei dem eine Wirbelsäulenoperation bereits vor mehr als 12 Monaten vorher erfolgt war, ergab eine Patientenzahl von 36, hierunter 29 dorsale Fusionen. Bei 13 Patienten konnten bei nicht Wahrnehmen des Termines nicht Messungen an allen Messterminen erhoben werden.

Die Patienten wurden in oben genannte drei, nach der Operationsmethode getrennte Kollektive aufgeteilt. Das Alter betrug in der Gruppe mit dorsalen Fusionen im Median 56 (30-77) Jahre, in der Gruppe mit den Dekompressionen 65 (50-76) Jahre und in der Gruppe der Nukleotomien 42 (20-69) Jahre. Somit liegt der Median in Bezug auf das Alter aus allen drei Kollektiven bei 57 (20-77) Jahren. Stärker vertreten waren Patienten im Alter von ca. 50 und 65 Jahren, eine Normalverteilung lag nicht vor (s. Abbildung 8). Auffallend war, dass die älteren Patienten in der Gruppe der Dekompressionen zu finden waren und die jüngeren mit deutlichem Abstand in der Gruppe der Nukleotomien. Die Größe ergab einen Mittelwert von 1,71 ($\pm 0,10$) m und das Gewicht von 80,75 ($\pm 18,64$) kg.

Das Kontrollkollektiv umfasste insgesamt 30 Personen, hierunter 13 männliche und 17 weibliche Probanden, somit fand sich eine ähnlich gewichtete Verteilung wie im Patientenkollektiv. In Bezug auf das Alter lag der Median im Kontrollkollektiv bei 56 (47-74) Jahren (s. Abbildung 9), vergleichbar mit der Gruppe der dorsalen Fusionen. Die Körpergröße zeigte einen Mittelwert von 1,68 ($\pm 0,08$) m und das Körpergewicht von 75,06 ($\pm 15,90$) kg. In den Tests der Interferenzstatistik ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Patienten- und Normkollektiv (s. Tabelle 3).

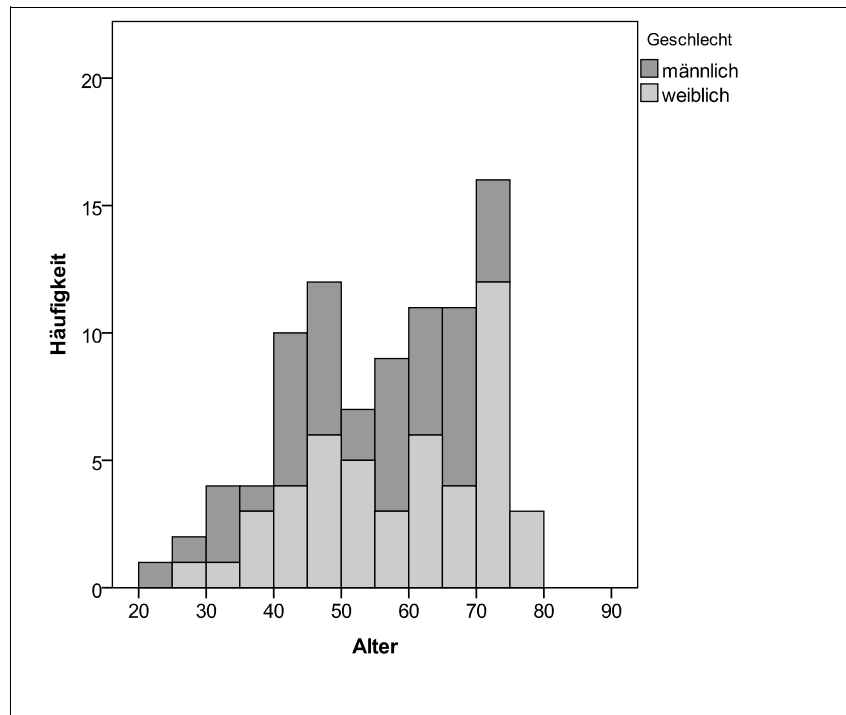


Abbildung 8: Altersverteilung im Patientenkollektiv getrennt nach Geschlechtern.
Es zeigt sich ein Altersgipfel um etwa 50 Jahre und ein zweiter um etwa 65-70 Jahre.

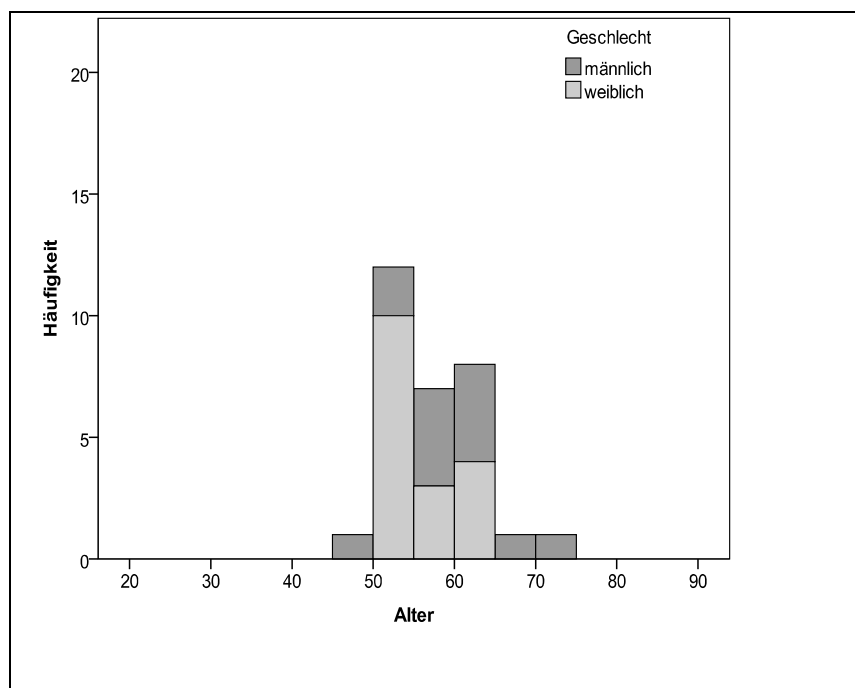


Abbildung 9: Altersverteilung im Kontrollkollektiv, getrennt nach Geschlechtern.
Der Median liegt bei 56 Jahren.

	Patientenkollektiv (n=92)	Normkollektiv (n=30)	p
Alter (Jahren)	57 (20-77)	56 (47-74)	0,952*
Weiblich	50	17	0,825 [^]
Männlich	42	13	
Körpergröße (m)	1,71 (±0,10)	1,68 (±0,08)	0,149°
Körpergewicht (kg)	80,75 (±18,64)	75,06 (±15,90)	0,114°
BMI (kg/m²)	27,7 (±5,94)	26,4 (±4,71)	0,233°

Tabelle 3: Deskriptive Statistik und Vergleich biometrischer Daten von Patienten- und Normkollektiv.

*Mann-Whitney-U-Test, [^]Chi2-Test, °t-Test für unabhängige Stichproben.

3.2 Ganganalyse

Die Ergebnisse der Ganganalyse werden in Tabellen 4 und 5 unten aufgeführt.

Die ausgewerteten Parameter für Gangsymmetrie, wie die Differenz der Schrittlänge und die Doppelschrittlänge sowie die Geschwindigkeit ergaben signifikante Unterschiede im Vergleich des Patienten- mit dem Normkollektiv. Für die Differenz der Fußrotation, die Differenz der Standphase und die Schrittweite ergaben sich in diesen beiden Gruppen in Bezug auf die Gangsymmetrie keine signifikanten Unterschiede (s. Tab. 4).

Innerhalb des Patientenkollektivs in der longitudinalen Gruppe mit dorsaler Fusion ergab sich ein signifikanter Unterschied der Doppelschrittlänge vom präoperativen zum postoperativen Zeitpunkt ($p=0,016$), nicht jedoch für die Differenzen der Fußrotation, der Schrittlänge, der Standphase oder der Schrittweite (s. Tab. 5). Die Schrittweite im Querschnittskollektiv im Vergleich zum präoperativen Kollektiv war signifikant vergrößert ($p=0,010$).

Die Ergebnisse wurden außerdem in Besserungsgruppen bezüglich der Verbesserung des Schmerzniveaus unterteilt. Diagramme zu den hier als Parameter für Gangsymmetrie entsprechenden Untersuchungsergebnissen, wie die Differenz der Fußrotation, der Schrittlänge und der Standphase, sowie die Doppelschrittlänge und die Schrittweite, werden in Abb. 10-15 aufgeführt.

Bei gleichbleibender Laufbandgeschwindigkeit während aller Messzeitpunkte ließ sich jedoch postoperativ vor Entlassung und zum Zeitpunkt der 3-Monatskontrolle eine signifikante Reduktion der Kadenz ($p=0,007$ und $p=0,050$) nachweisen (s. Abb. 15). Keine signifikante Differenz der Kadenz lag zwischen dem präoperativen Patientenkollektiv und dem Querschnittskollektiv ein Jahr nach Operation oder im Vergleich zum Normkollektiv vor.

	Normkollektiv	Patientenkollektiv gesamt präop	p*
Differenz Fußrotation (°)	3,27 (2,41/4,13)	4,23 (3,27/5,19)	0,424
Differenz Schrittlänge (cm)	2,07 (1,33/2,81)	3,14 (2,49/3,80)	0,032
Doppelschrittlänge (cm)	75,73 (69,10/82,37)	64,25 (58,62/69,89)	0,049
Differenz Standphase (%)	1,63 (1,19/2,07)	2,57 (1,69/3,45)	0,474
Schrittweite (cm)	11 (2-18)	12 (4-23)	0,514
Kadenz (Schritte/min)	95 (40-161)	69 (42-160)	0,298
Geschwindigkeit (km/h)	2,5 (1,1-3,0)	1,8 (0,5-3,2)	<0,001

Tabelle 4: Unterschiede der Ergebnisse der Ganganalyse zwischen Normkollektiv und gesamten Patientenkollektiv und Testung auf signifikante Unterschiede.

*Mann-Whitney-U-Test. Abkürzungen: präop= präoperativ

	präop	postop	p [†] präop/ post- op	3 Monate	p [†] präop/ 3Mo	1 Jahr	p* präop/ 1Jahr
Differenz Fußrotation (°)	3,77 (2,73/4,81)	4,60 (3,08/6,12)	0,443	4,61 (3,28/ 5,93)	0,336	2,81 (1,81/3,81)	0,248
Differenz Schrittlänge (cm)	2,77 (2,12/3,41)	4,44 (1,46/7,42)	0,730	2,22 (1,55/ 2,88)	0,318	2,29 (1,51/3,06)	0,280
Doppelschritt- länge (cm)	63,77 (55,91/ 71,62)	56,84 (49,27/ 64,41)	0,016	67,53 (59,98/ 75,09)	0,750	67,79 (58,55/ 77,02)	0,766
Differenz Standphase (%)	2,35 (1,53/3,18)	3,16 (1,24/5,10)	0,230	2,04 (1,14/ 2,94)	0,229	2,05 (1,54/2,57)	0,575
Schrittweite (cm)	11 (6-23)	11 (4-19)	0,360	11,5 (5-20)	0,617	11,5 (6-19)	0,010
Kadenz (Schritte/min)	94,5 (40-132)	87,5 (43-119)	0,007	90,5 (54-131)	0,050	101,5 (66-131)	0,329

Tabelle 5: Vergleich innerhalb der Patientengruppe mit dorsaler Fusion zu verschiedenen Messzeitpunkten.

Die p-Werte beziehen sich jeweils auf den Vergleich zu dem präoperativen Wert, von links nach rechts: Vergleich präoperativ/postoperativ Vergleich präoperativ/3Monate postoperativ, Vergleich präoperativ/1Jahr postoperativ. Wilcoxon Test, *Mann-Whitney-U-Test. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop= postoperativ, 3 Monate= 3 Monate postoperativ, 1 Jahr= 1 Jahr postoperativ

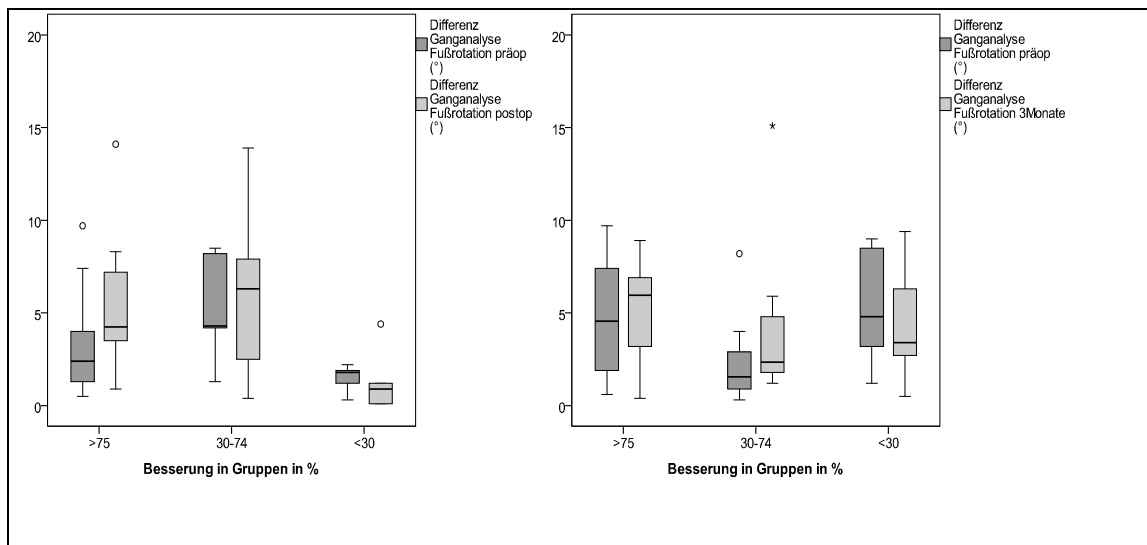


Abbildung 10: Differenz Fußrotation (°) nach dorsaler Fusion.

Links: Boxplotdarstellung der Differenz der Fußrotation des rechten und des linken Fußes unterteilt in die Besserungsgruppen bezogen auf den Schmerz zu den Zeitpunkten prä- und postoperativ. Der Wert steigt postoperativ zunächst an, signifikante Unterschiede sind nicht zu erkennen. Rechts: Im Vergleich zu den Zeitpunkten präoperativ und 3 Monate postoperativ ist der Differenzwert ebenfalls höher in den Gruppen mit hoher und mäßiger Schmerzlinderung, bei leichter Abnahme bei ausbleibender Schmerzlinderung. Auch hier ist jedoch kein signifikanter Unterschied feststellbar. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop= postoperativ vor Entlassung, 3Mo= 3 Monate postoperativ

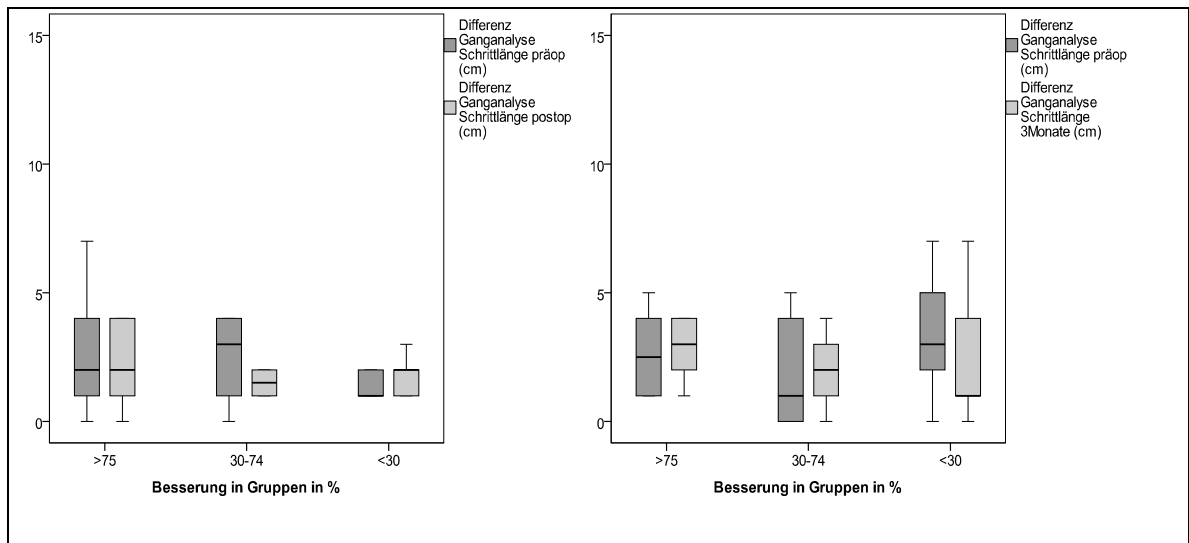


Abbildung 11: Differenz der Schrittlänge nach dorsaler Fusion (cm)

Boxplotdarstellung der Differenz der Schrittlänge unterteilt in die Besserungsgruppen zu den Zeitpunkten präoperativ und postoperativ im Vergleich (links), sowie präoperativ und 3 Monate postoperativ (rechts). Eine signifikante Differenz ergibt sich nicht. präop= präoperativ, postop= postoperativ vor Entlassung, Abkürzungen: 3Mo= 3 Monate postoperativ

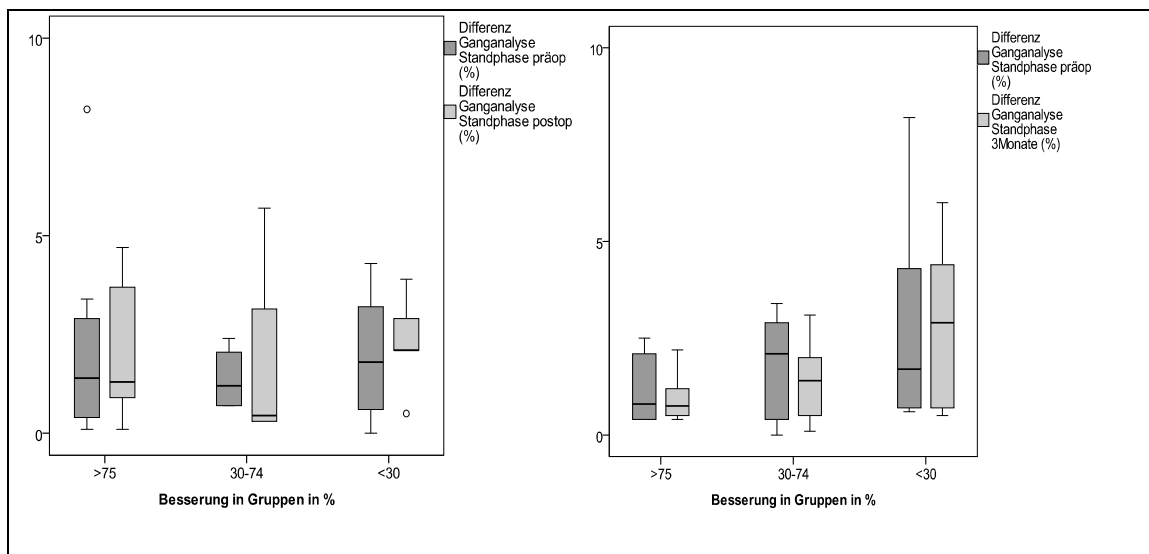


Abbildung 12: Differenz der Standphase (%) nach dorsaler Fusion

Boxplots der Differenz der Standphase zwischen beiden Beinen zu den Zeitpunkten präoperativ und postoperativ (links) und unterteilt in die 3 Besserungsgruppen. In der rechten Darstellung ist die Differenz der Standphase zu den Zeitpunkten präoperativ und 3 Monate postoperativ zu sehen. In der Besserungsgruppe <30% ist ein größerer Mittelwert der Differenz zu erkennen, jedoch ohne statistisch signifikanten Unterschied. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop= postoperativ vor Entlassung, 3Mo= 3 Monate postoperativ

