

Gesundheitsspezifische Lebensqualität und EMG-Veränderungen nach lumbaler endoskopischer Facettengelenksthermokoagulation

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Hohen Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Luisa Jasmin Greiffenberg

aus Bergisch Gladbach

2024

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Robert Pflugmacher
2. Gutachter: PD Dr. Julian Alexander Luetkens

Tag der Mündlichen Prüfung: 17.01.2024

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
Direktor: Prof. Dr. med. Dieter C. Wirtz

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis.....	9
1.	Einleitung	11
1.1	Epidemiologie des Rückenschmerzes	11
1.2	Definition von Rückenschmerz.....	12
1.3	Entstehung von chronischen Rückenschmerzen	12
1.4	Muskuloskelettales System der Wirbelsäule	13
1.4.1	Aufbau der Wirbelsäule.....	13
1.4.1.1	Die knöcherne Lendenwirbelsäule	14
1.4.2	Gelenkige Verbindungen der LWS.....	15
1.4.3	Nervale Versorgung der Facettengelenke.....	15
1.4.4	Anatomie der Rückenmuskulatur	16
1.4.4.1	Autochthone Rückenmuskulatur	17
1.4.4.2	Nicht autochthone Rückenmuskulatur	18
1.4.5	Neuromuskuläre Relevanz des M. multifidus für die Studie.....	18
1.5	Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen	20
1.5.1	Kreuzschmerz als Folge von Facettengelenksdegeneration.....	21
1.5.2	Diagnosestellung des Facettengelenkssyndroms	23
1.5.3	Therapieoptionen eines Facettengelenkssyndroms.....	24
1.5.3.1	Konservative Therapie bei chronischen unspezifischen Rückenschmerzen (CLBP)	25
1.5.3.2	Operative Therapie des Facettengelenkssyndroms	26
1.5.3.3	Endoskopische Facettengelenksthermoablation	26
1.5.3.3.1	Indikation.....	27
1.5.3.3.2	Kontraindikationen	27
1.5.3.3.3	Durchführung	27

1.6	Die Elektromyographie.....	29
1.6.1	Klinische Anwendung der Elektromyographie.....	29
1.6.2	Elektrophysiologische Grundlagen des EMG-Signals.....	30
1.6.2.1	Aktionspotential und Erregung der Muskelzelle	30
1.6.2.2	Die Motorische Einheit.....	32
1.6.2.3	Entstehung des EMG-Signals.....	32
1.6.3	Das Oberflächen-EMG.....	33
1.6.3.1	Parameter der sEMG	34
1.6.3.1.1	Amplitude des EMG-Signals.....	34
1.6.3.1.2	Frequenz des EMG-Signals.....	34
1.6.3.2	Einflüsse und Störfaktoren des EMG-Signals	35
1.6.3.3	Das Flexions-Relaxations-Phänomen.....	36
1.7	Fragestellung	37
2.	Material und Methoden	38
2.1	Studiendesign	38
2.2	Patientenkollektiv	38
2.2.1	Studieneinschluss	38
2.2.2	Studienausschluss	38
2.3	Untersuchungsablauf und Beobachtungszeitraum.....	39
2.4	Methodik	41
2.4.1	sEMG Messung	41
2.4.1.1	Platzierung der Elektroden.....	41
2.4.1.1.1	Postoperative Platzierung der Elektroden.....	43
2.4.1.2	Versuchsaufbau	43
2.4.1.3	Erhobene Daten über Fragebögen	46
2.4.1.3.1	Numerische Ratingskala	47

2.4.1.3.2	Core Outcome Measure Index (COMI)	47
2.4.1.3.3	EQ-5D	48
2.5	Einverständniserklärung und Versicherung.....	48
2.6	Ethikvotum	49
2.7	Datenauswertung.....	49
2.7.1	Auswertung der Oberflächen Elektromyographie.....	49
2.7.1.1	Auswertung des Flexions-Relaxation-Phänomens.....	50
2.7.2	Auswertung der Fragebogen gestützten Scores COMI und EQ-5D.....	53
2.7.3	Statistische Auswertung der Daten	54
3.	Ergebnisse	55
3.1	Patientenkollektiv	55
3.1.1	Demografische Daten des Gesamtkollektivs.....	55
3.2	Allgemeine Anamnese präoperativ	56
3.2.1	Spezifische Schmerzanamnese präoperativ	56
3.3	Anzahl der erfassten Fragebögen an den Untersuchungszeitpunkten.....	57
3.4	Numerische Rangskala (NRS)	58
3.4.1	NRS Rücken	58
3.4.2	NRS Bein	59
3.5	Scores zur gesundheitsspezifischen Lebensqualität: EQ-5D und COMI ..	60
3.5.1	EQ-5D	60
3.5.2	COMI.....	61
3.6	EMG-Messungen	62
3.6.1	Amplitudenanalyse der M. multifidii.....	63
3.6.1.1	M. multifidus links.....	63
3.6.1.2	M. multifidus rechts	65
3.6.2	FRR	67

3.6.2.1	FRR links	67
3.6.2.2	FRR rechts.....	68
4.	Diskussion.....	70
4.1	Studienpopulation	70
4.2	Absolute Anzahl der ausgewerteten Fragebögen und durchgeführten EMG-Messungen.....	71
4.3	sEMG	72
4.3.1	Versuchsaufbau und Berechnungsgrundlage FRR.....	72
4.3.2	Amplitudenanalyse der Mm. multifidii und FRR	75
4.3.3	Lebensqualität abgebildet durch EQ-5D und COMI	79
4.4	Schlussfolgerungen	83
5.	Zusammenfassung	86
6.	Anhang.....	88
7.	Abbildungsverzeichnis	93
8.	Tabellenverzeichnis	95
9.	Literaturverzeichnis.....	96
10.	Danksagung.....	109

Abkürzungsverzeichnis

ACh	Acetylcholin
a.-p.	anterior-posterior, lateinisch, vorderer-hinterer
AP	Aktionspotential
Art.	Articulatio, lateinisch, Gelenk
Artt.	Articulationes, lateinisch, Gelenke
AU	Arbeitsunfähigkeit
AZ	Arizona
BMI	Body Mass Index, englisch, Körpermasseindex
BWS	Brustwirbelsäule
CLBP	chronic low back pain, englisch, chronischer Schmerz des unteren Rückens
COMI	Core Outcome Measure Index, englisch, Kern-Kennzahlen-Ergebnisindex
Corp.	Corporation, englisch, Konzern
EbM	evidence-based medicine, englisch, Evidenzbasierte Medizin
EKG	Elektrokardiographie / Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyographie / Elektromyogramm
engl.	englisch
EQ-5D	fünfdimensionaler Gesundheitsfragebogen der EuroQol Group
et al.	et alii, lateinisch, und andere
etc.	et cetera, lateinisch, und die übrigen
FRP	Flexions-Relaxations-Phänomen
FRR	Flexions-Relaxations-Ratio
HWS	Halswirbelsäule
Inc.	Incorporated, englisch, eingetragen
IQA	Interquartilsabstand
LA	Lokalanästhetikum
LBP	low back pain, englisch, Schmerz des unteren Rückens

li	links
LWK	Lendenwirbelkörper
LWS	Lendenwirbelsäule
M.	Musculus, lateinisch, der Muskel
max.	maximal
Mm.	Musculi, lateinisch, die Muskeln
MUAP	Motor Unit Action Potential, englisch, Aktionspotential einer motorischen Einheit
mV	Milivolt
MVF	maximum voluntary flexion, englisch, maximal freiwillige Vorbeuge
n	Gesamtheit
NRS	Numerische Rating-skala
NSAR	nicht steroidale Antirheumatika
NY	New York
p	p-value, englisch, Wahrscheinlichkeit, Signifikanzniveau
Proc.	Processus, lateinisch, Fortsatz
Procc.	Processus, lateinisch, Fortsätze
R.	Ramus, lateinisch, Ast
re	rechts
RMS	Root Mean Square, englisch, quadratisches Mittel
Rr.	Rami, lateinisch, Äste
sEMG	surface EMG, englisch, Oberflächen-EMG
syn.	synonym
tel.	telefonisch
TENS	transkutane elektrische Nervenstimulation
UKB	Universitätsklinikum Bonn
WA	Washington
WHO	World Health Organization, englisch, Weltgesundheitsorganisation
μ V	Mikrovolt

1. Einleitung

1.1 Epidemiologie des Rückenschmerzes

Rückenschmerzen gehören zu den häufigsten medizinischen Diagnosen der westlichen Industrienationen. Durchschnittlich 76 Prozent aller Erwachsenen in Deutschland klagen über mindestens eine Episode von Rückenschmerz im Jahr (Schmidt et al., 2007).