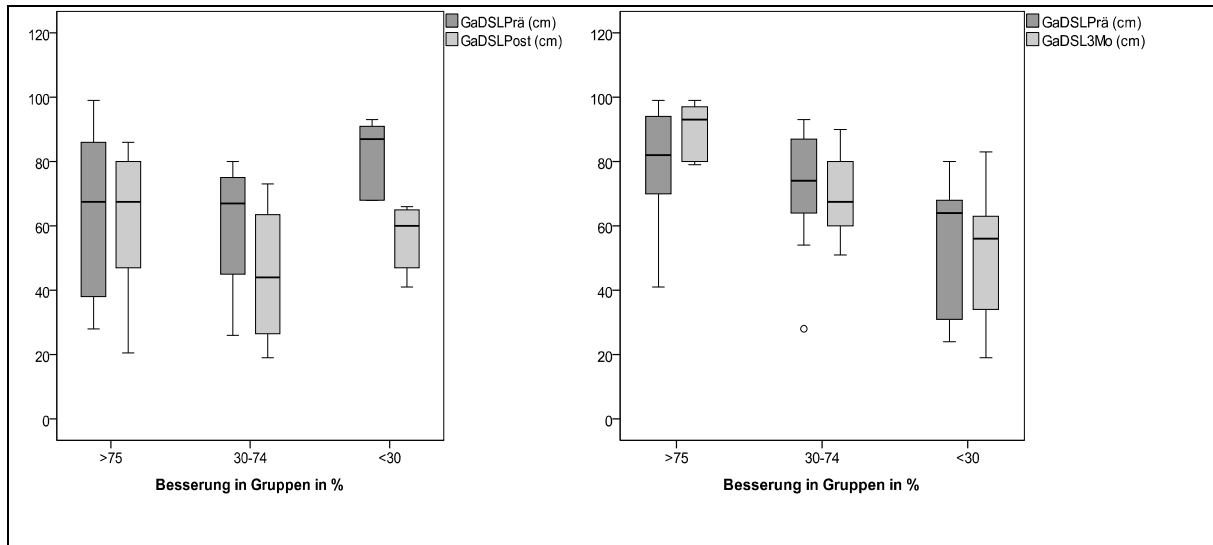


Abbildung 13: Doppelschrittlänge (cm) nach dorsaler Fusion

Boxplots der Doppelschrittlänge unterteilt in die Besserungsgruppen zu den Messzeitpunkten präoperativ und postoperativ (links), sowie präoperativ und 3 Monate postoperativ (rechts). Postoperativ ($p=0,016$) ist in den Gruppen $<74\%$ Besserung eine Reduktion der Doppelschrittlänge zu beobachten. In der Gruppe mit $>75\%$ Besserung fällt eine größere Schrittlänge auf, jedoch ähneln die Mittelwerte nach 3 Monaten ($p=0,750$) den präoperativen Durchschnittswerten. GaDSL= Ganganalyse Doppelschrittlänge, präop= präoperativ, postop= postoperativ vor Entlassung, 3Mo= 3 Monate postoperativ

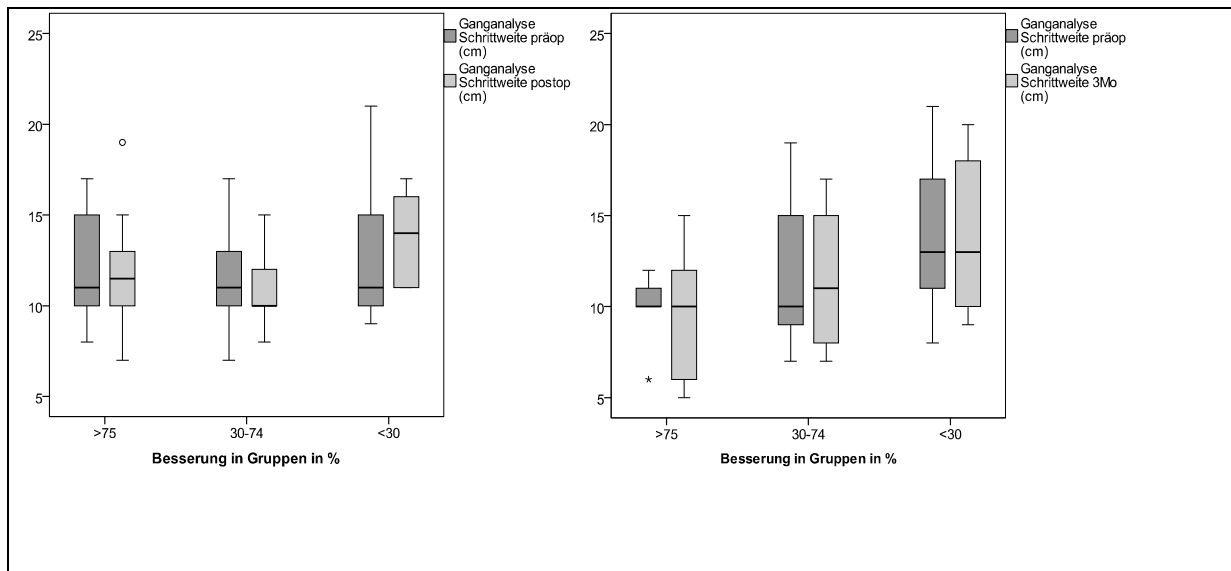


Abbildung 14: Schrittweite (cm) nach dorsaler Fusion

Boxplots mit der Schrittweite zu den Messzeitpunkten präoperativ und postoperativ (links), sowie zu den Zeitpunkten präoperativ und postoperativ nach 3 Monaten (rechts), jeweils unterteilt in die Besserungsgruppen. Der Medianwert zeigt hier keine relevante Veränderung. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop= postoperativ vor Entlassung, 3Mo= 3 Monate postoperativ

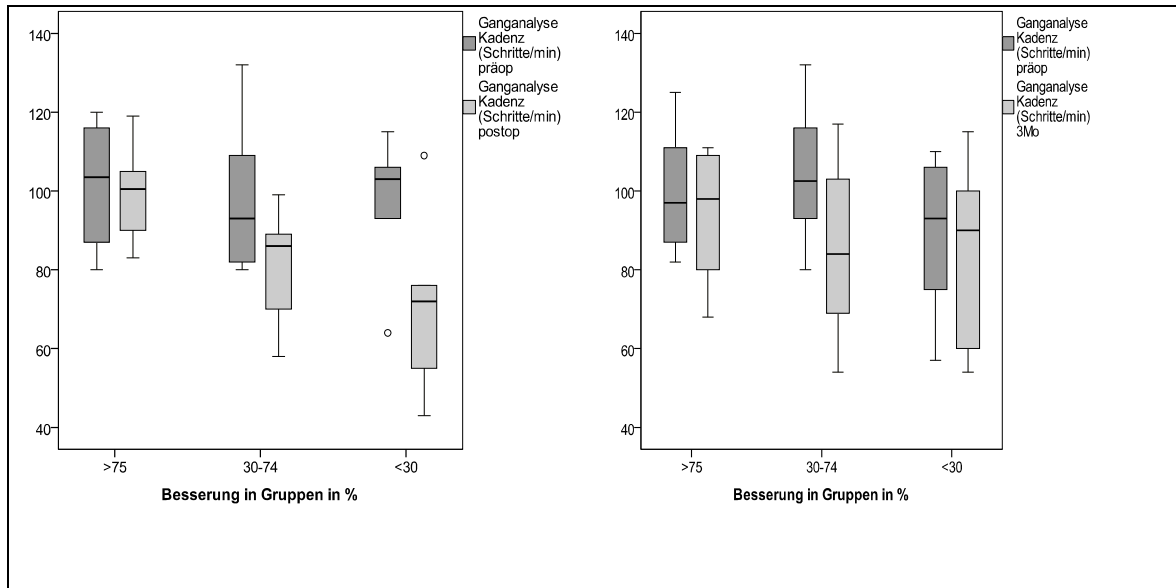


Abbildung 15: Kadenz (Schrittemin) nach dorsaler Fusion

Boxplots der Kadenz zu den vergleichenden Zeitpunkten präoperativ und postoperativ (links), sowie präoperativ und 3 Monate postoperativ (rechts). Sowohl postoperativ vor Entlassung ($p=0,007$) als auch nach 3 Monaten ($p=0,050$) ist eine signifikante Reduktion der Kadenz in den Besserungsgruppen kleiner als 74% zu beobachten. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop= postoperativ vor Entlassung, 3Mo= 3 Monate postoperativ, min= Minute

3.3 Standanalyse

In Tabelle 6 und 7 sind die Ergebnisse der Standanalyse aufgelistet.

Bei Untersuchung des Standbildes konnte im aktuellen Datensatz ein Unterschied der Differenz der Gesamtbelastung zwischen den beiden Füßen zwischen dem Norm- (7,29%) und dem gesamten Patientenkollektiv (16,93%) beobachtet werden. Dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant. In der Gruppe der dorsalen Fusionen konnte postoperativ ein geringerer, jedoch nicht statistisch signifikant geringerer Differenzwert beobachtet werden (von 12% auf 7,5%) ($p=0,147$). Nach 3 Monaten kam es wieder zu einem leichten Anstieg ($p=0,092$). Der Differenzwert zwischen beiden Füßen näherte sich an den des Querschnittskollektivs 1 Jahr postoperativ an.

Eine Darstellung der Gesamtbelastungsverteilung unterteilt in die Besserungsgruppen der NRS wird in Abb. 16 gezeigt.

	Normkollektiv	Patientenkollektiv gesamt präop	p*
Differenz Gesamtbelastung (%)	7,29 (5,33/9,25)	16,93 (11,0/22,87)	0,079

Tabelle 6: Ergebnisse der Standanalyse zwischen Normkollektiv und gesamten Patientenkollektiv

*Mann-Whitney-U-Test, präop= präoperativ

	präop	postop	p ^t präop/postop	3 Monate	p ^t präop/3 Mo	1 Jahr	p* präop/1 Jahr
Differenz Gesamtbelastung(%)	11,98 (7,66/16,31)	7,50 (5,42/9,58)	0,147	7,86 (5,48/10,24)	0,092	8,81 (6,32/11,29)	0,553

Tabelle 7: Vergleich innerhalb der Patientengruppe nach dorsaler Fusion zu verschiedenen Messzeitpunkten

Die p-Werte beziehen sich jeweils auf den Vergleich zu dem präoperativen Wert, von links nach rechts: Vergleich präoperativ/postoperativ, Vergleich präoperativ/3 Monate postoperativ, Vergleich präoperativ/1 Jahr postoperativ. Wilcoxon Test, *Mann-Whitney-U-Test. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop= postoperativ, 3 Mo= 3 Monate postoperativ, 1 Jahr= 1 Jahr postoperativ

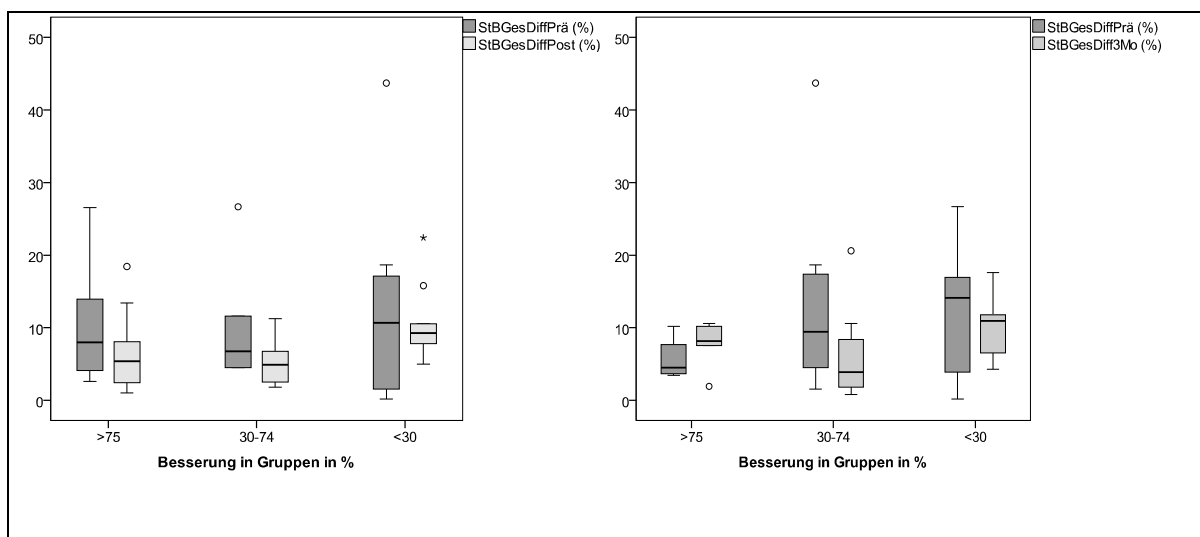


Abbildung 16: Differenz der Gesamtbelastungsverteilung zwischen beiden Füßen (%) nach dorsaler Fusion

Boxplots der Differenz der Gesamtbelastungsverteilung zwischen beiden Füßen präoperativ/postoperativ (links) und präoperativ/3 Monate postoperativ (rechts), aufgeteilt nach Besserungsgruppen. Postoperativ vor Entlassung lässt sich eine Tendenz zu einem geringeren Differenzwert erkennen, welcher nach 3 Monaten wieder ansteigt, ein signifikanter Unterschied ergibt sich hieraus jedoch nicht. StBGesDiff= Standanalyse, Differenz der Belastungsverteilung der Gesamtbelastung. Abkürzungen: prä= präoperativ, post= postoperativ vor Entlassung, 3 Mo= 3 Monate postoperativ

3.4 Rasterstereographie

Die Ergebnisse der rasterstereographischen Untersuchungen werden in den Tabellen 8 und 9 aufgeführt. Bei dem Vergleich des Patientenkollektivs zum präoperativen Zeitpunkt mit dem Normkollektiv fällt ein signifikanter Unterschied der Rumpflänge ($p=0,008$), der Rumpfneigung ($p<0,001$), der Lotabweichung ($p=0,001$) und des Lordosewinkels ($p=0,029$) auf. Die Rumpflänge zeigte sich im Querschnittskollektiv 1 Jahr postoperativ in der Gruppe der dorsalen Fusionen gegenüber dem präoperativen Patientenkollektiv signifikant verringert ($p=0,004$), in dieser Vergleichsgruppe ergaben sich keine weiteren relevanten Ergebnisse. Die erhobenen Daten des Patientenkollektivs 3 Monate postoperativ ähnelten den Werten des Querschnittskollektivs.

Innerhalb der Patientengruppe der dorsalen Fusionen erwiesen sich der Kyphosewinkel (von 52° auf 44°) und der Lordosewinkel (von 28° auf 12°) postoperativ signifikant reduziert ($p=0,001$ und $p<0,001$). In der postoperativen 3-Monatsmessung stiegen beide Werte wieder an, erreichten jedoch nicht den präoperativen Ausgangswert, s. Abb. 20 und 21.

Im longitudinalen Vergleich der Patientengruppe gab es keine weiteren signifikanten Unterschiede. Graphische Darstellungen der Rumpflänge, der Rumpfneigung und der Lotabweichung mit Unterteilung in die Besserungsgruppen bezogen auf die NRS werden in Abb. 17-21 präsentiert.

	Normkollektiv	Patientenkollektiv gesamt präop	p
Rumpflänge VP-DM (mm)	447,10 (±32,62)	467,83 (±33,69)	0,008*
Rumpfneigung VP-DM (°)	3,17 (±2,57)	7,80 (±6,03)	<0,001*
Lotabweichung VP-DM (°)	0,45 (-2,2-7,3)	1,2 (0,1-6,9)	0,001°
Kyphosewinkel (°)	46,48 (±11,04)	49,85 (±11,47)	0,144*
Lordosewinkel (°)	32,76 (±11,39)	24,84 (±14,53)	0,029*

Tabelle 8: Ergebnisse der Rasterstereographie von Normkollektiv und gesamtem Patientenkollektiv und Testung auf signifikante Unterschiede.

°t-Test bei unabhängigen Stichproben, *Mann-Whitney-U-Test. Abkürzungen: VP= Vertebra prominens, DM= Mitte der beiden Dimple (Lumbalgrübchen), präop= präoperativ

	präop	postop	p präop/ postop	3 Monate	p präop/ 3Mo	1 Jahr	p präop/ 1Jahr
Rumpflänge VP-DM (mm)	460,14 (±35,28)	461,95 (±39,26)	0,706°	448,29 (±38,23)	0,334°	432,34 (±39,90)	0,004 ⁺
Differenz Rumpflänge VP-DM (mm)		-4,64 (-19,23/ 9,95) [#]		11,99 (-2,91/ 26,90) [#]			
Rumpfneigung VP-DM (°)	7,01 (±5,35)	7,24 (±4,83)	0,978°	6,01 (±4,70)	0,128°	6,19 (±4,04)	0,495 ⁺
Differenz Rumpfneigung VP-DM (°)		-0,09 (-1,47/ 1,30) [#]		0,96 (-1,1/ 2,03) [#]			
Lotabweichung VP-DM (°)	0,95 (0,1-5,4)	1,0 (0,0-4,6)	0,583 ^t	0,8 (0,0-4,2)	0,478 ^t	0,8 (0,1-4,9)	0,677*
Differenz Lotabweichung VP-DM (°)		-0,1 (-0,56/ 0,36) [#]		0,14 (-0,29/ 0,58) [#]			
Kyphosewinkel (°)	52,04 (±10,52)	43,93 (±13,92)	0,001°	48,61 (±10,85)	<0,001°	49,35 (±12,87)	0,357 ⁺
Absolutwert Differenz Kyphosewinkel (°)		8,87 (5,65/ 12,08) [#]		5,63 (3,82/ 7,44) [#]			
Lordosewinkel (°)	28,0 (±13,72)	11,87 (±12,60)	<0,001°	22,61 (±13,73)	0,003°	26,83 (±16,01)	0,753 ⁺
Absolutwert Differenz Lordosewinkel (°)		16,79 (12,41/ 21,18) [#]		10,60 (7,70/ 13,48) [#]			

Tabelle 9: Rasterstereographische Messergebnisse zu den verschiedenen Messzeitpunkten bei dorsalen Fusionen und longitudinaler Vergleich.

Die p-Werte beziehen sich jeweils auf den Vergleich zu dem präoperativen Wert, von links nach rechts: Vergleich präoperativ/postoperativ, Vergleich präoperativ/3Monate postoperativ, Vergleich präoperativ/1Jahr postoperativ Querschnittskollektiv. °t-test für abhängige Stichproben, [#]95% Konfidenzintervall für Mittelwert, ^tWilcoxon Test, ⁺t-Test für unabhängige Stichproben, *Mann-Whitney-U-Test. Abkürzungen: VP= Vertebra prominens, DM= Mitte der beiden Dimple (Lumbalgrübchen), präop= präoperativ, postop=postoperativ, 3 Monate= 3 Monate postoperativ, 1 Jahr= 1 Jahr postoperativ

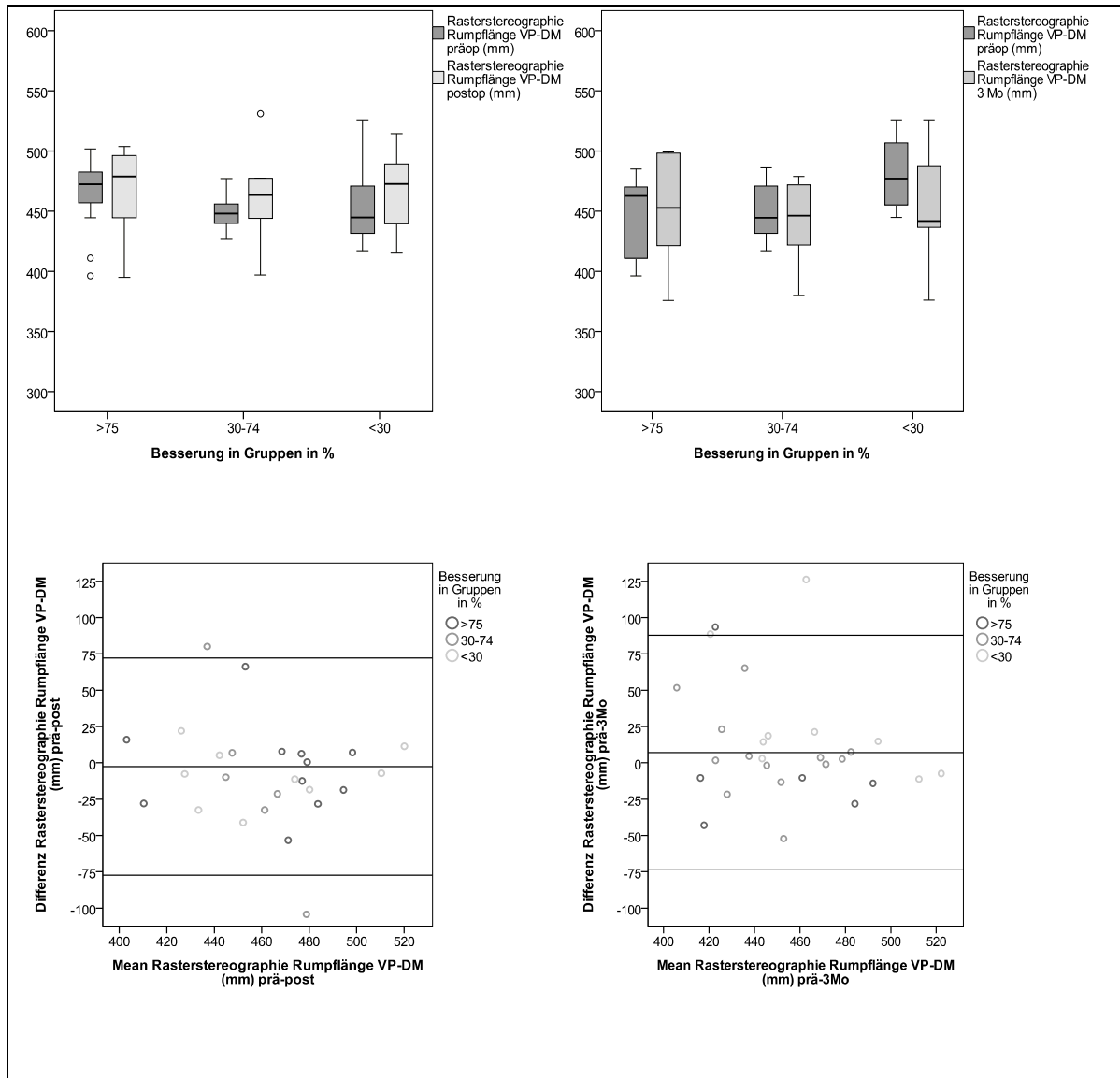


Abbildung 17: Rumpflänge VP-DM (mm) dorsale Fusionen und Differenz der Rumpflänge VP-DM (mm) dorsale Fusionen

Die oben dargestellten Boxplot-Diagramme zeigen die Rumpflänge im Vergleich zu den Zeitpunkten präoperativ und postoperativ (links oben) und präoperativ und 3 Monate postoperativ (rechts oben), aufgeteilt in die Besserungsgruppen. Ein wesentlicher Unterschied ist nicht zu erkennen. Eine Darstellung der Mittelwerte gegen die Differenz der Rumpflänge erfolgt mittels Bland-Altman-Plots ebenfalls nach Gruppen unterteilt zu den Zeitpunkten prä- und postoperativ vor Entlassung (links unten) und präoperativ und nach 3 Monaten (rechts unten). Abkürzungen: VP= Vertebra prominens, DM= Mitte der beiden Dimple (Lumbalgrübchen), prä= präoperativ, post=postoperativ vor Entlassung, 3 Mo= 3 Monate postoperativ, Mean= Mittelwert

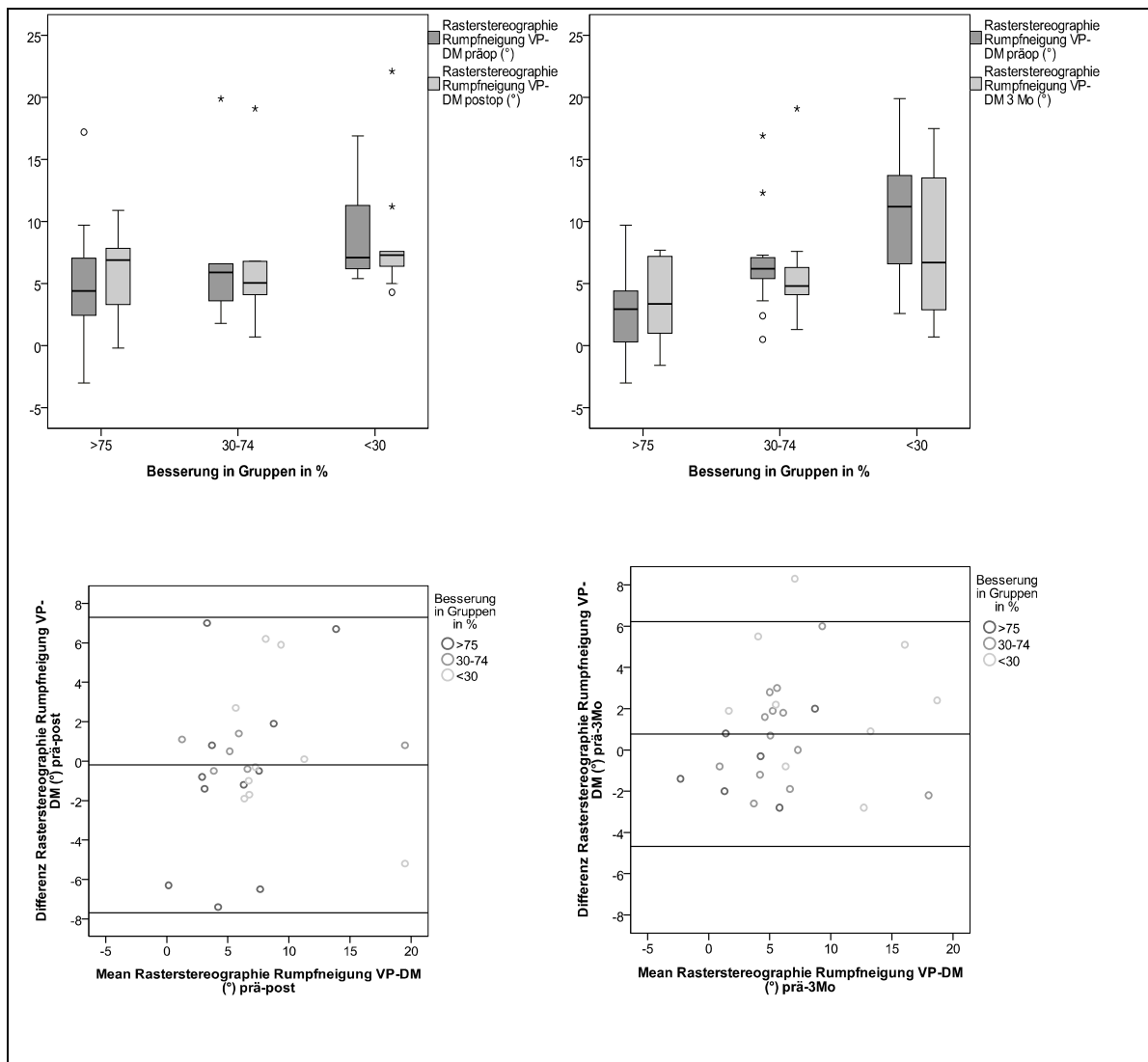


Abbildung 18: Rumpfneigung VP-DM (°) dorsale Fusionen und Differenz der Rumpfneigung (°) dorsale Fusionen präoperativ zu postoperativ/perioperativ
 Boxplotdarstellung der Rumpfneigung prä- und postoperativ vor Entlassung (links oben) und im Verlauf nach 3 Monaten postoperativ (rechts oben), ein signifikanter Unterschied liegt nicht vor. Auffallend ist der höhere Grad der Rumpfneigung als Ausgangswert präoperativ in der Gruppe mit der geringsten Besserung und der niedrigere Rumpfneigungswert in der >75% Besserungsgruppe (rechts oben). In den Bland-Altman Plots zeigt die Differenz der Rumpfneigung an den Messtagen prä- und postoperativ vor Entlassung (links unten) und präoperativ und nach 3 Monaten postoperativ (rechts unten) kein eindeutiges Verbesserungsmuster. Alle drei Gruppen sind auf beiden Seiten der mittleren Differenz verteilt. Abkürzungen: VP= Vertebra prominens, DM= Mitte der beiden Dimple (Lumbalgrübchen), prä/präop= präoperativ, post/postop=postoperativ vor Entlassung, 3 Mo= 3 Monate postoperativ, Mean= Mittelwert

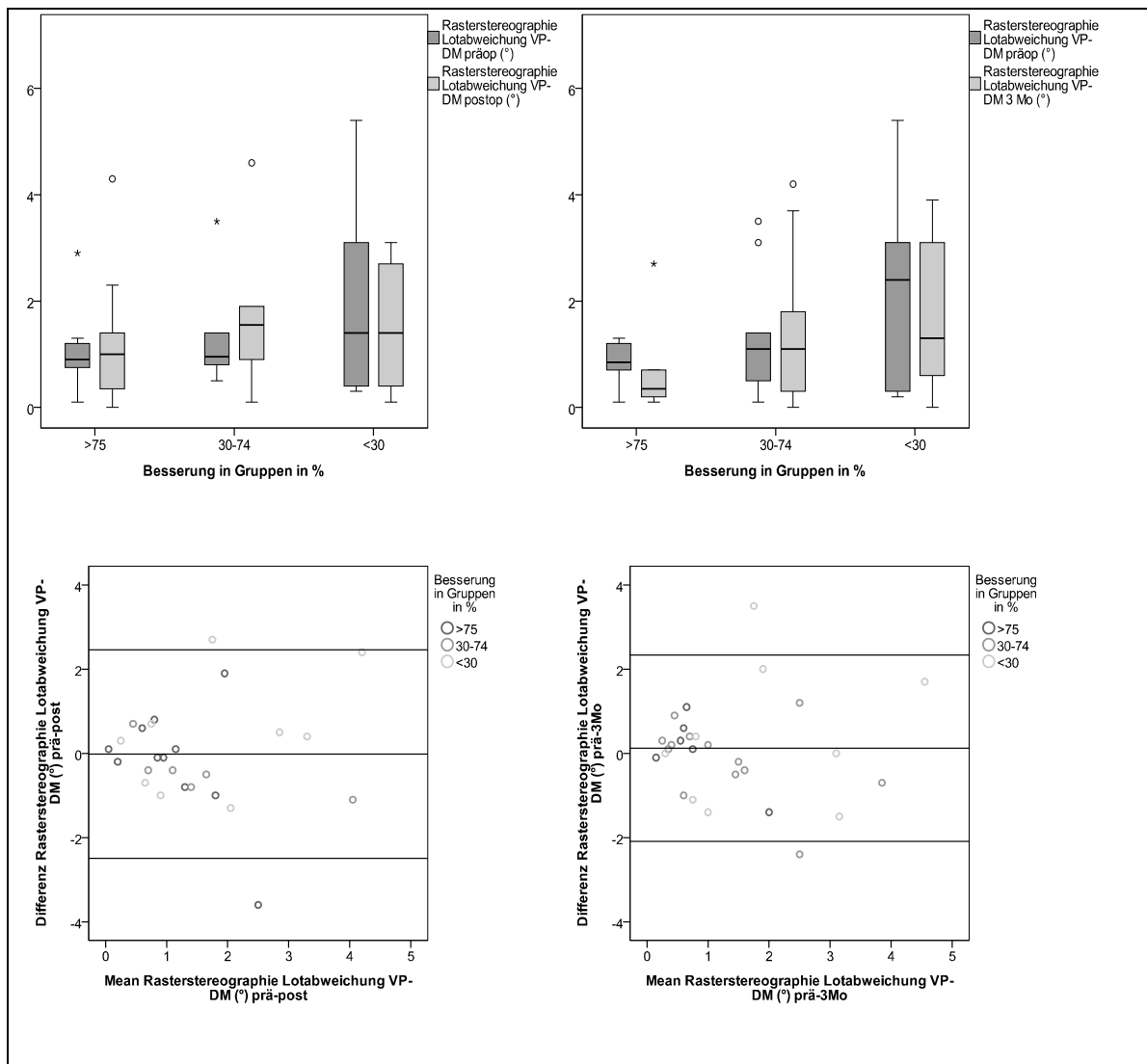


Abbildung 19: Lotabweichung (°) dorsale Fusionen und Differenz Lotabweichung (°) dorsale Fusionen perioperativ

Boxplot (links oben) zeigt die Lotabweichung prä- und postoperativ kurz vor Entlassung und (rechts oben) die Lotabweichung präoperativ und 3 Monate postoperativ. Im Verlauf nach 3 Monaten zeigt sich eine Tendenz zu einem geringeren Lotabweichungswinkel in der > 75% Verbesserungsgruppe. Eine signifikante Änderung ergibt sich hieraus nicht. In den aufgeführten Bland-Altman-Plots (links unten und rechts unten) zu o.g. Zeitpunkten sind die Verbesserungsgruppen auf beiden Seiten der mittleren Differenz verteilt, womit keine Abhängigkeit von der erzielten Besserung ins Auge fällt. Abkürzungen: VP= Vertebra prominens, DM= Mitte der beiden Dimple (Lumbalgrübchen) , prä/präop= präoperativ, post/postop=postoperativ vor Entlassung, 3 Mo= 3 Monate postoperativ, Mean= Mittelwert

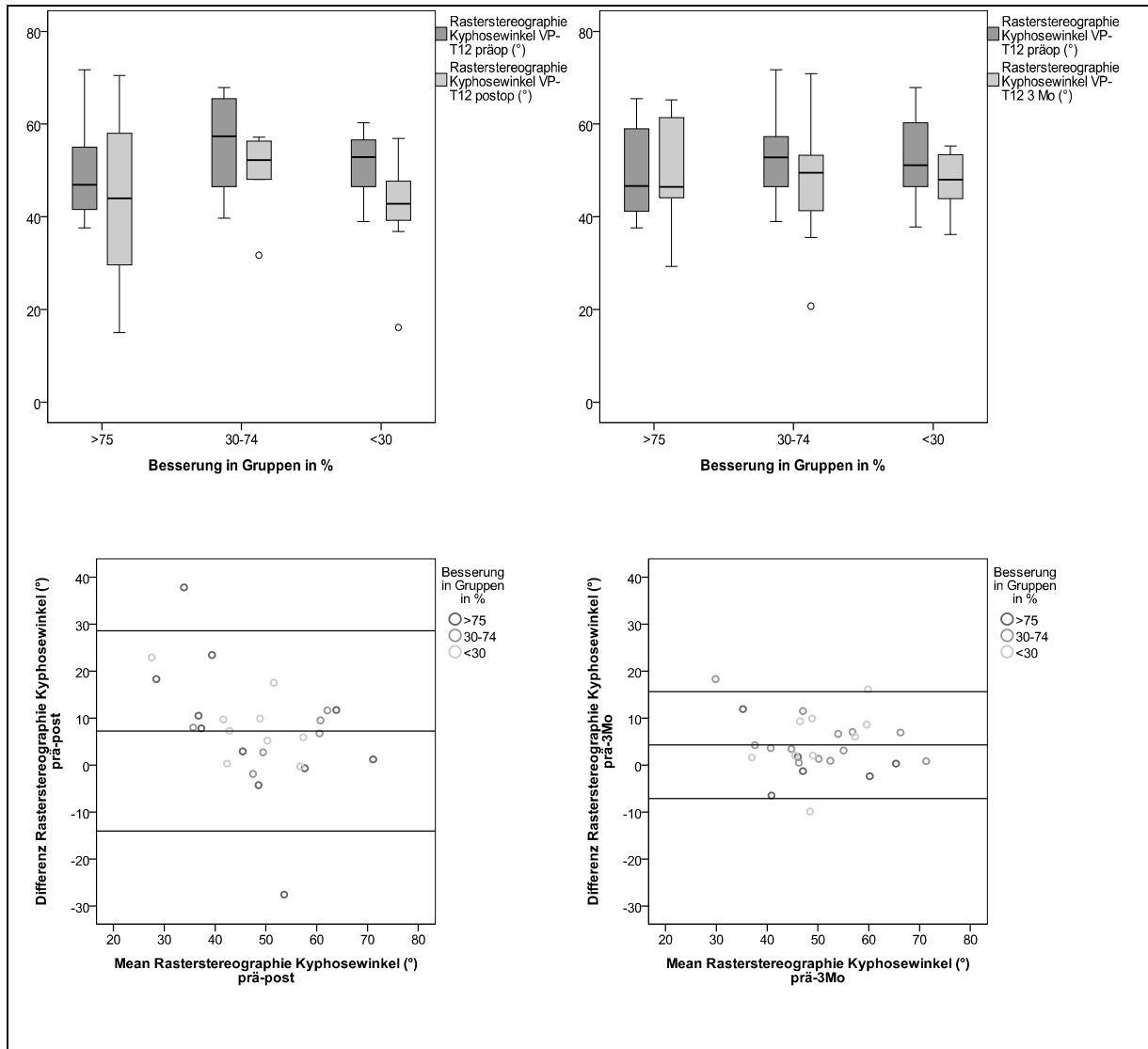


Abbildung 20: Kyphosewinkel (°) dorsale Fusionen und Differenz Kyphosewinkel (°) nach dorsaler Fusion perioperativ

Darstellung des Kyphosewinkels mittels Boxplots zu den Zeitpunkten prä- und postoperativ (links oben) und prä- und postoperativ nach 3 Monaten (rechts oben) aufgeteilt in Besserungsgruppen auf der NRS. Postoperativ liegt ein signifikant verringertes Kyphosewinkel vor ($p=0,001$), welcher im 3 Monatsverlauf wieder ansteigt, aber im Vergleich zum präoperativen Wert weiterhin eine signifikante Veränderung aufweist ($p<0,001$). In den hier dargestellten Bland-Altman-Plots (links und rechts unten) fällt im Vergleich eine größere Streuungswerte prä- zu postoperativ (links unten) als prä- zu 3 Monate postoperativ (rechts unten) auf. Abkürzungen: VP= Vertebra prominens, T12= 12. Brustwirbel, prä/präop= präoperativ, post/postop=postoperativ vor Entlassung, 3 Mo= 3 Monate postoperativ, Mean= Mittelwert, NRS= Numerische Rating Skala.