Rückenschmerzen führen zu Arbeitsunfähigkeit und Frühberentung und stellen einen der wichtigsten gesundheitsökonomischen Faktoren für das deutsche Gesundheits- und Sozialsystem dar. So lagen laut Gesundheitsberichterstattung des Robert-Koch-Instituts Rückenschmerzen 2010 auf Platz 1 der Diagnosen mit den längsten Arbeitsunfähigkeitszeiten (AU-Tage) (Robert-Koch-Institut, 2012).

Die, durch chronische Rückenschmerzen verursachten, direkten Gesundheitskosten belaufen sich pro Jahr auf ca. 10 Milliarden Euro. Indirekte Kosten, durch Berentung und Produktivitätsverlust, werden auf 27 Milliarden Euro geschätzt (SVR, 2018).

Trotz der häufig getroffenen Aussage, dass 90 % der unspezifischen Kreuzschmerzen sich innerhalb eines Monats zurückbilden, gibt es keine zufriedenstellenden Daten, die diese These belegen. Im Gegensatz dazu, konnten Hestbaek et al. 2003 in einem Review darlegen, dass durchschnittlich 62 % aller LBP (engl.: low back pain) Patienten nach 12 Monaten weiterhin Schmerzen angaben. Außerdem verdoppelte sich das Risiko für eine weitere LBP Episode, bei Patienten, die bereits ein LBP Ereignis in ihrer Anamnese hatten, gegenüber Patienten ohne ein solches vorheriges Krankheitsgeschehen (Hestbaek et al., 2003).

Nicht alleine aufgrund der hohen Prävalenz von Rückenschmerzen in der Bevölkerung und der daraus entstehenden Belastung für die Patienten sowie das gesamte Gesundheitssystem, spielt die Betrachtung von Rückenschmerzen und möglichen Therapieoptionen eine wichtige Rolle im aktuellen medizinischen, epidemiologischen und sozioökonomischen Kontext.

1.2 Definition von Rückenschmerz

Zeitlich einordnen lassen sich Rückenschmerzen in akute, subakute und chronische Rückenschmerzen, welche über 12 Wochen andauern (Nationale Versorgungsleitlinie, 2017).

Von chronischem Kreuzschmerz (engl. chronic low back pain, CLBP) wird gesprochen, wenn die Symptomatik eines Patienten über 12 Wochen andauert (Nationale Versorgungsleitlinie, 2017). Die Entstehung von CLBP ist meist multifaktoriell (Binder und Nampiaparampil, 2009) und bedeutet für die Patienten oft eine starke Einschränkung ihrer Lebensqualität (Du et al., 2018).

Zudem werden spezifische und nicht spezifische Rückenschmerzen unterschieden. Bei spezifischen Rückenschmerzen lässt sich ein eindeutiges somatisches Korrelat feststellen (z.B. Bandscheibenprolaps, Fraktur etc.). Im Falle unspezifischer Rückenschmerzen hingegen, lässt sich zunächst kein Hinweis auf eine somatische Ursache finden (Will et al., 2018).

1.3 Entstehung von chronischen Rückenschmerzen

In beiden Fällen (spezifischer und nicht spezifischer Rückenschmerz) kann ein akutes Schmerzereignis zur Entstehung chronischer Schmerzen führen. Häufig kommt es zu einem Circulus vitiosus, welcher entsteht, wenn Schmerzen zu Inaktivität der Patienten führen (Heneweer et al., 2009). Aus verminderter Beanspruchung kann sich eine strukturelle Schädigung der Wirbelsäule und Atrophie der Rückenmuskulatur entwickeln, die dann wiederum Ursache für weitere Schmerzentstehung sein kann (Kong et al., 2016; Yoshihara et al., 2001). Es ergibt sich ein rückgekoppeltes System der Schmerzentstehung und -aufrechterhaltung.

Eine Chronifizierung des Rückenschmerzes kann auch durch die Entstehung eines Schmerzgedächtnisses hervorgerufen werden. Dieses wiederum führt zu einer Aufrechterhaltung der Schmerzwahrnehmung z.T. unabhängig vom Fortbestehen des initialen Schmerzauslösers (ähnlich dem Phantomschmerz) (McCarberg und Peppin, 2019). Die

Ursachen, welche zur Entstehung eines Schmerzgedächtnisses beitragen sind Gegenstand aktueller Forschung.

1.4 Muskuloskelettales System der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule als muskuloskelettales System ermöglicht dem Menschen die Rumpfbeweglichkeit bei gleichzeitigem Schutz des Rückenmarks im Spinalkanal (Benninghoff et al., 2008).

1.4.1 Aufbau der Wirbelsäule

Die menschliche Wirbelsäule besteht aus 5 Abschnitten. Von cranial nach caudal sind dies:

- Halswirbelsäule (HWS, bestehend aus 7 Halswirbeln)
- Brustwirbelsäule (BWS, bestehend aus 12 Brustwirbeln)
- Lendenwirbelsäule (LWS, bestehend aus 5 Lendenwirbeln)
- Kreuzbein (Os Sacrum, bestehend aus 5-7 verschmolzenen Wirbeln)
- Steißbein (Os Coccygis, bestehend aus 4-5 verschmolzenen Wirbeln)

Insgesamt ist die Wirbelsäule aus 28 - 31 knöchernen Elementen aufgebaut (Benninghoff et al., 2008).

Die charakteristische Krümmungsform der Wirbelsäule entwickelt sich im Laufe des Lebens durch das Erlernen von Sitzen, Stehen und Laufen und wird final in der Adoleszenz fixiert. Es resultiert die Form eines „doppelläufigen S“ (Schünke et al., 2011). Die als Lordose bezeichnete Krümmung nach ventral findet sich dann an HWS und LWS, die als Kyphose bezeichnete Krümmung nach dorsal an BWS und Kreuz- und Steißbein (Aumüller et al., 2010).

1.4.1.1 Die knöcherne Lendenwirbelsäule

Die 5 Lendenwirbelkörper des Menschen sind wie folgt aufgebaut (Schünke et al., 2014):

- einem Wirbelkörper (Corpus vertebrae)
- einem Wirbelbogen (Arcus vertebrae)
- einem Dornfortsatz (Proc. spinosus)
- zwei Querfortsätzen (Procc. transversi)
- vier Gelenkfortsätzen (Procc. articulares)
 - 2 Procc. articulares superior
 - 2 Procc. articulares inferior