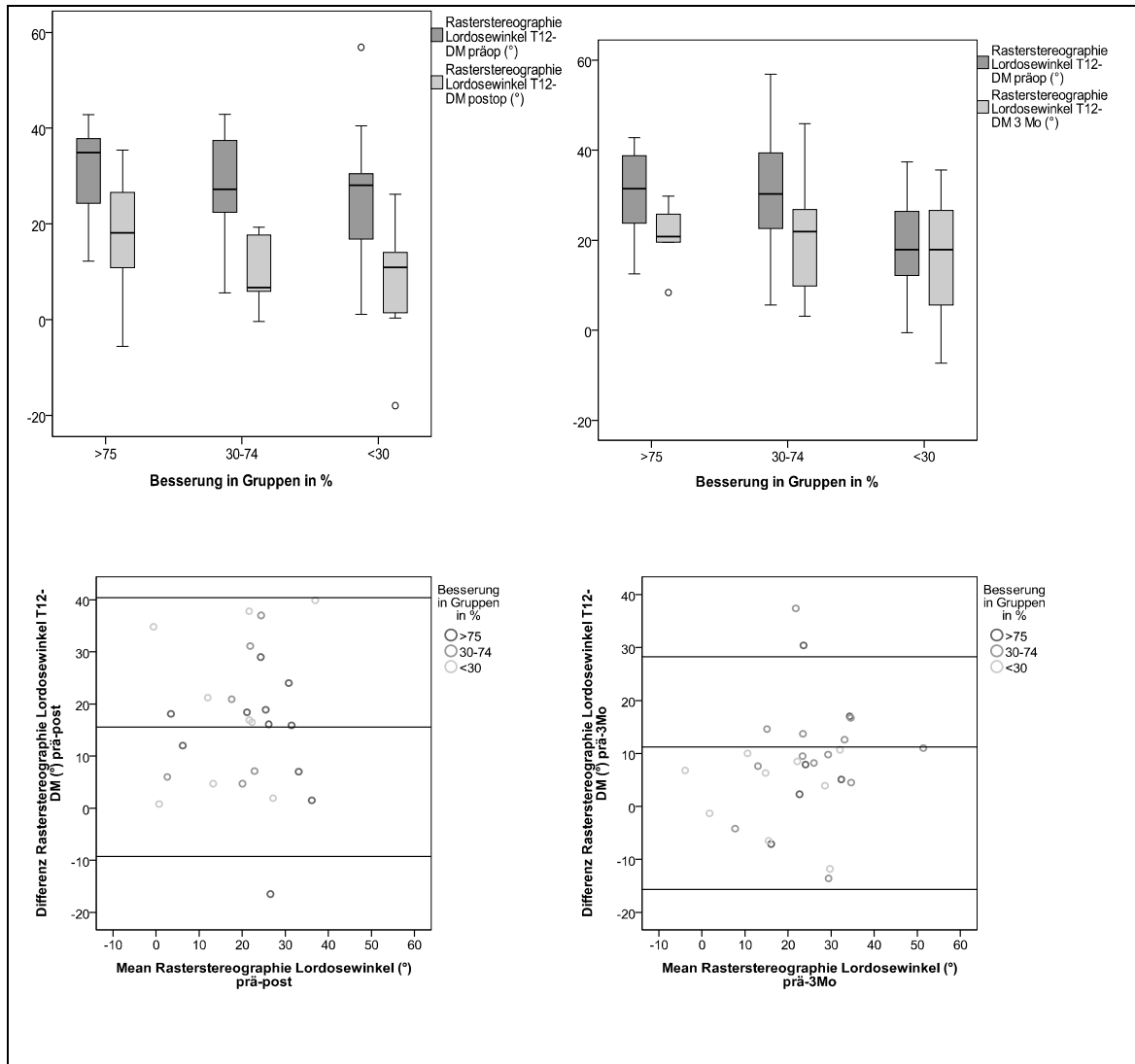


Abbildung 21: Lordosewinkel (°) dorsale Fusionen perioperativ

Dargestellt ist mittels Boxplots der Lordosewinkel zu den Messzeitpunkten prä- und postoperativ (links oben), sowie präoperativ und 3 Monate postoperativ (rechts oben). Insgesamt fällt eine signifikante Reduktion des Lordosewinkels auf ($p < 0,001$), welcher im 3-Monatsverlauf zwar wieder ansteigt ($p = 0,003$), aber nicht die präoperativen Ausgangswerte erreicht. (links und rechts unten) Bland-Altman-Plots, welche die Mittelwerte gegen die Differenz des Lordosewinkels der Messungen prä- zu postoperativ vor Entlassung (links unten) und prä- zu postoperativ nach 3 Monaten zeigen (rechts unten). Abkürzungen: DM= Mitte der beiden Dimple (Lumbalgrübchen), T12= 12. Brustwirbel, prä/präop= präoperativ, post/postop=postoperativ vor Entlassung, 3 Mo= 3 Monate postoperativ, Mean= Mittelwert.

3.5 Subjektive Ansprache Numerische Rating Skala

Die subjektive Aussage der Schmerzintensität wurde zu 3 Zeitpunkten anhand der numerischen Rating Skala angegeben. Diese Zeitpunkte umfassen die präoperative Angabe als Ausgangswert, die postoperative Angabe noch während des stationären Aufenthaltes vor Entlassung, und eine Angabe 3 Monate postoperativ. Die absolute Besserung wurde in Prozent berechnet jeweils in Bezug zum präoperativen Ausgangswert. Diese prozentualen Werte wurden in 3 Gruppen unterteilt: > 75% sehr gute Besserung, 30-74% moderate Besserung, < 30% keine relevante Besserung.

Abbildung 22 zeigt die Aufteilung der Besserungsgruppen nach Geschlecht in Bezug auf das Alter der Patienten. In der hier untersuchten Stichprobe ist in den Gruppen mit einer Besserung >75% zu beobachten, dass sowohl die Frauen als auch die Männer im Durchschnitt jünger sind als in den Gruppen <74%. Die Verteilung der Häufigkeiten wird in Tabelle 10 dargelegt.

Zeitpunkt	Geschlecht	Besserung >75%	Besserung 30-74%	Besserung <30%
präoperativ/postoperativ	männlich	8/18 (44,4%)	4/18 (22,2%)	6/18(33,3%)
	weiblich	8/21 (38,1%)	6/21 (28,6%)	7/21 (33,3%)
präoperativ/3 Monate	männlich	9/19 (47,4%)	5/19 (26,3%)	5/19 (26,3%)
	weiblich	5/20 (25,0%)	9/20 (45,0%)	6/20 (30,0%)

Tabelle 10: Absolute und relative Häufigkeiten der Besserung der Schmerzintensität in Bezug auf die NRS nach Operation

Absolute und relative Häufigkeiten in Prozent der Besserung der Schmerzen auf der NRS nach operativem Verfahren zu den Zeitpunkten postoperativ, vor Entlassung und 3 Monate postoperativ, unterteilt in 3 Gruppen jeweils nach Geschlecht: In der hier untersuchten Stichprobe zeigte sich postoperativ eine etwa gleiche Geschlechterverteilung, jedoch eine größere Schmerzreduktion bei den Männern nach 3 Monaten.

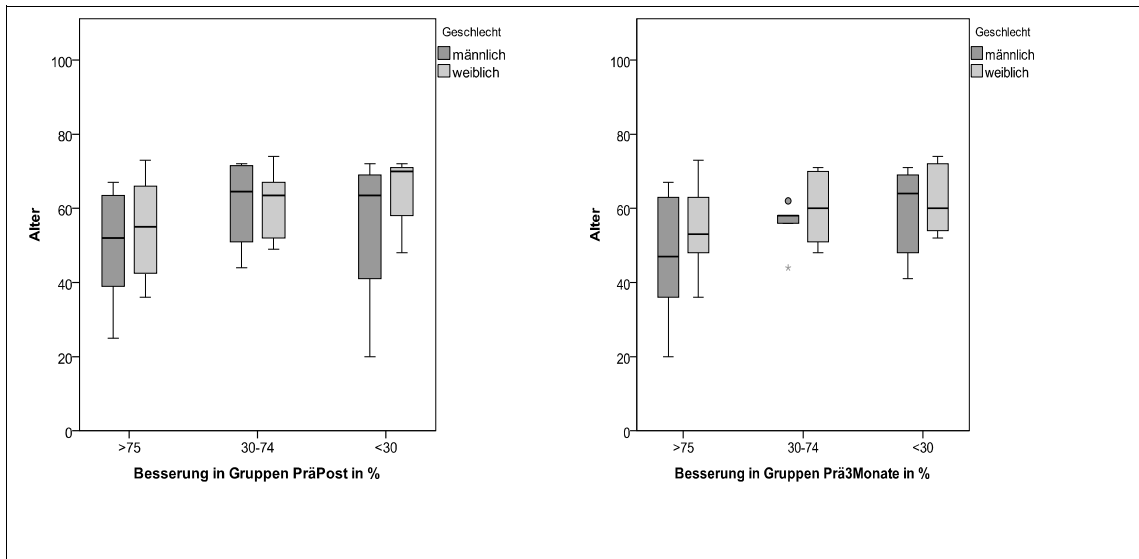


Abbildung 22: Perioperative Schmerzbesserung auf der NRS in Abhängigkeit des Patientenalters und -geschlechtes

Die beiden Diagramme zeigen je nach Alter und Geschlecht die Besserung der Schmerzintensität in Prozent unterteilt in 3 Gruppen, unabhängig von der Operationsmethode. Links: Besserung vom präoperativen Ausgangswert zum postoperativen Wert. Der Altersmedian in der Gruppe mit >75% ist in der hier untersuchten Stichprobe niedriger. Rechts: Besserung im Vergleich vom präoperativen Ausgangswert zum Wert nach 3 Monaten postoperativ. In der Gruppe mit gutem Ansprechen liegt der Altersmedian wieder niedriger, bei den Männern mehr als bei den Frauen. In der Gruppe mit schlechtem Ansprechen sind die Frauen nun jünger als die Männer im Vergleich zur postoperativen Gruppe. Abkürzungen: prä= präoperativ, post=postoperativ vor Entlassung, 3 Monate= 3 Monate postoperativ, Mean= Mittelwert

3.5.1 Ergebnisse Numerische Rating Skala dorsale Fusionen

Die Auswertung der Daten in Bezug auf die Numerische Rating Skala ergab sowohl zu beiden postoperativen Messzeitpunkten als auch im Vergleich zum Querschnittskollektiv einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) der Schmerzreduktion in der Gruppe der dorsalen Fusionen als auch im gesamten Patientenkollektiv unabhängig vom Operationsverfahren (s. Tab. 11). Der Verlauf der NRS zu den verschiedenen Messzeitpunkten wird in Abbildung 23 dargestellt.

	präop	postop	p ^t präop/ postop	3 Monate	p ^t präop/ 3Monate	1 Jahr	p* präop/ 1Jahr
NRS Pat. ges.	6,0 (0-9,5)	2,0 (0-9,0)	<0,001	3,0 (0-9,0)	<0,001	3,0 (0-9,0)	0,001
NRS LF	7,0 (0-9,5)	4,0 (0-9,0)	<0,001	3,5 (0-9,0)	<0,001	3,0 (0-9,0)	0,001

Tabelle 11: Perioperative Werte auf der NRS für die Zeitpunkte präoperativ, postoperativ vor Entlassung, 3 Monate postoperativ und 1 Jahr postoperativ

p-Werte im longitudinalen Vergleich präoperativ/postoperativ, präoperativ/3Monate postoperativ, sowie im Vergleich mit dem Querschnittskollektiv präoperativ/1 Jahr postoperativ jeweils in Bezug auf das komplette Patientenkollektiv und nur auf den Teil der Patienten mit dorsalen Fusionen. In beiden Gruppen zeigte sich ein signifikantes postoperatives Ergebnis. ^tWilcoxon-Test, *Mann-Whitney-U-Test. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop=postoperativ, NRS= Numerische Rating Skala, Pat.= Patienten, ges.= gesamt, LF= lumbale dorsale Fusion

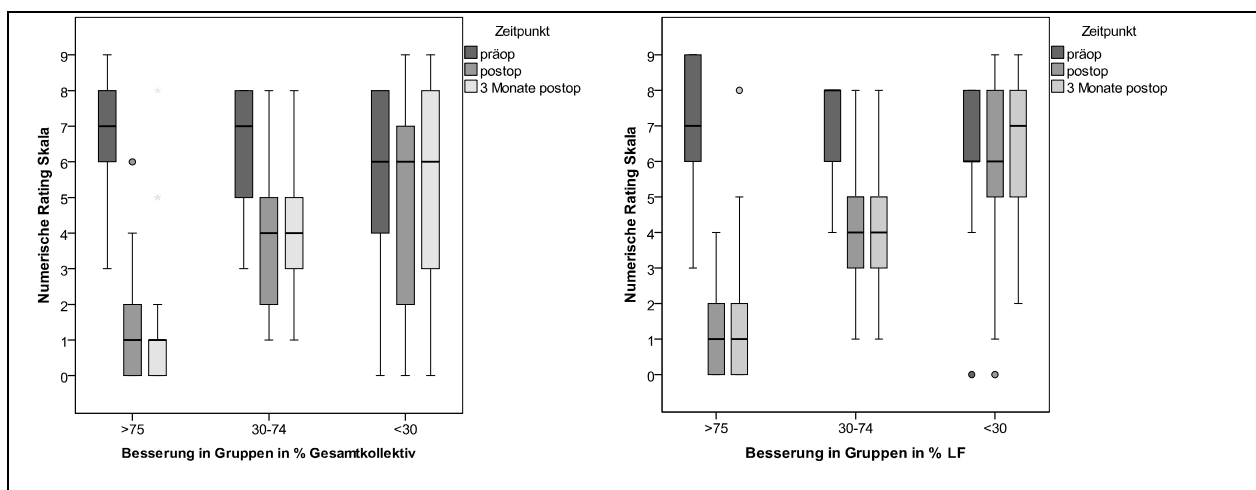


Abbildung 23: Besserung in Gruppen zu verschiedenen Messzeitpunkten des gesamten Patientenkollektivs und der Untergruppe nach dorsaler Fusion

Ergebnisse der Numerischen Rating Skala im Gesamtkollektiv (links) und im Kollektiv der dorsalen Fusionen (rechts) zu den Zeitpunkten präoperativ, postoperativ vor Entlassung und 3 Monate postoperativ unterteilt in Verbesserungsgruppen. In beiden Kollektiven zeigt sich postoperativ eine deutliche Verminderung der Schmerzen. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop=postoperativ vor Entlassung, 3 Monate= 3 Monate postoperativ, LF= lumbale dorsale Fusion

In Tabelle 12 findet sich eine Auflistung der Korrelation zwischen der NRS und den Differenzvariablen der Rasterstereographie und der Ganganalyse. Berechnet wurde die Korrelation mittels Kendall-tau-b. Eine Korrelation zu einem veränderten Gang- oder Standbild konnte hier nicht beobachtet werden.

	NRS präop/postop Kendall-tau-b/p	NRS päop/3Monate postop Kendall-tau-b/p
Differenz Rumpflänge VP- DM (mm)	0,025/0,859	-0,262/0,056
Differenz Rumpfneigung VP- DM (°)	-0,026/0,859	-0,300/0,029
Differenz Lotabweichung VP-DM (°)	-0,035/0,807	-0,093/0,499
Differenz Kyphosewinkel (°)	-0,035/0,807	-0,232/0,091
Differenz Lordosewinkel (°)	-0,057/0,690	0,109/0,426
Differenz Kadenz (Schritte/min)	-0,357/0,031	0,124/0,398
Differenz Fußrotation (°)	-0,076/0,648	-0,036/0,811
Differenz Schrittlänge (cm)	0,006/0,972	-0,241/0,119
Differenz Schrittweite (cm)	-0,041/0,816	-0,202/0,166
Differenz Standphase (%)	-0,054/0,751	-0,048/0,742
Differenz Kadenz (Schritte/min)	-0,357/0,031	0,124/0,398

Tabelle 12: Korrelationsanalyse zu verschiedenen Messzeitpunkten nach dorsaler Fusion in Bezug auf die NRS.

Bivariate Korrelation mit Kendalls-tau-b und p-Werten zwischen präoperativ und postoperativ vor Entlassung erhobenen Werten, und zwischen präoperativ und 3 Monate postoperativ erhobenen Werten. Eine Korrelation konnte hier nicht gefunden werden. Abkürzungen: präop= präoperativ, postop=postoperativ vor Entlassung, 3 Monate= 3 Monate postoperativ, VP= Vertebra prominens, DM= Mitte der beiden Dimple (Lumbalgrübchen)

4. Diskussion

Das Ziel dieser Studie war es zu eruieren, inwieweit sich eine eingetretene oder ausbleibende subjektive Besserung der Rückenschmerzen bei Patienten nach einer Wirbelsäulenoperation objektivieren lässt anhand von Veränderungen der Gang- und Handlungsvariablen mittels Laufbandanalyse und Rasterstereographie. Das Schmerzniveau wurde mithilfe der NRS abgefragt.

Insgesamt nahmen 92 Patienten mit chronischen Rückenschmerzen und Indikation zu einer Wirbelsäulenoperation an dieser Studie teil, der Zeitraum der Studie erstreckte sich von September 2012 bis Dezember 2013. Zum einen wurde ein Kollektiv über einen Zeitraum von 3 Monaten zu den Zeitpunkten präoperativ, postoperativ vor Entlassung aus dem Krankenhaus und zur 3 Monatskontrolle untersucht. Zum anderen wurde ein Querschnittskollektiv 1 Jahr postoperativ untersucht. Zu jedem Messzeitpunkt wurde die aktuelle Schmerzsituation unter Zuhilfenahme der NRS ermittelt und eine prozentuale Besserung berechnet. Zum Vergleich wurden 30 Personen ohne Rückenleiden vermessen (Normkollektiv).