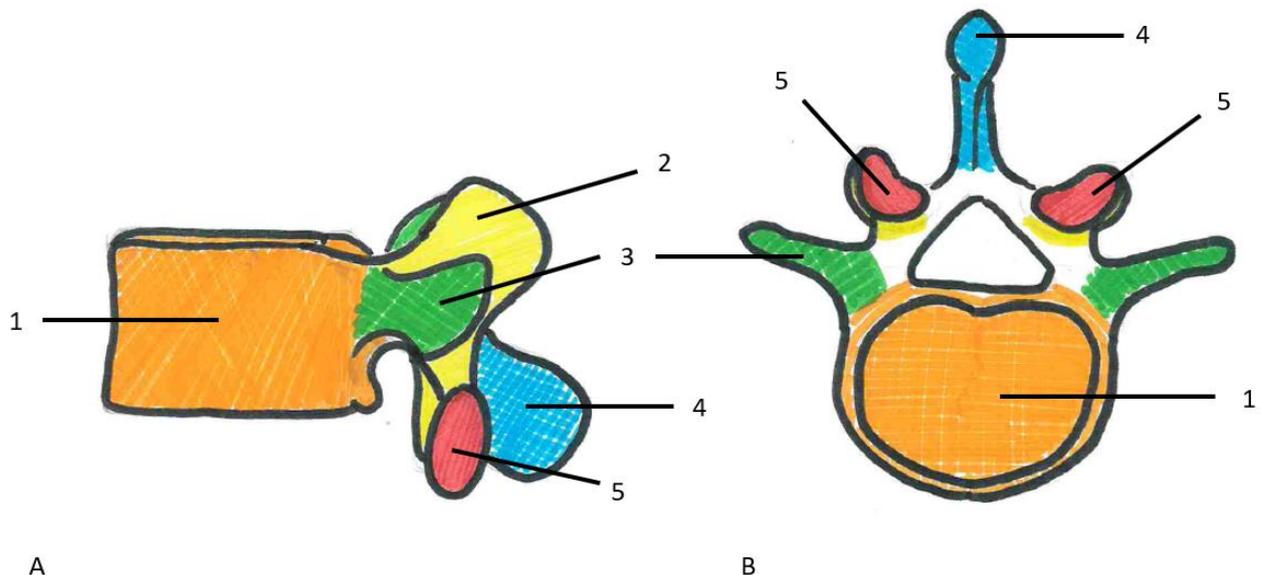


Abb. 1: Schematische Skizze eines LWK in lateraler Ansicht (A) und cranialer Ansicht (B). (1) Corpus vertebrae, (2) Proc. articularis superior, (3) Proc. costalis, (4) Proc. spinosus, (5) Facies articularis (Greiffenberg, 2020).

Die zunehmende Krafteinwirkung von cranial nach caudal, verursacht durch die Last von Kopf, Rumpf und oberer Extremität, wird mithilfe der Wirbelkörper auf Becken und untere Extremität verteilt. Dies hat eine besonders hohe Belastung für die LWS zur Folge (Niethard et al., 2017).

1.4.2 Gelenkige Verbindungen der LWS

Die gelenkigen Verbindungen der Wirbelsäule beinhalten sowohl echte (Diarthrosen) als auch unechte Gelenke (Synarthrosen) (Aumüller et al., 2010).

Echte Gelenke der Wirbelsäule sind die atlanto-okzipitalen Gelenke des Hinterkopfes und die paarig angelegten Facettengelenke (Art. zygapophysiales). Deren Gelenkflächen bilden die Procc. articulares, wobei jeweils die Fortsätze zwei übereinander liegender Wirbel miteinander artikulieren (Proc. articularis superior des unteren Wirbels artikuliert mit Proc. articularis inferior des darüber liegenden Wirbels). Um auf die unterschiedlich starken Belastungen und Funktionen der einzelnen Abschnitte der Wirbelsäule angepasst zu sein, variiert die Form der Wirbelkörper je nach Lokalisation. Dies hat auch eine unterschiedlich starke Neigung der Gelenkflächen in Transversal- und Frontalebene zur Folge. Es ergeben sich verschiedene Bewegungsausmaße für HWS; BWS und LWS (Schünke et al., 2011).

Unechte Gelenke der Wirbelsäule bilden der Bandscheibenapparat (Discus articulares) und das atlanto-axiale Gelenk der ersten beiden Halswirbel (Aumüller et al., 2010).

Die Gesamtbeweglichkeit der Wirbelsäule ergibt sich aus dem komplexen Zusammenspiel von knöchernen, gelenkigen und muskulären Strukturen und ermöglicht die vier Hauptbewegungen Ventralflexion, Dorsalextension, Lateralflexion und Rotation (Schünke et al., 2011).

Die kleinste funktionelle Einheit der Wirbelsäule (auch spinale Bewegungssegment (nach Junghans) genannt), besteht aus zwei Wirbelkörpern, der dazwischen liegenden Bandscheibe, den von ihnen gebildeten Facettengelenken sowie den angrenzenden Muskeln und Bändern (Frisch, 1996).

1.4.3 Nervale Versorgung der Facettengelenke

Sensorisch innerviert ist die Gelenkkapsel des Facettengelenks, welche meist direkt an der Gelenkfläche ansetzt, über den Ramus dorsalis (R. dorsalis, auch R. posterior) des

Spinalnervs. Diesem entspringt der R. dorsalis im Foramen intervertebrale und zieht, durch eine fettgewebige Hülle geschützt, über den Proc. transversus entlang der Basis des Proc. articularis superior dorsalwärts (Jeong et al., 2014). Dort erfolgt die Aufteilung in einen medialen und einen lateralen Anteil. Die Gelenkkapsel wird durch die medialen Anteile der Rr. dorsales zwei benachbarter Segmente versorgt (Kim und Kim, 2010). Zusätzlich wird die autochthone Rückenmuskulatur motorisch durch die Rr. dorsales der Spinalnerven versorgt (Schünke et al., 2014).

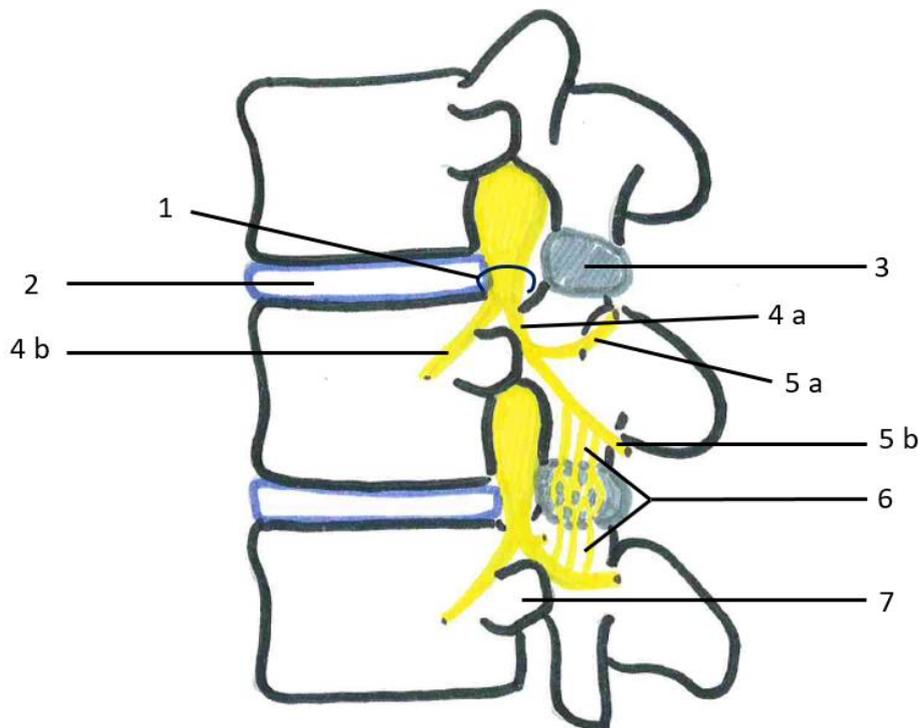


Abb. 2: Schematische Skizze der Facettengelenksinnervation in lateraler Ansicht (modifiziert nach Weber, 2020): (1) Spinalnerv, (2) Bandscheibe, (3) Facettengelenk, (4a) R. dorsalis, (4b) R. ventralis (5a) lateraler Ast, (5b) medialer Ast, (6) sensible Innervation des Facettengelenks, (7) Proc. transversus.

1.4.4 Anatomie der Rückenmuskulatur

Um die Beweglichkeit der Wirbelsäule zu ermöglichen und gleichzeitig die Rumpfstabilität, sowie das Gleichgewicht zu gewährleisten, benötigt der Mensch seine Rückenmuskulatur.

Nach ihrer unterschiedlichen embryonalen Entstehung, wird die Rückenmuskulatur in zwei Systeme eingeteilt (Aumüller et al., 2010).

Die sogenannte (sog.) autochthone Rückenmuskulatur (tiefe Rückenmuskulatur) entwickelt sich „vor Ort“, während die nicht autochthone (oberflächliche) Rückenmuskulatur während der Embryonalentwicklung in den lateralen und ventralen Rumpf wandert (Ulfig, 2009). Durch diese Entwicklungsunterschiede kommt eine unterschiedliche Innervation der einzelnen Muskelsysteme zustande.

1.4.4.1 Autochthone Rückenmuskulatur

Die Gesamtheit der autochthonen Rückenmuskulatur wird als M. erector spinae bezeichnet und von der Fascia thoracolumbalis umhüllt (Benninghoff et al., 2008).

Weiterhin lässt der M. erector spinae sich in einen lateralen und einen medialen Trakt unterteilen.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Einteilung:

Tab. 1: Übersicht über die Systeme des M. erector spinae.

Medialer Trakt	Lateraler Trakt
<p>spinales System:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mm. interspinales • M. spinalis 	<p>sacrospinales System:</p> <ul style="list-style-type: none"> • M. iliocostalis • M. longissimus
<p>transversospinales System:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mm. rotatores breves et longi • M. multifidus • M. semispinalis 	<p>spinotransversales System:</p> <ul style="list-style-type: none"> • M. splenius
	<p>intertransversales System:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mm. intertransversarii • Mm. levatores costarum

Die Innervation der autochthonen Rückenmuskulatur erfolgt segmental über den R. dorsalis des Spinalnervs. Die im Verlauf durch Aufteilung entstandenen medialen Äste versorgen den medialen Trakt und die lateralen Nervenäste den lateralen Trakt.

1.4.4.2 Nicht autochthone Rückenmuskulatur

Die nicht autochthonen Rückenmuskeln dienen weniger der Stabilität der Wirbelsäule, sondern sind für die Beweglichkeit des Rumpfes zuständig.

Sie können wie folgt unterteilt werden (Paulsen und Waschke, 2017):

- Spinocostale Muskeln:
 - M. serratus posterior superior
 - M. serratus posterior inferior
- Spinoscapuläre Muskeln:
 - M. rhomboideus major
 - M. rhomboideus minor
 - M. levator scapulae
 - M. serratus anterior
 - M. pectoralis major
 - M. pectoralis minor
 - M. trapezius
 - M. latissimus dorsi

Diese Muskeln werden von den Rr. ventrales der Spinalnerven innerviert, da sie ihre Innervation während der Embryonalentwicklung in die Peripherie mitnehmen (Trepel, 2015).

1.4.5 Neuromuskuläre Relevanz des M. multifidus für die Studie

Für die Stabilisierung der Wirbelsäule ist die autochthone Rückenmuskulatur von besonderer Bedeutung. Vor allem der M. multifidus trägt maßgeblich zur segmentalen Kontrolle der LWS und deren Stabilisierung während Rotations- und Extensionsbewegungen bei

(Chen et al., 2016). Dabei ermöglicht er sowohl eine Dorsalextension bei beidseitiger Kontraktion, sowie eine durch ipsilaterale Kontraktion induzierte Lateralflexion (Schünke et al., 2014).

Der M. multifidus entspringt zwischen Proc. transversus und Proc. spinosus, bzw. der Facies dorsalis des Os sacrum und zieht mit seinen Fasern zum Proc. spinosus eines darüber liegenden Wirbels, wo er ansetzt. Alle Wirbelsäulensegmente sind mit Fasern des M. multifidus verbunden (Benninghoff et al., 2008). Tiefe Muskelanteile überspringen dabei zwei bis drei Wirbelkörper, oberflächliche Muskelanteile bis zu fünf Wirbeletagen. Über der LWS ist der M. multifidus am prominentesten (Abb. 3).

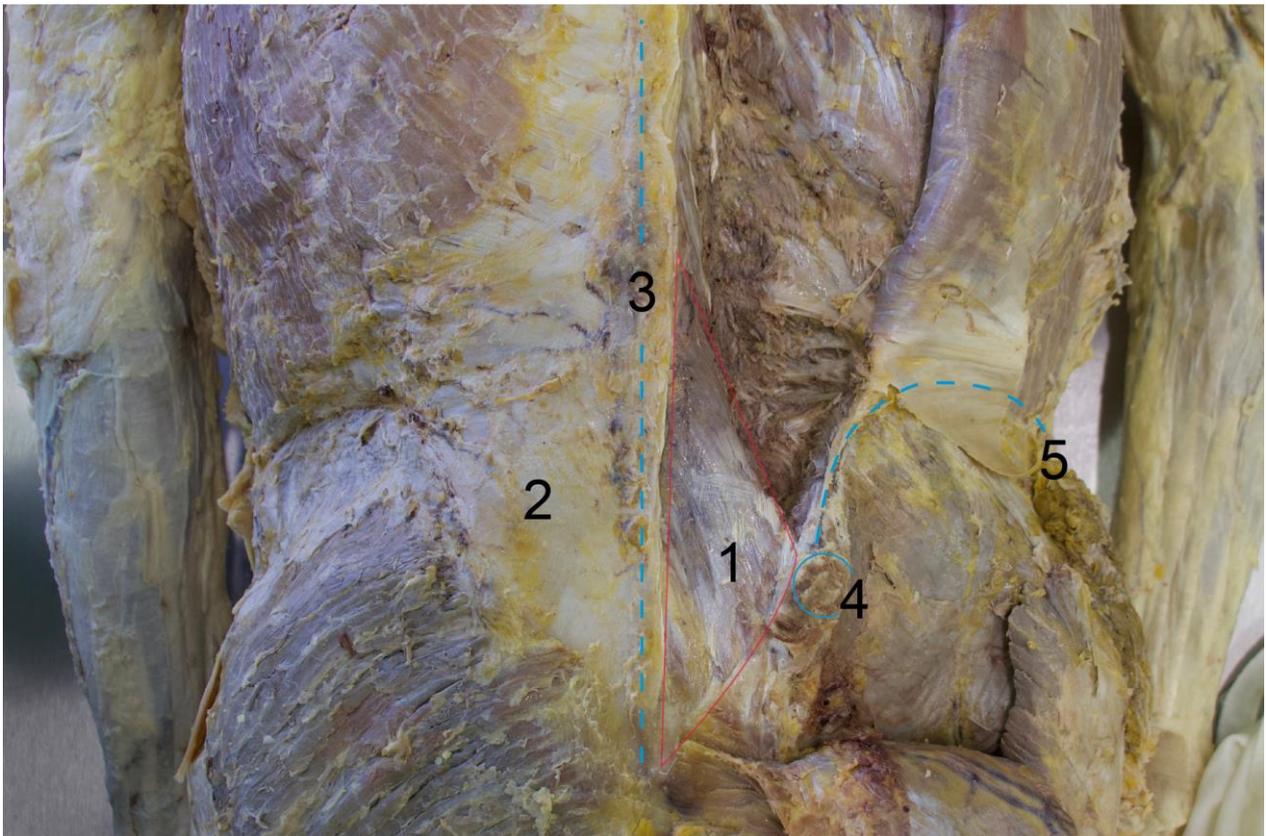


Abb. 3: Anatomische Präparation des rechten M. multifidus in der LWS: (1) M. multifidus, (2) Fascia thoracolumbalis, (3) oberflächliche Projektion der Procc. spinosi, (4) Spina iliaca posterior superior, (5) Crista iliaca (Schliwa und Weber, 2018).

Wie bei allen Anteilen des M. erector spinae erfolgt die Innervation des M. multifidus durch den R. dorsalis, speziell durch mediale Äste des R. dorsalis auf Segmenthöhe (Aumüller et al., 2010).