Zu beiden Messzeitpunkten nach erfolgter Wirbelsäulenoperation konnte ein gutes subjektives Ansprechen auf die chirurgische Intervention im Sinne einer signifikanten und relevanten Schmerzlinderung dokumentiert werden. Trotzdem ergaben sich keine relevanten Unterschiede im Zusammenhang mit den Messwerten der Laufbandanalyse, mit Ausnahme der Kadenz und der Doppelschrittlänge, bei welchen sich durchaus eine Entspannung des Gangbildes zeigte. In der Rasterstereographie konnte eine signifikante postoperative Reduktion des Kyphose- und des Lordosewinkels erfasst werden. Zieht man das Normkollektiv als Vergleichsgruppe hinzu, ergaben sich signifikante Differenzen bei den präoperativen Messwerten der Rumpflänge, der Rumpfneigung, der Lotabweichung, des Lordosewinkels, der Differenz der Schrittlänge und der Doppelschrittlänge, welche allerdings auch postoperativ nicht die Werte des Normkollektivs erreichten.

4.1 Gang- und Standanalyse auf dem Laufband

Die Beschreibung des Körpers als Aufteilung in die Passagier- und Antriebseinheit als Funktionseinheiten stellt eine untrennbare Verbindung zwischen der Wirbelsäule und dem Gangbild her. In der hier präsentierten Studie wurden Parameter unter dem Aspekt der Gangsymmetrie untersucht, da chronische Rückenschmerzpatienten häufig ein verändertes Gangbild aufweisen, um ihren Bewegungsradius und auf den Körper einwirkende Kräfte klein zu halten, um möglichst wenig Schmerz zu empfinden^{104,105}.

Die präoperativen Werte der Stand- und Ganganalyse auf dem Laufband ergaben statistisch signifikante Unterschiede bei der Geschwindigkeit, der Differenz der Schrittlänge und der Doppelschrittlänge zu den erhobenen Werten des Normkollektivs. Keine signifikanten Unterschiede ergaben sich bei der Kadenz, der Differenz der Fußrotation, der Standphase oder der Schrittweite.

Nicht signifikant ($p=0,079$), jedoch auffällig, war die größere Differenz der Belastungsverteilung des Gewichts zwischen linkem und rechtem Fuß im präoperativen Gesamtkollektiv von 16,9% im Gegensatz zum Normkollektiv mit 7,3% in der Standanalyse. Bei der Untergruppe der dorsalen Fusionen betrug die Differenz zum präoperativen Zeitpunkt 12%, welche sich postoperativ auf 7,5% reduzierte ($p=0,147$), was etwa der Differenz des Normkollektivs entsprach. Dieses Ergebnis kann für eine einseitige Entlastung aufgrund der Rückenschmerzen bei dem präoperativen Kollektiv sprechen, welche nach Besserung der Schmerzsituation ausgeglichen wird. In der Literatur lassen sich keine vergleichbaren Untersuchungen finden. Allerdings wird bei Patienten mit chronischem unterem Rückenschmerz von einer Assoziation der Schmerzintensität mit der posturalen Kontrolle berichtet. Die posturale Stabilität spielt eine entscheidende Rolle für die Bewahrung des Körperschwerpunkts und somit für den aufrechten Stand. Palm et al. berichten in einer Studie von einer Verbesserung der posturalen Stabilität bei einer Schmerzreduktion nach periduraler Infiltrationstherapie für Messungen des bilateralen Stands auf einer frei beweglichen Plattform¹⁰⁶. Ruhe et al. sehen ebenfalls eine enge Assoziation zwischen den posturalen Schwankungsbewegungen und der Schmerzstärke.

Sie untersuchten 38 Patienten mit nicht-spezifischem unterem Rückenschmerz und zum Vergleich ein gesundes Kontrollkollektiv. Die posturale Schwankung des bipedalen Stands wurde mittels einer Kraftmessplatte erfasst. Bei einer Abnahme der Schmerzintensität auf der NRS 3-4 Tage nach Manualtherapie kam es zu einer signifikant geringeren posturalen Schwankung. Bei gleichbleibender NRS nach der Therapie stellten sich die Schwankungswerte ähnlich zur Voruntersuchung dar¹⁰⁷. Radebold et al. beschreiben eine Korrelation einer schwächeren posturalen Kontrolle und einer länger dauernden Muskelantwort der Oberkörpermuskulatur bei Patienten mit chronischem Rückenschmerz¹⁰⁸. Auch Hodges et al. vermuten eingeschränkte posturale Stabilität bei Patienten mit chronischem Rückenschmerz nicht nur durch den Schmerz bedingt, sondern auch durch eine komplex veränderte motorische Verarbeitung und eine Veränderung der Muskelantwort der Stammmuskulatur¹⁰⁹.

Die Kadenz in der Gruppe des gesamten präoperativen Patientenkollektivs fiel mit im Durchschnitt 69 Schritten/Minute geringer aus als in der Gruppe des Normkollektivs mit 95 Schritten/Minute ($p=0,298$). Dabei ist jedoch auch die unterschiedliche durchschnittliche Laufbandgeschwindigkeit zu beachten: Die mittlere Ganggeschwindigkeit lag im präoperativen Kollektiv mit 1,8 km/h signifikant niedriger im Vergleich zum Normkollektiv mit 2,5 km/h ($p<0,001$). Von Khodadadeh et al. wurden in der Gruppe der Rückenschmerzpatienten über eine geringere Anzahl an Schritten/Minute berichtet: durchschnittlich wurden nur Kadenzwerte in Höhe von 75% im Vergleich zu deren Referenzkollektiv erreicht. Die Gang-Geschwindigkeit wurde von den Patienten und Probanden des Referenzkollektivs dabei selbst gewählt¹⁰⁴. Hierbei ist jedoch auch eine verminderte Laufgeschwindigkeit anzunehmen, da sonst ja die Schrittlänge der Patienten mit Rückenschmerzen deutlich über denen ohne Rückenschmerzen liegen würde. Laut den veröffentlichten Normwerten für ein freies Gehen von Kramers-de Quervain et al. beträgt der Wert für die Kadenz 105-130 Schritte/Minute. Unter freiem Gehen verstehen sie dabei eine vom Individuum gewählte Geschwindigkeit, „die mit dem niedrigsten Energieverbrauch

verbunden ist¹¹⁰ und Funktionalität zum Ausdruck bringt. Zudem wird dabei eine Proportionalität sowohl der Schrittlänge als auch der Kadenz bei zunehmender bzw. abnehmender Gang-Geschwindigkeit bei einer Kadenz zwischen 80-120 Schritten pro Minute berichtet¹¹⁰. Je mehr Schritte pro Minute vollzogen werden, desto größer wird wiederum die Schrittlänge und damit erhöht sich auch die Gehgeschwindigkeit. Auch die Doppelschrittlänge war im Patientenkollektiv mit 64,25 cm geringer als die Doppelschrittlänge des Normkollektivs mit 75,73 cm ($p=0,049$). Normwerte für einen Doppelschritt wurden von Kramers-de Quervain mit 1,3-1,5 m für Erwachsene bei einer freien Gang-Geschwindigkeit von 1,2-1,5 m/s¹¹⁰, umgerechnet 4,3-5,4 km/h, und von Kalron et al. mit 1,15 m bei einer Gang-Geschwindigkeit von 3,5 km/h angegeben¹¹¹, welche sich selbst von dem hier untersuchten Normkollektiv deutlich unterscheiden. Ein möglicher Grund könnte der Umstand des ungewohnten Laufens auf einem Laufband im Gegensatz zum freien Laufen auf einer Ebene oder einem Laufsteg sein, was mit der Kontrolle der Balance assoziiert ist und den Probanden außerdem ein höheres Maß an Konzentration abverlangt. Zudem lag die Geschwindigkeit bei dem Normkollektiv durchschnittlich bei 2,5 km/h und bei den Patienten nur bei 1,8 km/h. Die langsamere Geschwindigkeit bietet also ebenfalls eine Erklärung für die kürzere Doppelschrittlänge. Wearing et al. verglichen Gangparameter bei gesunden Probanden auf einem elektronischen Laufsteg mit denen auf einem Zebris Laufband mit derselben Geschwindigkeit (4,7 km/h). Sie fanden nur kleine, jedoch statistisch ausschlaggebende Differenzen der Gangparameter, wie Stand-, Schwung- und Doppelstandphase und Schrittlänge ($p<0,001$), ein Vergleich der Schrittweite ergab keine signifikanten Unterschiede. Die Schrittlänge war kürzer und die Kadenz war größer auf dem Laufband als auf dem Laufsteg¹¹². Für die Interpretation der Ergebnisse sollten daher Normwerte für das freie Gehen nicht als Vergleich für eine Laufbandanalyse herangezogen werden. Das Kollektiv der gesunden Probanden lief ebenfalls auf einem Laufband, war aber bei Kalron deutlich jünger gewählt mit im Durchschnitt 39,5 Jahren¹¹¹ als in der hier präsentierten Studie mit durchschnittlich 56 Jahren, was als denkbare Erklärung der unterschiedlichen Schrittlänge trotz ähnlicher

Messbedingungen dient. Untersuchungen bei Faude et al. ergaben keinen signifikanten Unterschied für Gangparameter wie Kadenz, Schrittweite, Schrittlänge oder Standphase bei wiederholten Messungen am gleichen und an verschiedenen Tagen auf dem Laufband mit dem Zebris FDMT-System¹¹³, so dass wohl auch nach der Gewöhnung an das Laufen auf einem Laufband keine relevanten Änderungen zu erwarten wären.

In der longitudinalen Gruppe der dorsalen Fusionen ergaben sich keine relevanten Unterschiede in Bezug auf die Gangsymmetrie. In Anbetracht der unterschiedlich ausgeprägten Beschwerden konnte keine standardisierte Geschwindigkeit für alle Patienten bestimmt werden. Die individuell für den Patienten ausgewählte Geschwindigkeit, welche am ehesten seiner normalen Ganggeschwindigkeit entsprach, wurde jedoch für alle 3 Messungen beibehalten. Ebenfalls wurde in anderen Abhandlungen, welche sich mit dem Thema Ganganalyse beschäftigten, eine für den Patienten als angenehm erscheinende Geschwindigkeit gewählt^{104,105,113}. Allerdings fanden Dal et al. und Marsch et al. in vorherigen Untersuchungen in diesen Fällen eine langsamere Geschwindigkeit und demzufolge eine relativ kleinere Schrittlänge (ca. 12%) und geringere Kadenz (ca. 6%) auf dem Laufband als im Vergleich zum Laufen auf einem Laufsteg^{114,115}.

In der hier präsentierten Studie war einzig eine Abnahme der Kadenz in der Gruppe der dorsalen Fusionen postoperativ vor Entlassung ($p=0,007$) zu finden von 94,5 Schritten/min auf 87,5 Schritte/min. Nach 3 Monaten blieb diese Abnahme, zeigte sich jedoch nur noch geringer ausgeprägt mit 90,5 Schritten/min. Die Querschnittsgruppe wies die höchste Kadenz mit 101,5 Schritten/min auf.

Die Doppelschrittlänge verkürzte sich in dem hier untersuchten Patientenkollektiv signifikant von 63,77 cm auf 56,84 cm postoperativ ($p=0,016$). Jedoch konnte ein erneuter Anstieg nach 3 Monaten auf 67,53 cm ($p=0,750$) beobachtet werden, welcher dem des 1 Jahres-Querschnittskollektivs mit 67,79 cm ähnelte. Stief et al. berichteten über eine Zunahme der

Schrittlänge nach bereits 6 Monaten nach einer mono- oder bisegmentalen dorsalen Fusion¹¹⁶. Khodadadeh fand 6 Monate nach einer Wirbelsäulenoperation kaum Veränderungen des Gangbildes, erst nach 2 Jahren konnte eine Verbesserung von 59% der untersuchten Patienten belegt werden¹⁰⁴. Diese Datenlage führt zu der Überlegung, dass 3 Monate ein zu kurzer Beobachtungszeitraum zur Verlaufsbeurteilung sein könnte, und dass hierdurch eine mögliche Erklärung für die nicht signifikanten Ergebnisse der Symmetrieparameter gegeben ist. Auch die im Vergleich höhere Kadenz des Querschnittskollektivs lässt vermuten, dass eine längere Verlaufsbeobachtung erst bedeutende Ergebnisse zulässt. Bei der Interpretation der Daten des Querschnittskollektivs ein Jahr postoperativ ist nämlich darauf hinzuweisen, dass hier aufgrund der Vorauswahl über das Aufsuchen der Patienten der Sprechstunde der Orthopädischen Universitätsklinik Tübingen ein relevanter Rekrutierungsbias vorliegt, so dass bei einem direkten Vergleich im Sinne einer extrapolierten Interpretation als Ergebnis für ein Jahr postoperativ äußerste Zurückhaltung geübt werden muss.

Trotz der signifikanten Schmerzerleichterung bei einem Großteil der Patienten sowohl postoperativ vor Entlassung als auch nach 3 Monaten konnte in der hier präsentierten Studie keine Korrelation zwischen der subjektiven Besserung und den Veränderungen des Gangbilds gezeigt werden.

Chronische Rückenschmerzen führen zur Aneignung einer Schonhaltung mit dem Ziel der Schmerzreduktion und auch zu einem pathologischen Gangbild, welches unter anderem durch eine geringere Ganggeschwindigkeit und kürzere Schrittlänge charakterisiert ist¹¹⁷. Die erlernten und über viele Jahre angewandten Bewegungs- und Haltungsmuster führen oft auch zu strukturellen Veränderungen an der Wirbelsäule, wie beispielsweise Verkürzungen und Insuffizienz der Muskulatur. Nach einer Wirbelsäulenoperation müssen Adaptationsprozesse an die neue Haltung stattfinden und die entstandenen Defizite am Bewegungsapparat mittels körperlichem Training ausgeglichen werden. Es sollten sowohl das Haltungs- als auch das Gangbild postoperativ noch über einen längeren Zeitraum beobachtet werden um weitere Aussagen zu diesen Punkten treffen zu können.

4.2 Rasterstereographie

Die frei von gesundheitsgefährdenden Strahlen lichtoptische Vermessung des Wirbelsäulenprofils bietet eine hohe Präzision und Reliabilität und wurde bereits in zahlreichen Studien^{101,118,119} als geeignetes Mittel zur klinischen Diagnostik und Verlaufskontrolle bei Wirbelsäulenveränderungen etabliert¹²⁰.

Da sich keine einheitliche Definition für eine normale menschliche Haltung findet, wurde für diese Studie ein Referenzkollektiv ohne Rückenschmerzen vermessen und als Vergleichsgruppe herangezogen. Drerup et al. fanden eine Messgenauigkeit der anatomischen Landmarken von 1 mm für VP, DL und DR. Der Sakrumpunkt ist als die am wenigsten genaue Landmarke anzusehen, da eine hohe Konkavkrümmung in diesem Bereich des Körpers vorliegt¹⁰¹.

Im gesamten Patientenkollektiv zeigte sich präoperativ eine signifikante Differenz der Rumpflänge von 20 mm ($p=0,008$), der Rumpfneigung von mehr als 4° ($p<0,001$) und der Lotabweichung von $0,7^\circ$ ($p=0,001$) im Vergleich zum Normkollektiv. Der Lordosewinkel war im präoperativen Patientenkollektiv mit $24,84^\circ$ signifikant flacher als in der Vergleichsgruppe mit $32,76^\circ$ ($p=0,029$). Die Unterschiede des Kyphosewinkels waren jedoch nicht signifikant.

Schröder et al. untersuchten 177 gesunde Personen ohne Rückenbeschwerden im Alter zwischen 19 und 40 Jahren und 72 Personen mittleren Alters mit Rückenschmerzen im Bereich der Lendenwirbelsäule und des Iliosakralgelenks. Bei den Probanden mit Rückenschmerzen war auch bei der Arbeit von Schröder eine größere Rumpfneigung zu erkennen im Vergleich zu den beschwerdefreien Personen¹²¹. Eine weitere Arbeit von Schröder et al. zeigte ähnlich der Ergebnisse der hier präsentierten Studie sowohl eine bedeutend ausgeprägtere Rumpfneigung und Lotabweichung bei den Rückenschmerzpatienten. Zudem fand sich in Schröders Studie auch ein flacherer Lordosewinkel bei den Rückenschmerzpatienten gegenüber den gesunden Personen. Die Rumpfneigung, die Lotabweichung und den Lordosewinkel sieht Schröder als geeignet zur Differenzierung von

Rückenschmerzpatienten und Nicht-Rückenschmerzpatienten¹²². Von ihm wird eine hohe Reliabilität der sagittalen Wirbelsäulenformparameter beschrieben, wozu auch die Rumpfneigung zählt, allerdings eine geringere Reliabilität der frontalen Parameter wie der Lotabweichung¹²³. Ein möglicher Grund für die Differenzen zwischen den gesunden Probanden und den Wirbelsäulenpatienten könnten degenerative Veränderungen im Sinne von Bandscheibendegenerationen mit ventralem Höhenverlust sein aber natürlich auch schmerzbedingte Fehlhaltungen.

Für den Lordosewinkel findet man in der Literatur bei Schröder et al. für erwachsene Frauen einen Referenzwert von $43(\pm 8)^\circ$ und für erwachsene Männer von $36(\pm 7)^\circ$ ¹²¹ und laut Mohokum et al. beträgt der Lordosewinkel hingegen bei 51 untersuchten gesunden Personen $34,16(\pm 8,73)^\circ$ ohne Angabe des Geschlechts (Alter $24,6(\pm 5,6)$)¹²⁰. In der hier präsentierten Studie betrug der Mittelwert des Lordosewinkels $32,76(\pm 11,39)^\circ$ bei den beschwerdefreien Probanden (Alter 56 (47-74)). Das Augenmerk sollte hier den Altersgruppen gelten. Die Lordose ändert sich im Laufe des Heranwachsens und eine Abflachung der Lordose konnten Takeda et al. in einer Verlaufsbeobachtung bei Patienten im höheren Lebensalter zwischen 62-88 Jahren verifizieren¹²⁴. Die Entlordosierung kann somit auf ein höheres Lebensalter zurückgeführt werden, ebenso wie eine degenerative Kyphosierung¹²⁵. Es finden sich in der Literatur auch Hinweise, dass eine Lordoseabflachung in Beziehung zu unteren Rückenschmerzen steht¹²⁵, so dass bei der präoperativen Patientengruppe der niedrigere Lordosewinkel mit $24,84(\pm 14,53)^\circ$ hierdurch erklärt werden könnte. Der Richtwert für den Kyphosewinkel bei Erwachsenen wird bei Schröder et al. mit $48(\pm 9)^\circ$ ¹²¹ und bei Mohokum et al. mit $44,07(\pm 8,34)^\circ$ ¹²⁰ angegeben. Ähnliche Werte konnten in der hier präsentierten Arbeit beobachtet werden mit einem Kyphosewinkel von $46,48(\pm 11,04)^\circ$.

In der longitudinalen Gruppe war bei der Haltungsanalyse mittels Rasterstereographie ein postoperativ vor Entlassung verringerter Kyphose- und Lordosewinkel aufgefallen ($p=0,001$ und $p<0,001$). Der Kyphosewinkel sank postoperativ um 8° von $52(\pm 10,5)^\circ$ auf $43,9(\pm 13,9)^\circ$, stieg jedoch in der 3-

Monatskontrolle wieder an auf $48,6(\pm 10,9)^\circ$ ohne dabei den Ausgangswert zu erreichen. Ebenfalls der Lordosewinkel wurde postoperativ um 16° reduziert von $28(\pm 13,7)^\circ$ auf $11,9(\pm 12,6)^\circ$ und stieg in der 3-Monatskontrolle auf $22,6(\pm 13,7)^\circ$. Diese Veränderungen des sagittalen Profils lassen auf einen Adaptationsprozess nach erfolgter Operation schließen. Die durchschnittliche Korrektur des Lordosewinkels bei einer Instrumentation wird für L4-L5 mit 6° und für L5-S1 mit 11° in der Literatur angegeben¹²⁶. Ein geringerer Lordose- und Kyphosewinkel könnten auch durch die Fusion bedingt sein, falls während der Operation nicht genügend Lordose in die Instrumentation eingebracht werden kann. Sollte dies der Fall sein, dann wäre eine im Verlauf erneute Relordosierung über eine Über-Lordose in den angrenzenden Segmenten zu erklären, was jedoch erneut zu Rückenschmerzen führen könnte. Alternativ ist auch an eine reflektorische Steilstellung der angrenzenden Segmente durch die Schmerzsymptomatik zu denken, welche sich im Verlauf wieder normalisiert. Dies wäre jedoch nur abschließend mit Röntgenaufnahmen zu evaluieren.

Man sollte bedenken, dass die Patienten postoperativ Schmerzmittel zu sich nahmen und während des stationären Aufenthaltes pflegerisch umsorgt wurden. Eine wieder vermehrte Kyphose kann unterschiedlichste Gründe haben. Unter anderem könnte sie eine schmerzbedingte Schonhaltung durch die Entlastung der Facettengelenke der Brustwirbelsäule nach Reduktion der Analgetika sein. Alternativ könnten Verspannungen aus der Lendenwirbelsäule nach lumbaler dorsaler Fusion sich über den M. erector spinae bis in die Brustwirbelsäule fortsetzen. Mit einer Entspannung der Lendenwirbelsäule würde dann auch die Brustwirbelsäule entsprechend wieder ihr Profil erreichen. Auch erscheint eine Anpassung der thorakalen Krümmung in Abstimmung mit Veränderungen der lumbalen Krümmung zur Wahrung des sagittalen Profils sinnvoll.

Trotz der signifikanten postoperativen Ergebnisse der Schmerzerleichterung konnte kein Zusammenhang mit den Veränderungen der Parameter der Rasterstereographie hergestellt werden.

Als wichtiges Kriterium bei den Fusionsoperationen der Lendenwirbelsäule wird die Wiederherstellung der lumbalen Lordose gesehen, da sie zur sagittalen Balance beiträgt und es sonst zu einer schnelleren Degeneration der

benachbarten Segmente oder chronischen Rückenschmerzen kommen kann¹²⁶. Es gibt bisher keine Definition eines optimalen Lordosegrades¹²⁷. Ob der verringerte Lordosewinkel nun als Kriterium der Besserung des Beschwerdepotentials zu deuten ist, sollte weiter diskutiert werden, da in der Literatur ein flacher Lordosewinkel vor allem bei Männern in Korrelation mit Beschwerden des unteren Rückens gebracht wird^{124,125}.

Gegenüber dem 1-Jahres-Querschnittskollektivs ergaben sich keine signifikanten Differenzen in Bezug auf den Kyphose- oder Lordosewinkel. Signifikante Unterschiede wiesen weder die Werte der Rumpfneigung noch der Lotabweichung in der longitudinalen Gruppe auf. Lediglich die Rumpflänge war mit 448,29 mm signifikant geringer ($p=0,004$) und ähnelte der des Normkollektivs mit 447,10 mm.

Ebenso war die Rumpflänge des beschwerdefreien Normkollektivs um 20 mm niedriger als die der Rückenschmerzpatienten ($p=0,008$). Im Vergleich entsprach die Rumpflänge des Normkollektivs aus der Arbeit von Mohokum et al. (461,87 mm)¹²⁰ eher den Werten des präoperativen Kollektivs der hier präsentierten Studie (460,14($\pm 35,28$)mm). Denkbar ist eine Stichprobenverzerrung. Im Rahmen dieser Studie wurde nicht näher auf die Größe der Patienten eingegangen. Coeuret-Pellicer et. al beschreiben einen signifikant höheren Anteil der Männer in der Gruppe der Rückenoperationen, die durchschnittlich größer sind als in den Vergleichsgruppen ohne Rückenschmerzen und mit unteren Rückenschmerzen ohne Voroperation. Dieselbe Tendenz war auch bei den Ergebnissen der Frauen zu beobachten¹²⁸. Einen Zusammenhang zwischen der Körpergröße und Wirbelsäulenoperationen bei Rückenschmerzpatienten sehen auch Hershkovich et al. und benennen eine größere Körpergröße sogar als Risikofaktor für eine Rückenoperation¹²⁹. Die unterschiedliche Größe könnte eine Erklärung für die unterschiedliche Rumpflänge von Patienten- und Normkollektiv in der hier präsentierten Studie sein, denn die Personen der Patientengruppe (1,71($\pm 0,10$)m) waren im Durchschnitt größer als die Personen der Referenzgruppe (1,68($\pm 0,08$)m).

Eine Korrelation zwischen subjektiver Schmerzbesserung und der objektiven Änderung der Messwerte der Rasterstereographie und der Laufbandanalyse konnte letztendlich in dieser Studie nicht gefunden werden.

4.3 Studienlimitationen

Für die longitudinale Gruppe in dieser Studie wurde ein Zeitraum von 3 Monaten als Verlaufskontrolle herangezogen. Dieser Messzeitraum ist womöglich zu kurz um relevante Unterschiede erkennen zu können, denn eine Änderung des Gangmusters könnte auch eine längere Adaptationsphase erfordern. Durch das ausgedehnte Einzugsgebiet des Universitätsklinikums würde jedoch eine länger angelegte Nachsorge durch nur noch sehr eingeschränkte Terminwahrnehmung der einbestellten Patienten aufgrund der weiten Anfahrt ohnehin zu einem relevanten Rekrutierungsbias führen.

Um die Patienten jeweils in ihrem eigenen Gangbild sinnvoll zu erfassen, wurde patientenindividuell jeweils die maximale, aber noch gut tolerierbare Geschwindigkeit ermittelt. Dies bedeutet aber auch, dass keine einheitliche Geschwindigkeit für die Studienteilnehmer auf dem Laufband verwendet wurde. Allerdings wurden die Messungen innerhalb eines Patienten stets mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit wiederholt. Zur Beurteilung wurden daher statt Absolutwerten eher Verlaufparameter betrachtet sowie Symmetriekriterien im Sinne eines harmonischen Gangbildes. In der Literatur findet man Angaben über eine signifikante Abhängigkeit zwischen der gewählten Laufbandgeschwindigkeit und den verschiedenen Gangphasen in einem Gangzyklus¹³⁰. Gerade deshalb sind die Ergebnisse dieser Studie insbesondere longitudinal von Interesse.

Für die Standanalyse wurde eine Messphase von 10 Sekunden durchgeführt. Da allerdings die Standposition häufig ausbalanciert wird¹³¹ und eine Messung zu ungenau wäre, wurden insgesamt zu jedem Messzeitpunkt 3 Messungen durchgeführt und ein Durchschnittswert zur Belastungsverteilung berechnet.

Bereits in mehreren veröffentlichten Studien wurde über die Präzision der Messverfahren Rasterstereographie und Laufbandanalyse berichtet, welche auch bei verschiedenen Untersuchern als verlässlich eingestuft werden¹¹⁹. Die Aufnahmen der Rasterstereographie sind zwar durch Vorgaben wie Abstand zur Kamera und durch eine Fixpunktanalyse reproduzierbar, jedoch ist zu bedenken, dass diese Untersuchung jeweils eine Momentaufnahme widerspiegelt und dem Probanden Haltungskriterien vorgeschrieben werden, welche möglicherweise nicht seiner natürlichen Haltung entsprechen. Eine Haltungsveranz kann auch durch die Ein- und Ausatmung in Erscheinung treten wie bei Degenhardt et al. beschrieben¹³². Außerdem kommt es vor, dass vom Untersucher eine Fixpunkt Korrektur vorgenommen werden muss, falls das Programm die Fixpunkte z.B. aufgrund von Adipositas¹³³ dem Skelettsystem nicht korrekt zuordnen kann und dies als mögliche Fehlerquelle in Betracht gezogen werden sollte. Dies gilt insbesondere deswegen, da das hier untersuchte Kollektiv mit einem BMI von 27,7 entsprechend übergewichtig war. Schließlich beschrieben Asamoah et al. Einschränkungen der Messgenauigkeit bei übergewichtigen Skoliosepatienten¹³⁴. Diese konnten Mohokum et al. in einer weiteren Studie nicht bestätigen¹²⁰. Nachdem die Datenlage diesbezüglich nicht einheitlich ist, ist eine Einschränkung der Aussagegenauigkeit aufgrund des erhöhten Körpergewichtes des hier präsentierten Studienkollektives jedoch nicht prinzipiell auszuschließen.

Bei der Interpretation sollte auch bedacht werden, dass die Wirbelsäulenoperationen zwar aufgrund einer sorgfältig ausgewählten Indikationsstellung durchgeführt wurden, jedoch die Genese der Beschwerden vielfältig ist und die Lokalisation und die Anzahl der betroffenen Segmente der Wirbelsäule variieren. Eine Aussage dieser Studie speziell auf Subgruppen bezogen ist insofern nicht möglich, sondern bezieht sich lediglich auf das allgemeine orthopädische operative Kollektiv bei chronisch lumbalen Rückenschmerzen.

5. Zusammenfassung

Rückenschmerzen stellen ein häufiges und relevantes Problem in der heutigen Gesellschaft dar. Durch medizinische Weiterentwicklungen konnte in den letzten Jahrzehnten ein deutlicher Anstieg der Wirbelsäulenoperationen beobachtet werden. Als Indikator des postoperativen Ergebnisses wird meist das Schmerzniveau betrachtet. Ebenso wichtig zur postoperativen Erfolgsbeurteilung ist jedoch die Funktion. Ziel der hier präsentierten Studie war es herauszufinden, inwieweit sich eine eingetretene oder ausbleibende subjektive Besserung der Rückenschmerzen bei Patienten nach einer Wirbelsäulenoperation in den Funktionsparametern Haltung und Gang objektivieren lässt.

Bei Patienten mit Wirbelsäulenoperation bei chronischem Rückenschmerz wurden die Körperhaltung mittels rasterstereographischer Vermessung des Wirbelsäulenprofils erfasst und das Gangbild mittels einer Laufbandanalyse untersucht. Als Vergleichsgruppe dienten die Messungen von 30 Personen ohne Rückenbeschwerden. Die Messungen in einer prospektiven longitudinalen Kohorte (n=43) erfolgten präoperativ, postoperativ vor Entlassung aus dem Krankenhaus und zum Zeitpunkt der 3-Monatskontrolle. Eine Querschnittserhebung erfolgte bei 36 Patienten 1 Jahr nach erfolgter Wirbelsäulenoperation. Die aktuellen Schmerzeindrücke wurden mithilfe der NRS zu jedem Messzeitpunkt bestimmt.

Präoperativ bestanden deutliche Unterschiede zwischen Studien- und Kontrollkollektiv in Haltung und Gangbild. Postoperativ zeigte sich eine signifikante Reduktion des Kyphose- und Lordosewinkels. Bei der Laufbandanalyse zeigte sich durch eine signifikante Abnahme der Kadenz und der Doppelschrittlänge eine Entspannung des Gangbilds. Die Werte des Vergleichskollektivs wurden jedoch zu keinem Zeitpunkt erreicht. Trotz einer erheblichen Reduktion der Rückenschmerzen und auch einer leichten Verbesserung von Gang- und Haltungsparemtern nach erfolgter chirurgischer Intervention konnte jedoch zwischen diesen beiden Betrachtungen kein Zusammenhang hergestellt werden.

6. Literaturverzeichnis

1. Niethard FU, Pfeil J, Biberthaler P. Orthopädie und Unfallchirurgie. In: Bob A, Bob K, eds. 7. ed: Thieme; 2014:389-431.
2. Thiese MS, Hegmann KT, Wood EM, Garg A, Moore JS, Kapellusch J. Prevalence of low back pain by anatomic location and intensity in an occupational population. BMC Musculoskeletal Disorders 2014.
3. Raspe H. Rückenschmerz. Berlin: RKI; 2012.
4. Henn L, Schier K, Brian T, Hardt J. Back pain in Poland and Germany: a survey of prevalence and association with demographic characters. BioMed research international 2014;2014:901341.
5. Hoy D, March L, Brooks Pea. The global burden of low back pain: estimates from the global burden of disease 2010 study. Annals of the rheumatic diseases 2014;73:968-74.
6. o.A. Nationale VersorgungsLeitlinie Kreuzschmerz. 2013.
7. Rozenberg S. Chronic low back pain: definition and treatment. La Revue du praticien 2008;58:265-72.
8. Klauber JG, C; Gerste, B; Robra, BP; Schmacke, N. Versorgungs-Report 2013/2014. Schwerpunkt: Depression. Stuttgart: Schattauer; 2014.
9. Chenot JG, B; Kladny, B; Petzke, F; Pfingsten, M; Schorr, SG. Clinical practice guideline: Non-specific low back pain. Deutsches Arzteblatt international 2017;114:883-90.
10. T.Vos ADF, M.Naghavi et al. Years lived with disability (YLDs) for 1160 sequelae of 289 diseases and injuries 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. The Lancet 2012;380:2163-96.
11. (DRV-Bund) DRB. Reha-Bericht Update 2016. Die medizinische und berufliche Rehabilitation der Rentenversicherung im Licht der Statistik. Berlin: DRV-Bund; 2016.
12. Marschall JH, S; Sydow, H; Nolting, HD. Gesundheitsreport 2016. Analyse der Arbeitsunfähigkeitsdaten. Schwerpunkt: Gender und Gesundheit. Heidelberg 2016.
13. Rentenversicherung D. Rentenversicherung in Zahlen. 2013.
14. Bundesärztekammer (BÄK) KBK, Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). Nationale VersorgungsLeitlinie Nicht-spezifischer Kreuzschmerz - Langfassung. 2 ed 2017.
15. Weinstein JN, Lurie JD, Olson PR, Bronner KK, Fisher ES. United States' trends and regional variations in lumbar spine surgery: 1992-2003. Spine 2006;31:2707-14.
16. Rajae SB, HW; Kanim, LE; Delamarter RB. Spinal Fusion in the United States: Analysis of Trends From 1998 to 2008. Spine 2012;37:67-76.
17. Nguyen TR, DC; Talmage, J; Succop, P; Travis, R. Long-term outcomes of lumbar fusion among workers' compensation subjects: a historical cohort study. Spine 2011;36:320-31.
18. Drerup B, Ellger B, Meyer zu Bentrup F, Hierholzer E. Rasterstereographische Funktionsaufnahmen. Der Orthopade 2001;30:242-50.

19. GmbH zM. Das zebris FDM-System - Ganganalyse für die Praxis. 2012:8.
20. Gray H. Gray's Anatomy. Philadelphia, Pennsylvania: Running Press Book Publishers; 1974.
21. L DR, Vogl AW, Mitchell AWM, Tibbitts RM, Richardson PE. Gray's Atlas of Anatomy. Philadelphia: Churchill Livingstone Elsevier; 2008.
22. Perry J. Ganganalyse. Norm und Pathologie des Gehens. München: Urban & Fischer; 2003:1-21.
23. Department P, Department PT. Observational Gait Analysis Handbook. Downey, CA: The Professional Staff Association of Rancho Los Amigos Medical Center; 1989.
24. Götz-Neumann K. Gehen verstehen. Stuttgart: Thieme; 2006.
25. Otis J, Burstein A. Evaluation of the VA-Rancho gait analyzer, Mark I. Bull Prosthet Res 1981;18:21-5.
26. GmbH zM. Benutzerhandbuch Laufband Zebris WinFDM-T: zebris Medical GmbH; 2010.
27. Perry J. Gait analysis: Slack; 1992.
28. Blanc Y, Balmer C, Landis T, Vingerhoets F. Temporal parameters and patterns of the foot roll over during walking: normative data for healthy adults. Gait and Posture 1997;10:97-108.
29. Kirtley C. The temporal-spatial parameters. Clinical Gait Analysis: Elsevier; 2006:15-37.
30. Murray MP, Kory RC, Clarkson BH, Sepic SB. Comparison of free and fast speed walking patterns of normal men. American Journal of Physical Medicine 1966;45:8–24.
31. Murray MP, Kory RC, Clarkson BH. Walking pattern in healthy old men. Journal of Gerontology 1969;24:169–78.
32. Murray MP, Kory RC, Sepic SB. Walking patterns of normal women. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 1970;51:637–50.
33. Oberg T, Karsznia A, Oberg K. Basic gait parameters: reference data for normal subjects 10–79 years of age. Journal of Rehabilitation Research and Development 1993;30:210–33.
34. Waters RL, Lumsford BR, Perry J, Byrd R. Energy–speed relationship of walking: standard tables. Journal of Orthopedic Research 1988;5:215–22.
35. Hausdorff JM, Zeman L, Peng C-K, Goldberger A. Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children. Journal of Applied Physiology 1999;86:1040–7.
36. Finley FR, Cody KA. Locomotive characteristics of urban pedestrians. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 1970;51:423–6.
37. Grieve D, Gear R. The relationships between length of stride, step frequency, time of swing, and speed of walking for children and adults. Ergonomics 1966;5 (9):379.
38. Alton F, Baldey, Caplan S, Morrissey MC. A kinematic comparison of overground and treadmill walking. Clinical Biomechanics 1998;13:434–40.
39. White S, Yack HJ, Tucker CA, Lin HY. Comparison of vertical ground reaction forces during overground and treadmill walking. Medicine and Science in Sports and Exercise 1998;30(10):1537–42.