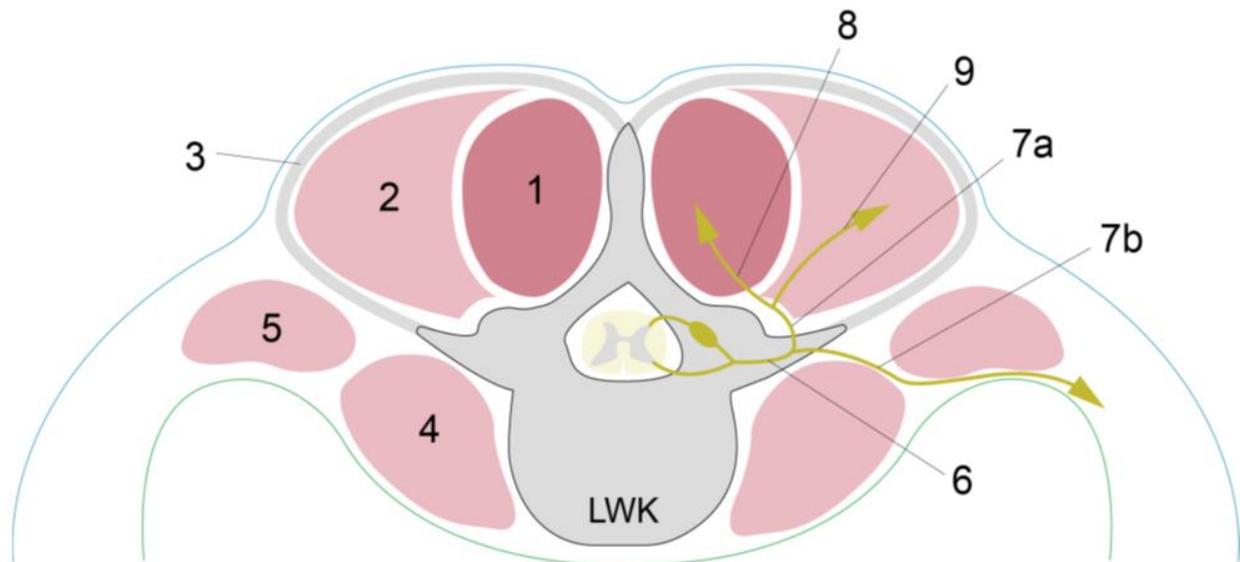


Abb. 4: Schematischer Querschnitt durch die lumbale Wirbelsäule 1 (modifiziert nach Schünke et al., 2014): (1) M. multifidus, (2) lateraler Trakt: M. iliocostalis und M. longissimus, (3) Fascia thoracolumbalis, (4) M. psoas major, (5) M. quadratus lumborum, (6) Spinalnerv, (7a) R. dosalis, (7b) R. ventralis, (8) medialer Ast des R. dorsalis, (9) lateraler Ast des R. dorsalis (Weber, 2019).

1.5 Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen

Wie alle anatomischen Strukturen, ist die Wirbelsäule einem physiologischen Alterungsprozess mit einhergehender Abnutzung unterworfen. Je stärker die punktuelle Belastung ist, desto schneller schreitet eine Abnutzung des betroffenen Gewebes voran (Ryang et al., 2017). Wenn diese Abnutzungserscheinungen einen Krankheitswert bekommen, spricht man von degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen. Je nach betroffener Struktur, werden folgende Begrifflichkeiten verwandt (Niethard et al., 2017):

Tab. 2: Begriffserklärungen degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen.

Begriff	Betroffene Struktur
Chondrose	Knorpel
Osteochondrose	Knochen und Knorpel
Spondylose	Wirbelkörper
Spondylarthrose	Facettengelenk

Für die unterschiedlichen klinischen Ausprägungen degenerativer Schmerzsyndrome, lassen sich folgende Begrifflichkeiten unterscheiden (Niethard et al., 2017):

- Lokales Wirbelsäulensyndrom: lokale Schmerzsymptomatik
- Radikuläres Wirbelsäulensyndrom (Nervenwurzelnsyndrom): Schmerzausstrahlung im Dermatombereich, ggf. radikuläre Ausfälle
- Pseudoradikuläres Schmerzsyndrom: Schmerzausstrahlung folgt nicht einem spezifischen Nervenversorgungsgebiet

1.5.1 Kreuzschmerz als Folge von Facettengelenksdegeneration

Der Großteil aller Rückenbeschwerden manifestiert sich in der LWS. Neben akuten Beschwerden durch Trauma oder Überbelastung, sind vor allem chronische Rückenschmerzen in der LWS lokalisiert (Niethard et al., 2017).

Bereits 1911 beschrieb Joel Goldthwait das Facettengelenk als potentiellen Schmerzgenerator für Kreuzschmerz (Goldthwait, 1911). Seitdem belegt eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten diese Hypothese. Es wird davon ausgegangen, dass eine Facettengelenksarthrose in 15 bis 40 % die Ursache für CLBP ist (Berven et al., 2002). Dabei nimmt die Inzidenz von CLBP ab einem Patientenalter von 30 Jahren kontinuierlich zu, am stärksten betroffen sind Patienten über 60 Jahren (Manchikan et al., 2008).

Bereits ab dem 30. Lebensjahr beginnen degenerative Prozesse an Wirbelsäule und Bandscheiben. Die Bandscheiben verlieren kontinuierlich an Elastizität und Höhe, was eine größere Mobilität der Bewegungssegmente zur Folge hat. Die zusätzliche Beweg-

lichkeit muss durch eine vermehrte Kraftaufnahme der Facettengelenke kompensiert werden (Fujiwara et al., 2000). Dieser Kompensationsmechanismus führt wiederum zu einer arthrotischen Degeneration der Facettengelenke.

Im Zuge der arthrotischen Veränderungen kommt es zu knöchernen Anbauten, sog. Spondylophyten. Sie tragen dazu bei, dass die Gelenkflächen einer zunehmenden Inkongruenz ausgesetzt werden, was eine erhöhte Belastung für den Gelenkknorpel bedeutet. Verstärkte Abnutzung und Begünstigung inflammatorischer Prozesse im Gelenk sind die Folge (Grgić, 2011).

Mögliche Komplikationen bei ausgeprägter Spondylophytenbildung sind eine Einengung des Spinalnervs im Foramen intervertebrale oder dem Spinalkanal mit der Folge von chronischen, radikulären Schmerzen, bis hin zu neurologischen Defiziten (Niethard et al., 2017).

Sowohl mechanische Instabilität, als auch proinflammatorische Botenstoffe, wie verschiedene Zytokine und Prostaglandine, tragen ursächlich zu der Entstehung eines chronischen Schmerzsyndroms bei (Igarashi et al., 2004).

Unterschiedliche, für die Schmerzwahrnehmung und -weiterleitung zuständige, Mechanorezeptoren und freie Nervenendigungen, sind sowohl in der Gelenkkapsel, als auch den Synovialfalten der Facettengelenke aller Segmente der Wirbelsäule enthalten. So kann die Schmerzwahrnehmung aus den Facettengelenken über mediale Äste des jeweiligen R. dorsalis des Spinalnervs ans Rückenmark weitergeleitet werden (McLain und Pickar, 1998).

Zusammenfassend wird von einem Facettengelenkssyndrom (syn. Facettensyndrom (Pschyrembel Online, 2016)) gesprochen (Perolat et al., 2018).

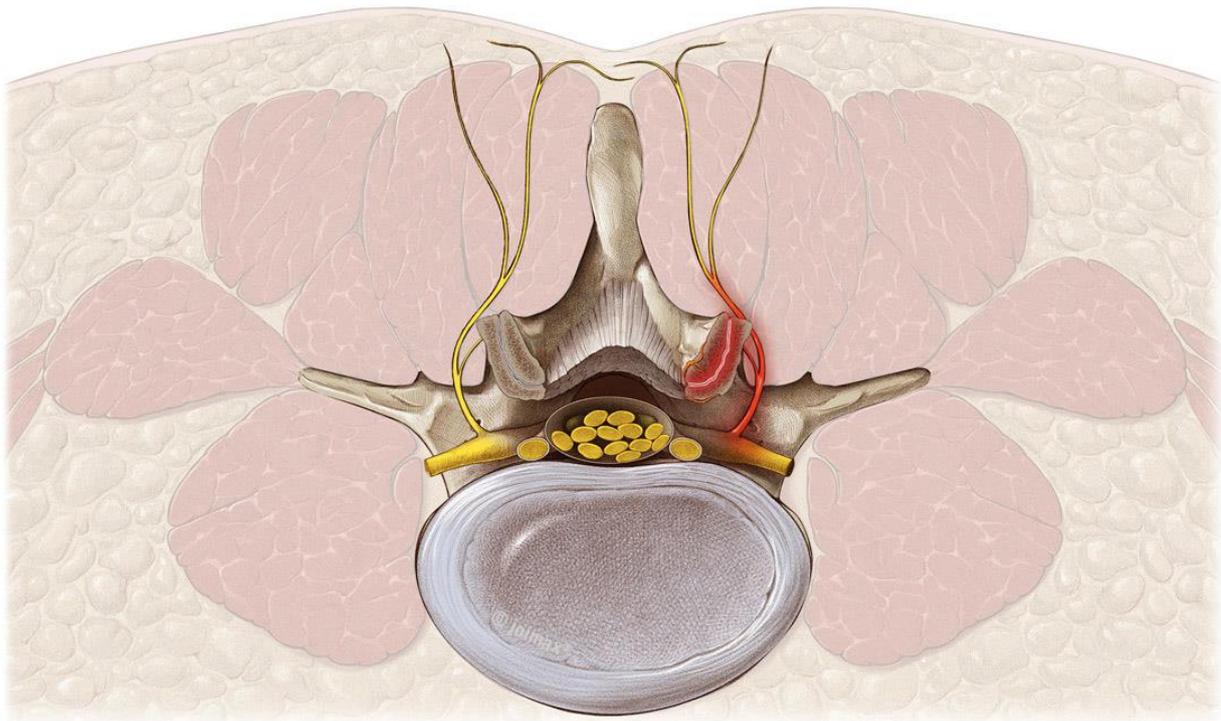


Abb. 5: Schematischer Querschnitt durch die lumbale Wirbelsäule 2: Degeneration des linken Facettengelenks und Schmerzweiterleitung durch die medialen Äste des linken R. dorsalis (rot) (joimax®).

1.5.2 Diagnosestellung des Facettengelenkssyndroms

Für die Diagnosestellung eines Facettengelenkssyndroms ist v.a. der klinische Aspekt ausschlaggebend.

Die typische Schmerzsymptomatik der Patienten beschränkt sich dabei auf einen lokalen Schmerz im Bereich der LWS. Es können sich jedoch auch Schmerzsyndrome mit pseudoradikulärer Ausstrahlung in Gesäß und / oder Bein zeigen. Dabei verläuft die Ausstrahlung meist posterolateral am Oberschenkel entlang und zieht weiter bis auf Kniehöhe oder Wade. Eine Ausstrahlung von Schmerzen in den Fuß ist selten (Niethard et al., 2017).

In der klinischen Untersuchung lässt sich meist ein Druckschmerz über den Facettengelenken durch den Untersucher provozieren. Ebenso besteht eine Verstärkung der Schmerzsymptomatik bei Dorsalextension (Bernard und Kirkaldy-Willis, 1987).

Da psychosomatische Komponenten bei CLBP Patienten ebenfalls häufig eine Rolle spielen und die Prognose der Erkrankung erheblich beeinflussen können, ist eine ausführliche

Anamnese mit Einbeziehung von psychischen Gesundheitsaspekten besonders wichtig (La Touche et al., 2019).

Mithilfe von bildgebenden Verfahren, kann eine Aussage über den morphologischen Zustand der Facettengelenke getroffen werden. Besonders in der Kernspintomographie, können durch Kontrastmittelaufnahmen mögliche entzündliche Veränderungen an den Facettengelenken dargestellt werden (Stelzeneder und Trattig, 2010). Trotz der heutzutage hochauflösenden Bildgebung bleibt zu beachten, dass sich die Klinik der Patienten und die radiologisch darstellbaren morphologischen Veränderungen der Facettengelenke nicht automatisch übereinstimmend präsentieren. Eine Diagnose alleine aufgrund von bildmorphologischen Veränderungen zu stellen, bleibt unzureichend (Mainka et al., 2013).

Um die Diagnose eines Facettengelenksyndroms als ursächlich für die Kreuzschmerzen eines Patienten stellen zu können, hat sich die Methode des sog. Schmerzblocks etabliert. Dabei wird ein Lokalanästhetikum (LA, meist 1 - 5 ml 1 %-iges Lidocain und / oder Bupivacain) unter radiologischer Kontrolle (z.B. Sonographie, Computertomographie oder Bildwandler) mithilfe einer Spinalnadel unmittelbar am R. dorsalis, bzw. intraartikulär appliziert (Perolat et al., 2018). Obwohl keine Evidenz für die Wirksamkeit dieser Methode als therapeutische Option vorliegt (Slipman et al., 2003), so ist sie als Diagnostikum dennoch sinnvoll einsetzbar (Falco et al., 2012). Führt ein Schmerzblock während der Wirkzeit des LA zu einer Schmerzreduktion um 80 % und ermöglicht die schmerzfreie Fähigkeit zur Ausführung vorher schmerzhafter Bewegungen, so kann er als positiv gewertet werden (Manchikanti et al., 2007). Unterschiedliche Ansätze gibt es bei der Häufigkeit der angewandten Blöcke bis zur finalen Diagnosestellung. So konnten Cohen et al. zeigen, dass der Erfolg einer perkutanen Radiofrequenz-Denervation nach vorangegangenem zweifachem Block um 25 % größer war, als nach einfachem (Cohen et al., 2010).

1.5.3 Therapieoptionen eines Facettengelenksyndroms

Zur Behandlung eines Facettengelenksyndroms sowie allgemein degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen, stehen eine Vielzahl von Behandlungsmethoden zur Verfügung.

Diese lassen sich in konservative und interventionelle bzw. operative Maßnahmen unterteilen und richten sich nach der Klinik des Patienten, dessen Behandlungswunsch und der Einschätzung und Expertise des behandelnden Arztes.

1.5.3.1 Konservative Therapie bei chronischen unspezifischen Rückenschmerzen (CLBP)

Eine konservative Therapie ist primär angezeigt, wenn anderweitig ursächliche Pathologien, die eine dringliche Behandlung erfordern (bspw. motorische Defizite) ausgeschlossen sind. Sie sollte konsequent über mindestens 6 Wochen erfolgen (Hoffmann et al., 2016)

Ziel der konservativen Therapie ist die Schmerzreduktion auf ein für den Patienten erträgliches Maß sowie das Verhindern eines schnellen Fortschreitens des Krankheitsverlaufs (Nationale Versorgungsleitlinie, 2017).

Medikamentöse und nichtmedikamentöse Therapie, sollten dabei ergänzend im Sinne eines multimodalen Therapiekonzepts eingesetzt werden (Curtis et al., 2020).

Die medikamentöse Therapie dient lediglich zur Symptomkontrolle und sollte dazu beitragen das normale Aktivitätsniveau des Patienten schnellstmöglich wieder zu erreichen. Das Vorgehen nach WHO-Stufenschema empfiehlt sich als Standard (Chenot et al., 2017).

Vorrangiges Ziel der nicht medikamentösen Therapie ist v.a. die Beibehaltung der körperlichen Aktivitäten des Patienten zu ermöglichen (Dahm et al., 2010). Gewichtsreduktion, Akupunktur, Kälte- / Wärmetherapie, Massage, Physiotherapie und Elektrotherapie (transkutane elektrische Nervenstimulation, TENS) sind mögliche Optionen. Außerdem konnte eine gute Wirksamkeit für die Kombination von psychologischen, verhaltenstherapeutischen Interventionen mit anderen Therapieoptionen in der Behandlung von chronischen Rückenschmerzpatienten gezeigt werden (Hoffman et al., 2007).

Um das geeignete Therapiekonzept für den Patienten zu erarbeiten, sollten dessen Leidensdruck, die angegebene Schmerzintensität, seine Therapievorstellungen, sowie das Alter und die Compliance berücksichtigt werden (Nationale Versorgungsleitlinie, 2017).