40. Kram R, Powell A. A treadmill-mounted force platform. *Journal of Applied Physiology* 1989;67:1692–8.
41. Stolze H, Kuhtz-Buschbeck JP, Mondwurf C, al e. Gait analysis during treadmill and overground locomotion in children and adults. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 1997;105(6):490–7.
42. o.A. physiolexikon Physiotherapie von A-Z. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2010.
43. König E. Was halten Sie von Haltung König 1999. *Monatsschr Kinderheilkd* 1999;147:369-72.
44. Rizzi M. Die menschliche Haltung, Klinische und biomechanische Betrachtungen. *Z für Präventivmedizin* 1973;17:341-8.
45. Matthiass HH. Reifung, Wachstum und Wachstumsstörungen des Haltungs- und Bewegungsapparates im Jugendalter.: S. Karger Verlag Basel 1966.
46. Leger W. Die Form der Wirbelsäule mit Untersuchungen über ihre Beziehungen zum Becken und die Statik der aufrechten Haltung. 1959.
47. Dahmen G. Belastbarkeit von Jugendlichen mit Wirbelsäulenveränderungen,; Hrsg. Junghanns, H.. Hippokrates Verlag Stuttgart,; 1980.
48. Betsch M. Entwicklung einer Messmethode zur berührungslosen Erfassung von Haltungsparemtern der Wirbelsäule unter dynamischen Bedingungen 2008.
49. Manke M. Stellenwert der lichtoptischen 3 D Körperstatikvermessung mit dem opTRImetric-Verfahren bei der Effektivitätsbewertung einer stationären multimodalen orthopädischen Schmerztherapie im Vergleich zu klinischen Untersuchungstests und Schmerzfragebögen 2012.
50. Ferraris LK, H; Meier, O; Hempfing, A. Die Bedeutung der sagittalen Balance in der Wirbelsäulenchirurgie. *Deutscher Ärzte-Verlag* 2012;1:502-8.
51. Wiedenhöfer BA, M. Bedeutung der sagittalen Balance der Wirbelsäule. *Der Orthopade* 2011;40:660.
52. Schaller A, Froboese I. Movement coaching: study protocol of a randomized controlled trial evaluating effects on physical activity and participation in low back pain patients. *BMC Musculoskeletal Disorders* 2014.
53. Michalski D, Hinz A. Schmerzchronifizierung bei ambulanten Rückenschmerzpatienten. *Schmerz* 2006;20:198-209.
54. Kayser R, Mahlfeld K, Heyde CE. [Concepts of in-patient gradual diagnostics for patients with lumbar back-pain]. *Der Orthopade* 2008;37:285-99.
55. Croft P, Macfarlane G, Papageorgiou A, Thomas E, Silman J. Outcome of low back pain in general practice: a prospective study. *BMJ* 1998;316:1356-9.
56. Biering-Sorensen F. A one-year prospective study of low back trouble in a general population. The prognostic value of low back history and physical measurements. *Danish medical bulletin* 1984;31:362-75.
57. Schmidt CO RH, Pflingsten M, Hasenbring M, Basler HD, Eich W, Kohlmann T. Back pain in the German adult population: prevalence, severity, and sociodemographic correlates in a multiregional survey. *Spine* 2007;32:2005-11.

58. Kalichman L, Cole R, Kim DH, et al. Spinal stenosis prevalence and association with symptoms: the Framingham Study. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 2009;9:545-50.
59. Kalff R, Ewald C, Waschke A, Gobisch L, Hopf C. Degenerative lumbar spinal stenosis in older people: current treatment options. *Deutsches Arzteblatt international* 2013;110:613-23; quiz 24.
60. Wassenaar M, van Rijn RM, van Tulder MW, et al. Magnetic resonance imaging for diagnosing lumbar spinal pathology in adult patients with low back pain or sciatica: a diagnostic systematic review. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 2012;21:220-7.
61. Boden SD, Davis DO, Dina TS, Patronas NJ, Wiesel SW. Abnormal magnetic-resonance scans of the lumbar spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation. *The Journal of bone and joint surgery American volume* 1990;72:403-8.
62. Jensen MC, Brant-Zawadzki MN, Obuchowksy N, Modic MT, Malkasian D, Ross JS. Magnetic resonance imaging of the lumbar spine in people without back pain. *The New England Journal of Medicine* 1994;331:69-73.
63. Teraguchi M, Yoshimura N, Hashizume H, et al. Prevalence and distribution of intervertebral disc degeneration over the entire spine in a population-based cohort: the Wakayama Spine Study. *Osteoarthritis and cartilage / OARS, Osteoarthritis Research Society* 2014;22:104-10.
64. Glocker FX. Lumbale Radikulopathie. In: *Neurologie DGf, ed. Leitlinien für Diagnostik und Therapie in der Neurologie* 2012.
65. Niethard F Uea. *Duale Reihe: Orthopädie und Unfallchirurgie 7ed*: Thieme; 2014.
66. Otani K, Kikuchi S, Yabuki S, et al. Lumbar spinal stenosis has a negative impact on quality of life compared with other comorbidities: an epidemiological cross-sectional study of 1862 community-dwelling individuals. *TheScientificWorldJournal* 2013;2013:590652.
67. Miyakoshi N, Hongo M, Kasukawa Y, Ishikawa Y, Shimada Y. Prevalence, Spinal Alignment, and Mobility of Lumbar Spinal Stenosis with or without Chronic Low Back Pain: A Community-Dwelling Study. *Pain research and treatment* 2011;2011:340629.
68. Thome C, Borm W, Meyer F. Degenerative lumbar spinal stenosis: current strategies in diagnosis and treatment. *Deutsches Arzteblatt international* 2008;105:373-9.
69. Cummins J, Lurie JD, Tosteson TD, et al. Descriptive epidemiology and prior healthcare utilization of patients in the Spine Patient Outcomes Research Trial's (SPORT) three observational cohorts: disc herniation, spinal stenosis, and degenerative spondylolisthesis. *Spine* 2006;31:806-14.
70. Postacchini F, Postacchini R. Operative management of lumbar disc herniation : the evolution of knowledge and surgical techniques in the last century. *Acta neurochirurgica Supplement* 2011;108:17-21.
71. Pouriesa M, Fouladi RF, Mesbahi S. Disproportion of end plates and the lumbar intervertebral disc herniation. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 2013;13:402-7.

72. Ma D, Liang Y, Wang D, et al. Trend of the incidence of lumbar disc herniation: decreasing with aging in the elderly. *Clinical interventions in aging* 2013;8:1047-50.
73. Guterl, al. e. Challenges and strategies in the repair of ruptured annulus fibrosus. In: *Access NloHP*, ed. *Eur Cell Mater*2013:1-21.
74. al. Pe. Lumbar Disc Herniation in Patients Up to 25 Years of Age. *Neurolog Med Chir* 2001;41:340-4.
75. Takahashi K, Aoki Y, Ohtori S. Resolving discogenic pain. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 2008;17 Suppl 4:428-31.
76. Council MR. Aids to the Examination of the Peripheral Nervous System. Memorandum No. 45. London, England1976.
77. Rahmathulla G, Kamian K. Lumbar disc herniations 'to operate or not' patient selection and timing of surgery. *Korean Journal of Spine* 2014;11:255-7.
78. o.A. Global recommendations on physical activity for health. In: *Organization WH*, ed.2010.
79. Hurwitz EL, Morgenstern H, Chiao C. Effects of recreational physical activity and back exercises on low back pain and psychological distress: findings from the UCLA Low Back Pain Study. *American journal of public health* 2005;95:1817-24.
80. Bohman T, Alfredsson L, Jensen I, Hallqvist J, Vingard E, Skillgate E. Does a healthy lifestyle behaviour influence the prognosis of low back pain among men and women in a general population? A population-based cohort study. *BMJ open* 2014;4:e005713.
81. Petit A. Chronic low back pain, chronic disability at work, chronic management issues. *Scandinavian journal of work, environment & health* 2015.
82. Ewerbeck Ve. *Standardverfahren in der operativen Orthopädie und Unfallchirurgie Thieme*; 2014.
83. von Torklus D. *Atlas operativer Zugangswege*. München: Elsevier Urban und Fischer; 2013.
84. Baaj AA, Mummaneni PV, Uribe JS, Vaccaro AR, Greenberg MS. *Handbook of Spine Surgery*. New York. Stuttgart: Thieme; 2012.
85. Deyo RA, Mirza SK, Martin BI, Kreuter W, Goodman DC, Jarvik JG. Trends, major medical complications, and charges associated with surgery for lumbar spinal stenosis in older adults. *Jama* 2010;303:1259-65.
86. o.A. *Gesundheit Diagnosedaten der Patienten und Patientinnen in Krankenhäusern*. In: *Bundesamt S*, ed. Wiesbaden2011.
87. Jakola AS, Sorlie A, Gulati S, Nygaard OP, Lydersen S, Solberg T. Clinical outcomes and safety assessment in elderly patients undergoing decompressive laminectomy for lumbar spinal stenosis: a prospective study. *BMC surgery* 2010;10:34.
88. Deyo RA, Weinstein JN. Low back pain. *N Engl J Med* 2001;344:363-70.
89. Weinstein JN, Lurie JD, Tosteson TD, et al. Surgical vs nonoperative treatment for lumbar disk herniation: the Spine Patient Outcomes Research Trial (SPORT) observational cohort. *Jama* 2006;296:2451-9.
90. GmbH DE, inventor Ergo Run Premium 8.
91. GmbH zM. *Laufband FDM-TD technische Kenndaten*. 2013.


92. GmbH zM. FDM-T Technical Data and Operating Instructions.14-20.
93. GmbH zM. Das zebris FDM-T System zur Stand- und Ganganalyse. In: GmbH zM, ed. ©zebris2012.
94. Kraftverteilungsmesssystem zur Bestimmung der Bodenreaktionskräfte. zebris Medical GmbH. at [http://www.zebris.de/deutsch/medizin/medizin-kraftverteilungsmessung.php?navanchor=10015.](http://www.zebris.de/deutsch/medizin/medizin-kraftverteilungsmessung.php?navanchor=10015))
95. Kapazitiver Sensor (Accessed 17.02.2015, at [http://de.wikipedia.org/wiki/Kapazitiver_Sensor.](http://de.wikipedia.org/wiki/Kapazitiver_Sensor))
96. Canon, inventor Bedienungsanleitung MD 2162008.
97. DIERS formetric 4D Funktionelle Wirbelsäulen- & Haltungsanalyse. 2012. at [http://www.diers.de/ProductPage.aspx?p=2.](http://www.diers.de/ProductPage.aspx?p=2))
98. Drerup H. Back shape measurement using video rasterstereography an three-dimensional reconstruction of spinal shape. Clin Biomech 1994;9:28-36.
99. Harzmann HC. Methode und klin Einsatzmögl der 3D Rückenoberflächenvermessung mit der Videorasterstereographie (VRS). 2001:81-104.
100. solutions Db. Optische Wirbelsäulenvermessung Information zur Auswertung DIERS formetric III 4D. 2010.
101. Drerup BH, E. Automatic Localization of Anatomical Landmarks on the back surface construction of a body-fixed coordinate system. J Biomechanics 1987;20:961-70.
102. Drerup B. Measurement of position and orientaton of vertebrae and assessment of clinical shape parameters. J Biomechanics 1992;25:1357-62.
103. Ferraz MB QM, Aquino LR, Atra E, Tugwell P, Goldsmith, Chan D. Reliability of pain scales in the assessment of literate and illiterate patients with rheumatoid arthritis. Rheumatol 1990;17:1022-4.
104. Khodadadeh S, Eisenstein SM. Gait Analysis of Patients with Low Back Pain Before and After Surgery. Spine 1993;18:1451-5.
105. Barzilay Y, Segal G, Lotan R, et al. Patients with chronic non-specific low back pain who reported reduction in pain and improvement in function also demonstrated an improvement in gait pattern2015.
106. Palm HG, Uhl S, Zollo M, Lang P, Friemert B, Riesner HJ. Einfluss der periduralen Infiltrationstherapie auf die posturale Kontrolle bei chronischem Schmerz der unteren Lendenwirbelsäule – eine prospektive klinische Untersuchung. Z Orthop Unfall 2016;154:583-90.
107. Ruhe A, Fejer R, Walker B. Pain relief is associated with decreasing postural sway in patients with non-specific low back pain. BMC Musculoskelet Disord 2012;13:39.
108. Radebold A, Cholewicki J, Polzhofer GK, Greene HS. Impaired postural control of the lumbar spine is associated with delayed muscle response times in patients with chronic idiopathic low back pain. Spine 2001;26:724-30.
109. Hodges PW. Changes in motor planning of feedforward postural responses of the trunk muscles in low back pain. Exp Brain Res 2001;141:261-6.
110. Kramers-de Quervain I, Stüssi E, Stacoff A. 35 Ganganalyse beim Gehen und Laufen2018.

111. Kalron AA, A. The relationship between fear of falling to spatiotemporal gait parameters measured by an instrumented treadmill in people with multiple sclerosis. *Gait and Posture* 2014;39:739-44.
112. Wearing SCR, L.F.; Urry, S. R. Agreement between temporal and spatial gait parameters from an instrumented walkway and treadmill system at matched walking speed. *Gait and Posture* 2013;38:30-384.
113. Faude O, Donath L, Roth R, Fricker L, Zahner L. Reliability of gait parameters during treadmill walking in community-dwelling healthy seniors. *Gait & posture* 2012;36:444-8.
114. Dal U, Erdogan T, Resitoglu B, Beydagi H. Determination of preferred walking speed on treadmill may lead to high oxygen cost on treadmill walking. *Gait and Posture* 2010;31:366-9.
115. Marsch A, Katula J, Pacchia C, LC: J, KL. K, WJ. R. Effect of treadmill and overground walking on function and attitudes in older adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2006;38:1157-64.
116. Stief F, Meurer A, Wienand J, Rauschmann M, Rickert M. Has a Mono- or Bisegmental Lumbar Spinal Fusion Surgery an Influence on Self-Assessed Quality of Life, Trunk Range of Motion, and Gait Performance?2015.
117. Barzilay Y, Segal, G., Lotan, R. et al. . Patients with chronic non-specific low back pain who reported reduction in pain and improvement in function also demonstrated an improvement in gait pattern. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 2016;25:2761-6.
118. Melvin M, Sylvia M, Udo W, Helmut S, Paletta JR, Adrian S. Reproducibility of Rasterstereography for Kyphotic and Lordotic Angles, Trunk Length, and Trunk Inclination: A Reliability Study. *Spine* 2010;35:1353-8.
119. Drerup B. Rasterstereographic measurement of scoliotic deformity. *Scoliosis* 2014;9:22.
120. Mohokum MM, S.; Wolf, U.; Sitter, H.; Paletta, J.; Skwara, A. Reproducibility of Rasterstereography for Kyphotic and Lordotic Angles, Trunk Length, and Trunk Inclination. *Spine* 2010;35:1353-8.
121. Schröder J, Stiller T, Mattes K. Referenzdaten in der Wirbelsäulenformanalyse. *Manuelle Medizin* 2011;49:161-6.
122. Schröder J, Strübing K, Mattes K. Rückenbeschwerden und Wirbelsäulenform2010.
123. Schroeder J, Reer, R. & Braumann, K.M. Video raster stereography back shape reconstruction: a reliability study for sagittal, frontal, and transversal plane parameters. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 2015;24:262-9.
124. Takeda N, Kobayashi T, Atsuta Y, Matsuno T, Shirado O, Minami A. Changes in the sagittal spinal alignment of the elderly without vertebral fractures: a minimum 10-year longitudinal study. *Journal of Orthopaedic Science* 2009;14:748-53.
125. Schröder JS, T.; Mattes, K. Wirbelsäulenformkennziffern als Indikatoren für Beschwerden des unteren Rückens. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 2010;61:91-6.

126. Barrey CD, A. Current strategies for the restoration of adequate lordosis during lumbar fusion. *World J Orthop* 2015;6:117-26.
127. Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G, et al. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine* 1982;7.
128. Coeuret-Pellicer M, Descatha A, Leclerc A, Zins M. Are tall people at higher risk of low back pain surgery? A discussion on the results of a multipurpose cohort. *Arthritis care & research* 2010;62:125-7.
129. Hershkovich O, Friedlander A, Gordon B, et al. Associations of Body Mass Index and Body Height With Low Back Pain in 829,791 Adolescents. *American Journal of Epidemiology* 2013;178:603-9.
130. Hebenstreit FL, A.; Krinner, S.; Welsch, G.; Lochmann, M.; Eskofier, B. M. Effect of walking speed on gait sub phase durations. *Human Movement Science* 2015;43:118-24.
131. Popa T, Bonifazi, M., Della Volpe, R. et al. Adaptive changes in postural strategy selection in chronic low back pain. *Exp Brain Res* 2007;177.
132. Degenhardt BS, Z.; Bhatia, S.; Franklin, G.A. Appraisal of the DIERS method for calculating postural measurements: an observational study. *Scoliosis and Spinal Disorders* 2017;12:28.
133. Asamoah V MH, Venus J, Klöckner C. Measuring the surface of the back. Value in diagnosis of spinal diseases. *Der Orthopade* 2000;29:480-9.
134. Asamoah V, Mellerowicz H, Venus J, Klöckner C. Oberflächenvermessung des Rückens. *Der Orthopade* 2000;29:480-9.

7. Anhang

7.1 Informationsblatt und Einverständniserklärung für Patienten

 <p>Eberhard-Karls-Universität UKT Universitätsklinikum Tübingen</p> <p>Orthopädische Klinik · Hoppe-Seyler-Straße 3 · 72076 Tübingen</p>	<p><i>Universitätsklinikum Tübingen</i></p> <p>Orthopädische KlinikÄrztlicher Direktor Prof. Dr. med. N. Wülker</p> <p>Sekretariat: 07071/29-86685 Service-Telefon: 07071/29-86033 Vermittlung: 07071/29-86611 Telefax: 07071/29 - 4091</p>
---	--

Prüfärzte: OÄ Dr. C. Leichtle, OA Dr. M. Gesicki, U.K. Hofmann

Dr. C.I. Leichtle
Orthopädische Universitätsklinik Tübingen
Hoppe-Seyler-Strasse 3
72076 Tübingen
Mail: Carmen.Lleichtle@med.uni-tuebingen.de
Funk : 151 / 8220
Tel : 07071 / 29 86692

Dr. med. Marco Gesicki
Orthopädische Universitätsklinik Tübingen
Hoppe-Seyler-Strasse 3
72076 Tübingen
Mail: Marco.Gesicki@med.uni-tuebingen.de
Funk : 151 / 8234

Ulf Krister Hofmann
Orthopädische Universitätsklinik Tübingen
Hoppe-Seyler-Strasse 3
72076 Tübingen
Mail: Ulf.Hofmann@med.uni-tuebingen.de

Informationsblatt und Einverständniserklärung

Sehr geehrte Patientin, sehr geehrter Patient,

bei Ihnen ist eine Operation an der Wirbelsäule vorgesehen. Im Rahmen dieser stationären Behandlung soll nun der therapeutische Effekt der operativen Behandlung im Verlauf erfasst werden. Während Ihres medizinisch notwendigen stationären Aufenthaltes im Rahmen Ihres operativen Eingriffes und der damit verbundenen Behandlung, sollen im Rahmen der Studie:

„Ganganalyse, Rasterstereographie und Bremsversuche im Autosimulator bei Patienten vor und nach Durchführung einer Wirbelsäulenoperation, klinische prospektive Studie“

Daten gesammelt und aufgezeichnet werden, die Ihre Erkrankung sowie den Verlauf nach Durchführung der Operation Ihrer Wirbelsäule betreffen. Anhand dieser Daten, die über einen Zeitraum von etwa eineinhalb Jahren an etwa 70 Wirbelsäulenpatienten gesammelt werden, soll überprüft werden, ob die von Ihnen empfundene subjektive Besserung durch die Operation auch mit einer Änderung und Verbesserung des Gangbildes und der Körperhaltung einhergeht. Es soll zudem untersucht werden, ab welchem Zeitpunkt ein sicheres Führen eines Kraftfahrzeuges von Seiten der Wirbelsäule möglich ist.