1.5.3.2 Operative Therapie des Facettengelenkssyndroms

Interventionelle und operative Therapieoptionen kommen zum Einsatz wenn die konventionelle Therapie nicht die gewünschten Resultate erzielen konnte (Curtis et al., 2020). Im Folgenden wird nur auf die Endoskopische Facettengelenksthermokoagulation als operative Therapieoption eingegangen, da sie die Grundlage dieser Arbeit darstellt.

1.5.3.3 Endoskopische Facettengelenksthermokoagulation

Bei der endoskopischen Facettengelenksthermokoagulation wird minimal-invasiv eine Denervierung der Facettengelenke durch thermische Destruktion der medialen Äste des R. dorsalis erreicht. Die Wirksamkeit dieser Methode zur Schmerzreduktion konnte bereits in zahlreichen Studien gezeigt werden, wie u.a. eine Übersichtsarbeit von Bogduk et al. aus 2009 zeigt (Bogduk et al., 2009).

Durch die endoskopische Durchführung der Operation, wird dem Operateur eine gute Übersicht bei gleichzeitig minimalem Zugang ermöglicht. So kann unter Sicht auf anatomische Besonderheiten des Patienten eingegangen werden und bspw. mögliche Nebenäste des R. dorsalis mit behandelt werden. Gleichzeitig werden mögliche Komplikationsrisiken sowie der Blutverlust minimiert (Walter et al., 2018).

Außerdem können im Rahmen der Operation degenerativ entstandene Spondylophyten an den Facettengelenken entfernt werden, sodass vorher möglicherweise eingeeengte neuronale Strukturen eine Dekompression erfahren (sog. Facettektomie) (Kapetanakis et al., 2018).

1.5.3.3.1 Indikation

Die Indikation zur endoskopischen Facettengelenksthermokoagulation mit Facettektomie kann gestellt werden, wenn die konservative Therapie versagt hat und ein weiterer Behandlungswunsch des Patienten besteht. Um eine Indikation zu stellen, sollte der Infiltrationstest außerdem positiv ausgefallen sein, d.h. eine deutliche Abnahme der Schmerzen nach Gabe des Lokalanästhetikums ergeben haben (s.o.) (Perolat et al., 2018). Im hier beschriebenen Kollektiv war ein positiver Infiltrationstest Voraussetzung für die Aufnahme in die Studie.

1.5.3.3.2 Kontraindikationen

Als absolute Kontraindikationen für den Eingriff gilt eine Antikoagulation, welche aus medizinischen Gründen nicht abgesetzt oder gebridged werden kann (Ausnahme ASS). Hinzu kommen relevante Pathologien, die das Operationsgebiet betreffen (Tumore, Abszesse). Außerdem muss eine Narkosefähigkeit des Patienten bestehen.

Relative Kontraindikationen entstehen, wenn eine Wirksamkeit des Verfahrens aufgrund der Umstände des Patienten unwahrscheinlich ist. Dies können laufende Berentungsverfahren sowie eine bestehende neuropsychologische Erkrankung sein (Ostermann und Igressa, 2019).

Ein negativer Infiltrationstest spricht gegen eine Wirksamkeit der Operation, sodass sich daraus ebenfalls eine Kontraindikation ergibt (Walter et al., 2018).

1.5.3.3.3 Durchführung

Die Operation kann in Vollnarkose oder lokaler Anästhesie am sedierten Patienten durchgeführt werden. Mithilfe von Fluoroskopie in a.-p.-Projektion wird das betroffene Facettengelenk dargestellt und ein Trokar am Proc. transversus platziert. Über diesen können die endoskopischen Instrumente eingeführt und bedient werden (Abb. 6) (Walter et al., 2018).

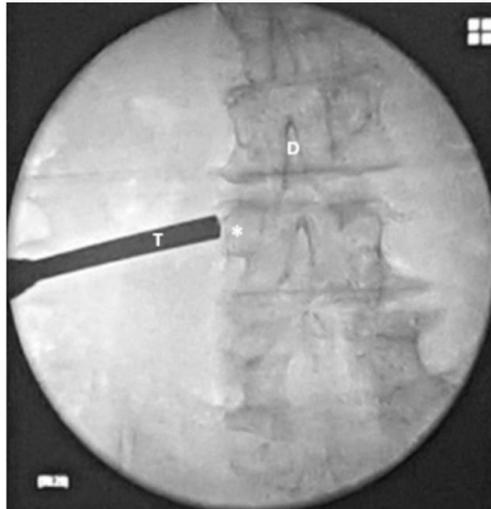


Abb. 6: Lumbale Wirbelsäule in a.-p.-Projektion. Korrekte Positionierung des Trokars (T). Proc. transversus (*) und Procc. spinosi (D) als anatomische Landmarken der nicht rotierten Wirbelsäule (Walter et al., 2018).

Unter visueller Kontrolle wird der Zielpunkt für die Thermokoagulation mittels Radiofrequenzsonde (Vaporflex®-joimax®) bestimmt. Der R. dorsalis kann nun thermokoaguliert werden. Intraoperativ bestätigt die Freisetzung von Fettgewebe die erfolgreiche Denervation (Walter et al., 2018).

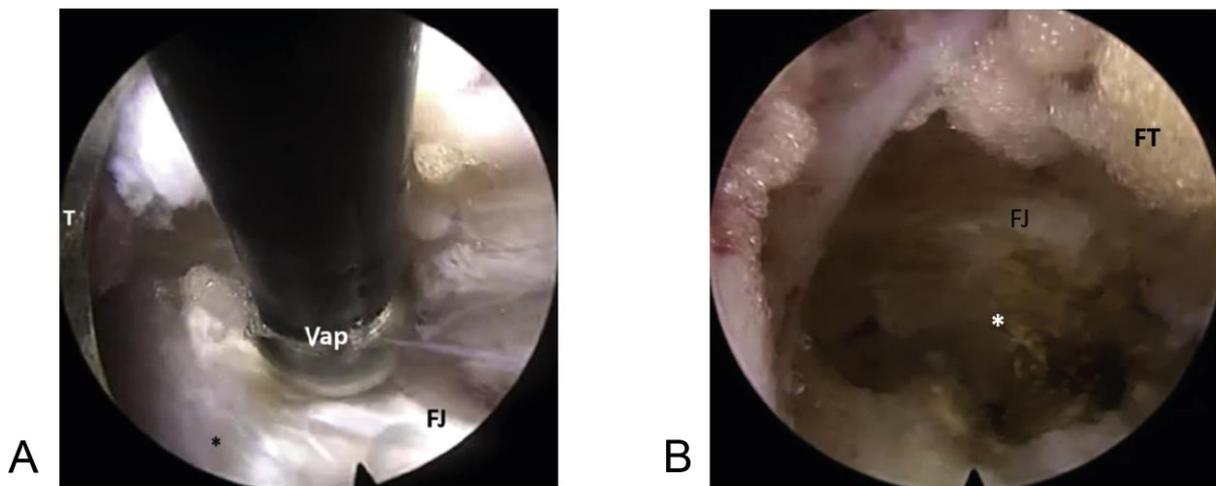


Abb. 7: A: Intraoperativer Blick während der Thermokoagulation. B: nach der Denervation. (T) Trokar, (Vap) Radiofrequenzsonde (VaporflexR®), (*) Proc. transversus, (FJ) Facettengelenk (facet joint), (FT) Fettgewebe (fatty tissue).

Aufgrund der bisegmentalen Innervation der Facettengelenke, müssen zur effektiven Schmerzkontrolle jeweils die medialen Anteile beider, das Segment versorgender, Rr. dorsales koaguliert werden. Die häufig mitbetroffene kontralaterale Seite kann in der gleichen Operation denerviert werden. Nach erfolgter Thermokoagulation aller, zu behandelnder Segmente, kann das Instrumentarium entfernt werden. Zuletzt werden die Wunden durch eine Naht verschlossen (Ostermann und Igressa, 2019).

Postoperativ ist eine ausreichende Analgesie und frühzeitige Mobilisierung entscheidend für die schnellstmögliche Rehabilitation (Strohmeier et al., 2020).