Die Art der Operation welche gewählt wird, richtet sich vornehmlich nach den bei Ihnen führenden Beschwerden sowie meist auffälligen Befunden in bildgebenden Untersuchungen. In Zusammenschau kann so sichergestellt werden, dass im langfristigen postoperativen Verlauf eine wesentliche Ursache der bei Ihnen vorliegenden Beschwerden behandelt werden konnte. In der überwiegenden Anzahl der Fälle berichten die Patienten daher über eine deutliche Schmerzreduktion sowie über eine Zunahme der Belastbarkeit bei Alltagsaktivitäten. Diese Einschätzung erfolgt derzeit vor allem aufgrund des subjektiven/eigenen Empfindens zum Zeitpunkt der Befragung. Ein Messinstrument zur objektiven Erfassung des Behandlungserfolges ist derzeit in der medizinischen Literatur noch nicht beschrieben und steht zur Beurteilung der Behandlungsergebnisse nicht zur Verfügung.

Im Rahmen dieser prospektiven Studie soll nun, zusätzlich zu dem standardisierten Vorgehen mit Erfassung der subjektiven Bewertung durch den Patienten, die Erhebung objektiverer Daten durch Ganganalysen und eine lichtoptische Vermessung der Wirbelsäule (Rasterstereographie) erfolgen.

Zu diesem Zweck ist vorgesehen, vor dem operativen Eingriff sowohl eine solche Ganganalyse sowie eine Rasterstereographie (lichtoptische Vermessung) bei Ihnen durchzuführen. Zusätzlich werden, sofern Sie im Alltag noch prinzipiell ein Kraftfahrzeug führen, in einem Autosimulator Bremsversuche mit einer speziell dafür entwickelten Messanlage durchgeführt werden.

Nach erfolgter Operation werden dann vor Ihrer Entlassung aus unserer Klinik die Ganganalyse auf dem Laufband und die lichtoptische Wirbelsäulenvermessung wiederholt werden. Eine weitere Untersuchung einschließlich Bremsversuchen wird bei Ihrer Wiedervorstellung zur Kontrolluntersuchung in unserer Hochschulambulanz durchgeführt werden.

Die Ganganalyse, Rasterstereographie und die Bremsversuche werden in der Orthopädischen Ambulanz der Universitätsklinik Tübingen erfolgen.

Ziel dieser Ganganalysen und der Rasterstereographie soll die Unterscheidung zwischen subjektiver Besserung Ihrer Beschwerden und tatsächlich erreichter und objektivierbar verbesserter Mobilität, Haltung und Belastbarkeit sein.

Bei der Ganganalyse laufen Sie für den Zeitraum von etwa einer Minute unter ständiger Beaufsichtigung auf einem Laufband bei entspannter Schrittgeschwindigkeit. Dabei werden insbesondere Schrittlänge, Schrittgeschwindigkeit, Stand- und Schwungphasen, das Belastungsprofil der Beine und der Füße sowie die Harmonie des Gangbildes mittels Druck- und Geschwindigkeitssonden im Laufbandboden erfasst. Gleichzeitig findet eine daran gekoppelte Videoaufzeichnung der Beine mit ihrem Gangbild statt.

Die Rasterstereographie (lichtoptische Vermessung) des Rückens erfolgt ohne Strahlenbelastung im Stand am freigemachten Oberkörper. Lichtstrahlen tasten dabei von hinten Ihr Wirbelsäulenprofil ab, welches dann mit einem Rechenprogramm dreidimensional ausgewertet wird. Dabei kann eine Analyse der Körperhaltung, des Schulter- und Beckenstandes, der Verdrehung der Wirbelsäule und ihrer Seitabweichung sowie des Rückenprofils erfolgen.

Falls Sie persönlich Interesse an den Untersuchungsergebnissen haben, können wir Ihnen diese gerne erläutern und eine Kopie davon mitgeben.

In Zusammenschau der Ergebnisse aller untersuchten Patienten wird vergleichend zudem eine Beurteilung möglich sein weiter zu unterscheiden, welche Art der operativen Versorgung am ehesten zu einer Wiederherstellung eines physiologischen (natürlichen) Gang- und Haltungsbildes führen kann. Des Weiteren kann verglichen werden, ob das Erreichen physiologischer Bewegungsabläufe überhaupt für die persönliche Patientenzufriedenheit nach einer solchen Operation von entscheidender Bedeutung ist.

In den Bremsversuchen in einem speziell für diese Art von Untersuchung entwickelten Autosimulator wird zudem erfasst werden können, in wie weit nach drei Monaten bzw. einem Jahr Ihre Kraftentfaltung und Reaktionsgeschwindigkeit beim Führen eines Kraftfahrzeuges wiederhergestellt oder gar verbessert ist.

Die Entscheidung über die für Sie geeignete Behandlung wird unabhängig davon getroffen, ob Sie an dieser Studie teilnehmen werden oder nicht. Für Sie ergibt sich aus der Studienteilnahme kein Nach- oder Vorteil. Allerdings ist zu erwähnen, dass während der Laufbandanalyse und der Rasterstereographie prinzipiell das Risiko besteht zu stürzen und sich dadurch zu verletzen. Bei den Bremsversuchen könnten Sie vom Bremspedal abrutschen und sich dadurch am Fuß verletzen. Es wurde für alle drei Untersuchungsverfahren eine gesonderte Versicherung für Sie abgeschlossen, welche das Risiko eines Unfallschadens abdeckt.

Die Zustimmung zur Studienteilnahme ist vollkommen freiwillig. Sie können die Teilnahme jederzeit, auch nachdem Sie bereits zugestimmt haben, ohne Begründung oder Nachteile für die weitere Behandlung ablehnen.

EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG Frau / Herr: _____
(Bitte Namen in Druckschrift eintragen)

Hiermit erkläre ich mein Einverständnis zur Teilnahme an der Studie:

**„Ganganalyse, Rasterstereographie und Bremsversuche im Autosimulator bei
Patienten vor und nach Durchführung einer Wirbelsäulenoperation,
klinische prospektive Studie“**

in der auf dem Informationsblatt beschriebenen Form.

Ich kann mein Einverständnis jederzeit, formlos ohne Nachteile widerrufen. Alle Fragen zur Studie wurden zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Eine Kopie des Informationsblattes habe ich erhalten.

Datum

Unterschrift Patient / Patientin

Datum

Unterschrift Ärztin / Arzt

7.2 Screening Bogen

U-Zimmer



Ganganalyse, Rasterstereographie und Bremsversuche im Autosimulator bei Patienten vor und nach Durchführung einer Wirbelsäulenoperation, klinische prospektive Studie“

Klinik: Orthopädische Universitätsklinik Tübingen

Screeningbogen:

1. Patientennummer:

___/___

2. Screeningdatum:

___/___/___

Einschlusskriterien:

JA /

NEIN

- Fähigkeit zur sicheren eigenständigen Mobilisation
___/___
- Altersentsprechende kardiopulmonale Belastbarkeit
___/___
- Eigenständig einwilligungsfähig
___/___
- Kein Herzinfarkt in den letzten 6 Monaten
___/___
- Kein Apoplex in den letzten 6 Monaten
___/___
- Keine ärztlich dokumentierte körperliche Verletzung in Folge eines Sturzes aufgrund von Gangunsicherheit / ohne Fremdeinwirkung / ohne Unfall
___/___
- Kein Tumorleiden mit Manifestation an der WS oder intraspinal
___/___
- Keine Paraparese, Cauda-Symptomatik, systemischer Infekt
___/___

Ein Einschlusskriterium nicht zutreffend _____

oder

Patient lehnt Teilnahme an der Studie ab _____

Die unterschriebene Einverständniserklärung zur Studienteilnahme sowie das unterschriebene Einverständnis zur Datenerhebung liegen vor:

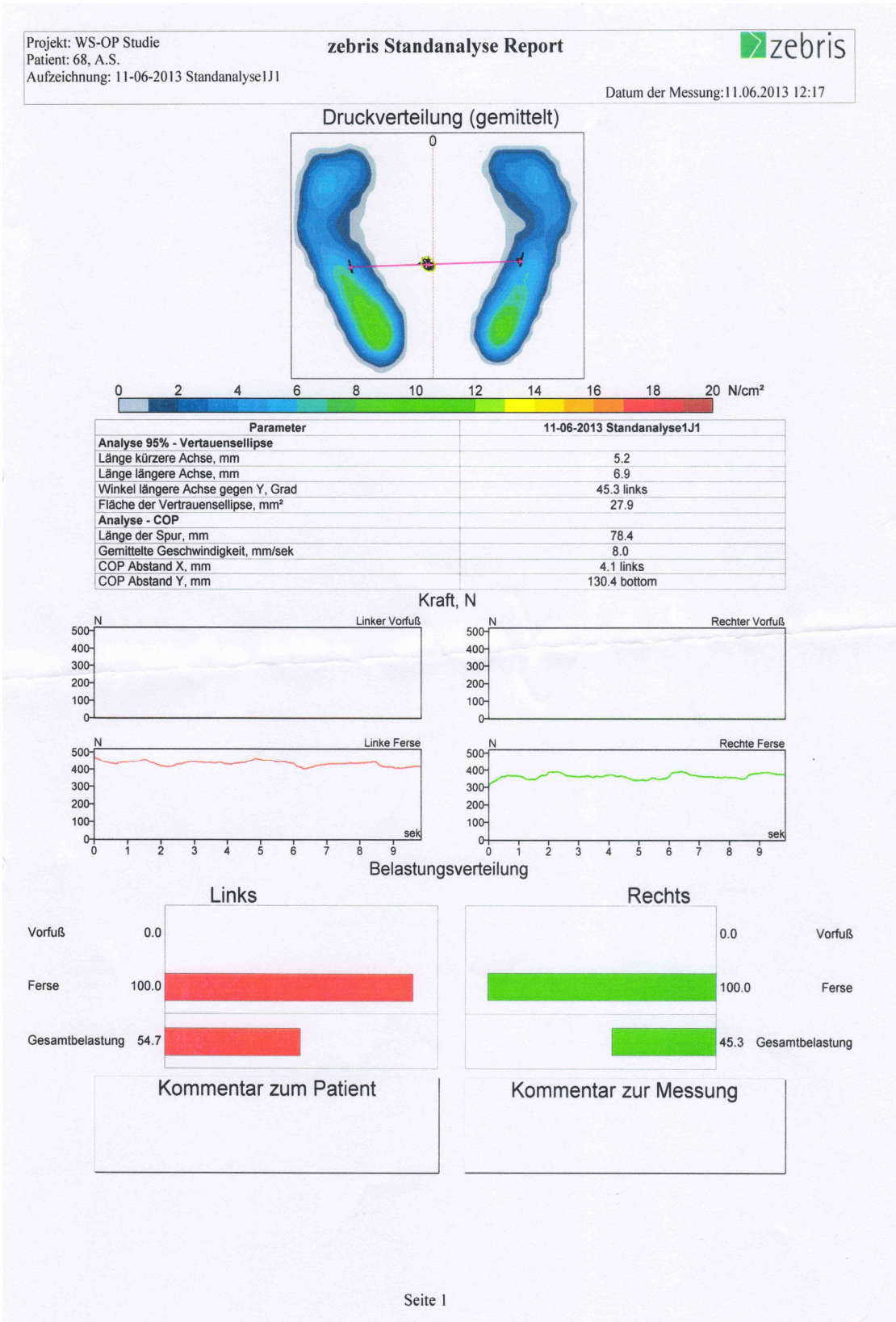
Der Screeningbogen, die unterschriebene Einverständniserklärung, sowie der unterschriebene Datenschutzbogen werden *im Studienhefter des Patienten* abgeheftet,

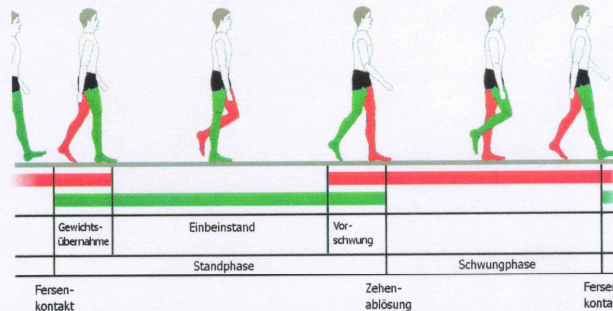
Prüfarzt: _____

Datum: ___/___/___

Unterschrift Arzt: _____

7.3 Zebris Report





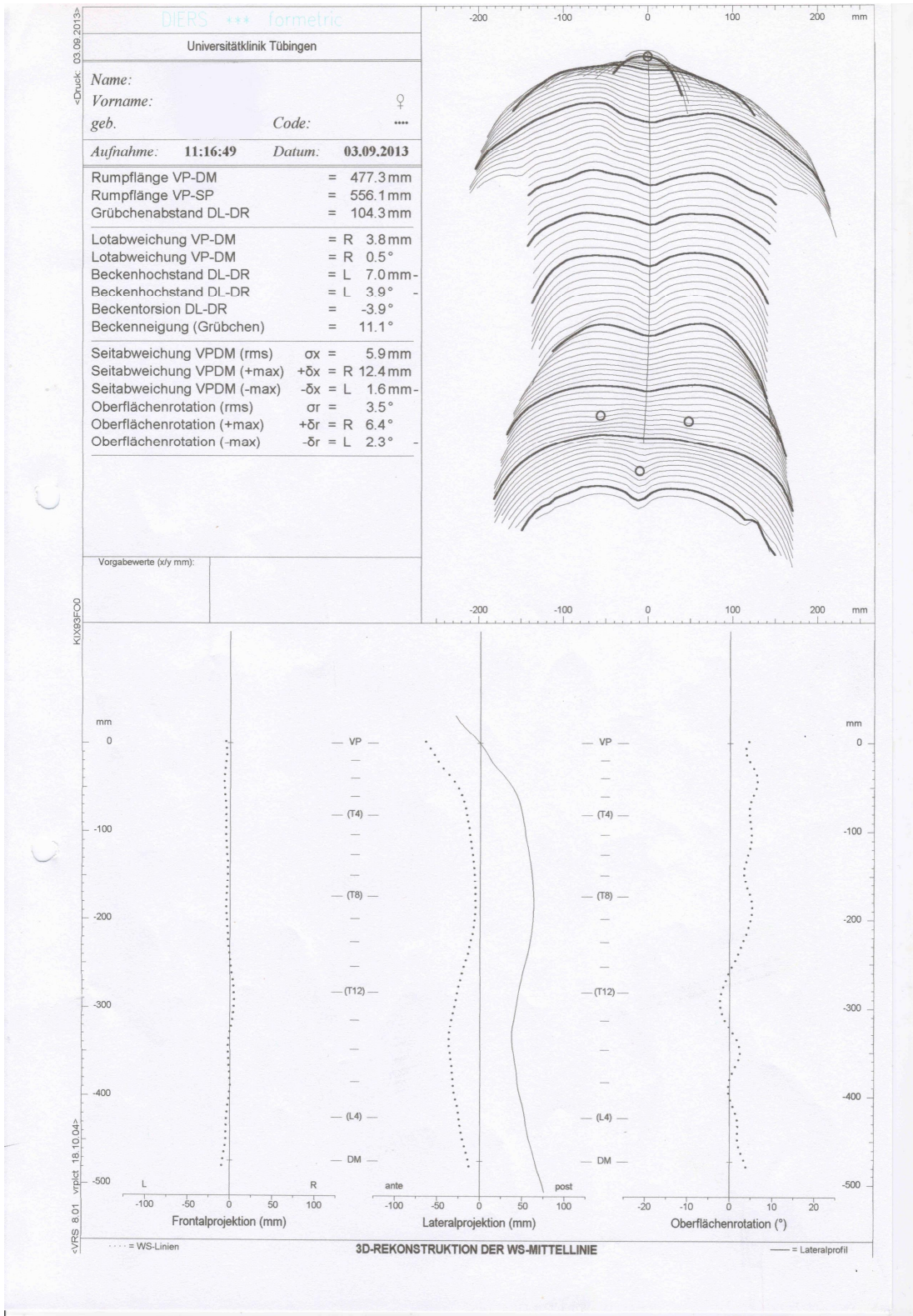
Fußrotation, grad	Links	9.6+/-3.3	
	Rechts	11.0+/-1.5	
Schrittweite, cm		12+/-1	
Schrittlänge (Step length), cm	Links	8+/-4	
	Rechts	8+/-3	
Schrittzeit (Step time), sek	Links	0.56+/-0.02	
	Rechts	0.52+/-0.02	
Standphase (Stance phase), %	Links	72.0+/-1.5	
	Rechts	74.0+/-1.8	
Stoßdämpfungsphase (Load response), %	Links	22.2+/-1.6	
	Rechts	23.7+/-1.6	
Mittlere Standphase (Single support), %	Links	26.1+/-1.9	
	Rechts	28.0+/-1.4	
Abstoßphase (Pre-swing), %	Links	23.7+/-1.7	
	Rechts	22.2+/-1.5	
Schwungphase (Swing phase), %	Links	28.0+/-1.5	
	Rechts	26.0+/-1.8	
Doppelstandphase (Double support), %		45.9+/-2.5	
Doppelschrittlänge (Stride length), cm		16+/-5	
Doppelschrittzeit (Stride time), sek		1.09+/-0.03	
Kadenz (Cadence), Schr/Min		110+/-3	
Geschwindigkeit (Velocity), km/h		0.5+/-0.2	

Normwerte: 2-5 km/h

Kommentar zum Patient

Kommentar zur Messung

7.4 RasterstereographieReport



7.5 Liste der Veröffentlichungen

Wissenschaftliche Publikationen:

Scheidt S., **Endreß S.**, Gesicki M., Hofmann U.K.: Using video rasterstereography and treadmill gait analysis as a tool for evaluating postoperative outcome after lumbar spinal fusion. Gait and Posture 2018;64:18-24.

Wissenschaftliche Podiumspräsentationen:

Hofmann U.K.*, **Loch S.**, Gesicki M., Scheidt S.: „Kann die nach lumbaler Instrumentierung erzielte Besserung mittels apparativer Untersuchung durch Video-Rasterstereographie oder eine Ganganalyse auf dem Laufband objektiviert werden?“ 66. Jahrestagung Vereinigung Süddeutscher Orthopäden und Unfallchirurgen, Baden-Baden 05/2018

Wissenschaftliche Poster:

Scheidt S., **Loch S.**, Gesicki M., Hofmann U. K.: „Kann die nach lumbaler Instrumentierung erzielte Besserung mittels technisch apparativer Untersuchung durch Video-Rasterstereographie oder eine Ganganalyse auf dem Laufband objektiviert werden?“ Kongreß Deutsche Wirbelsäulengesellschaft, Stuttgart, 11/2017

Scheidt S., **Loch S.**, Gesicki M., Hofmann U.K.: „Using Video Rasterstereography And Treadmill Gait Analysis As A Tool For Evaluating Postoperative Outcome After Lumbar Spinal Fusion.“ Kongreß European Federation of National Association of Orthopaedics and Traumatology Barcelona/Spanien 06/2018

8. Erklärungen zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Universitätsklinik für Orthopädie Tübingen durchgeführt. Priv.-Doz. Dr. med. U. K. Hofmann der Universitätsklinik für Orthopädie Tübingen hat die Studie konzipiert, durch ihn erfolgte ebenfalls die Betreuung der Arbeit.

Nach erfolgter Einarbeitung wurden die Versuche eigenständig von mir durchgeführt, ebenso wie die statistische Auswertung.

Ich versichere ausdrücklich, diese Arbeit selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 25.01.2019