1.6 Die Elektromyographie

Die Elektromyographie (EMG) ist eine Methode zur Untersuchung von elektrischer Muskelaktivität. Mittels EMG können Aktionspotentiale der Skelettmuskulatur aufgezeichnet und analysiert werden. Die Methode ist i.d.R. kostengünstig und einfach anzuwenden. Sie lässt sich beliebig oft reproduzieren und liefert meist direkt verwertbare Ergebnisse (Whittaker, 2012).

Seit Luigi Galvani Ende des 18. Jhd. in seinen Experimenten die Kontraktion von Muskelgewebe durch das Anlegen eines Stromes provozieren konnte, hat sich die Elektrophysiologie stetig weiterentwickelt. Es wurden verschiedene Methoden entwickelt, mithilfe derer sich myoelektrische Signale ableiten und aufzeichnen lassen. Dies ermöglicht der heutigen Medizin vor allem die genauere Untersuchung von neuromuskulären Erkrankungen (Kazamel und Warren, 2017).

1.6.1 Klinische Anwendung der Elektromyographie

Die Elektromyographie findet heutzutage eine breite Anwendung sowohl in der Klinik als auch in der Forschung. In der Neurologie wird sie v.a. dazu eingesetzt, um Muskel- und Nervenerkrankungen zu untersuchen und deren Verläufe zu erforschen. Die Abbildung

von Muskelaktivität von am muskuloskeletalen System erkrankten Patienten, kann darüber hinaus auch in der Orthopädie, der Schmerz- und Physiotherapie für therapierelevante Erkenntnisse sorgen. Die Sportwissenschaft nutzt die elektromyographischen Untersuchungsergebnisse u.a. zur Analyse und Verbesserung von Trainingsinhalten (Konrad, 2011). Auch in der Arbeitsmedizin findet die Elektromyographie Anwendung, um muskuläre Arbeit im Beruf zu quantifizieren und deren Auswirkung auf den Arbeitnehmer im Sinne einer Gefahrenbeurteilung zu bestimmen (Arbeitsmedizinische S2k-Leitlinie, 2013).

1.6.2 Elektrophysiologische Grundlagen des EMG-Signals

1.6.2.1 Aktionspotential und Erregung der Muskelzelle

Die Membran der Muskelzelle trennt den Intra- und den Extrazellulärraum. Aufgrund der dort herrschenden, unterschiedlich hohen Konzentrationen von ionisierbaren Elektrolyten wie Kalium, Chlorid und Natrium, liegt eine permanente Spannung an der Membran an. Diese Spannungsdifferenz wird durch die Natrium-Kalium-ATPase aufrechterhalten, die permanent Natrium-Ionen gegen Kalium-Ionen austauscht. Eine Zelle in Ruhe ist im Inneren negativ geladen. Die Ladung wird durch intrazelluläre Anionen verstärkt, welche die Zellmembran nicht passieren können. Das Äußere der Zelle ist positiv geladen. So entsteht ein Ruhemembranpotenzial von ca. -70 mV bis -90 mV (Draguhn, 2014).

Die für die Kontraktion einer Muskelzelle nötige Erregung entsteht im motorischen Kortex der Großhirnrinde. Die Weiterleitung erfolgt entlang des Tractus corticospinalis (Pyramiden-Bahn) zu den α -Motoneuronen, welche im Vorderhorn des Rückenmarks liegen. Entlang der myelinisierten Axone der Motoneurone, gelangt der Reiz zur motorischen Endplatte. Am synaptischen Endköpfchen sorgt das eintreffende Aktionspotential (AP) für eine Fusion der mit Acetylcholin (ACh) gefüllten Vesikel mit der präsynaptischen Membran. Es kommt zur Ausbreitung des Neurotransmitters in der Synapse (motorische Endplatte), was eine Aktivierung der acetylcholinergen Rezeptoren der postsynaptischen

Membran zur Folge hat. Diese führen zur Öffnung von spannungsgesteuerten Natriumkanälen, sodass Natrium in die Muskelzelle strömt. Der Natriumeinstrom depolarisiert die Zellmembran, über welche die Erregung entlang der gesamten Muskelzelle elektronisch fortgeleitet wird. Dieser Vorgang wird Endplattenpotential (EPP) genannt (Kraft und Brenner, 2014).

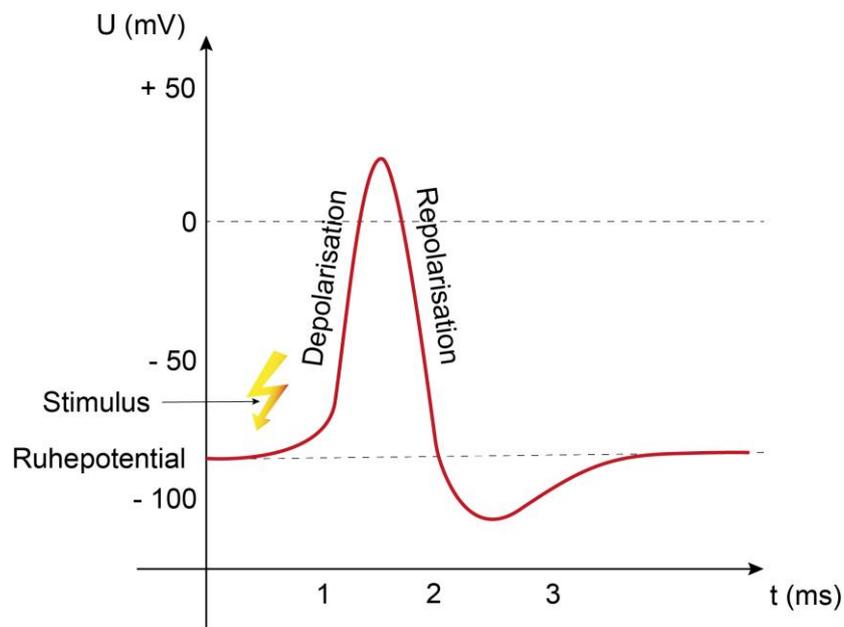


Abb. 8: Schematische Darstellung eines AP (rot), (modifiziert nach Schmidt und Lang, 2007; Weber 2019).

Die maximale Spannung des AP beträgt ca. +40 mV bis +50 mV. Auf die Depolarisation der Zellmembran folgt die Repolarisationsphase, in welcher die ursprünglichen Spannungsverhältnisse wiederhergestellt werden. Liegt wieder das Ruhemenbranpotential vor, kann eine neue Depolarisation ausgelöst werden (Draguhn, 2014).

Die eigentliche Kontraktion wird vom kontraktilem Apparat der Muskelzelle bewirkt. Eine Erregung der Membran der Muskelzelle führt zum Calciumeinstrom in die Zelle, welcher wiederum durch die Initiierung des Querbrückenzyklus zur Verkürzung der kontraktilem

Proteine führt. Da das AP ein elektrischer Impuls ist, welcher zu einer mechanischen Reaktion führt, wird dieser Vorgang als elektromechanische Kopplung bezeichnet (Cretoiu et al., 2018).

Im gesunden Muskel führt jedes ankommende AP an der motorischen Endplatte zu einer Kontraktion der Muskelzelle (Allen et al., 2008).

1.6.2.2 Die Motorische Einheit

Die motorische Einheit ist die kleinste funktionelle Einheit, die der Motorik der Skelettmuskulatur zu Grunde liegt. Sie umfasst ein Motoneuron und alle von diesem innervierten Muskelfasern. Die resultierende Motorik hängt mit der Anzahl der Muskelfasern der motorischen Einheit zusammen. Je weniger Fasern pro Motoneuron innerviert werden, desto feinere Kontraktionen sind möglich (Heckman und Enoka, 2012).

1.6.2.3 Entstehung des EMG-Signals

Die Potentialveränderungen, die durch das Fortleiten einer Depolarisation mit anschließender Repolarisation der Zellmembran entstehen, können mithilfe der EMG detektiert werden. Der durch das AP entstehende Dipol pflanzt sich zeitlich und räumlich fort und kann von der EMG-Elektrode erfasst werden (Konrad, 2011).

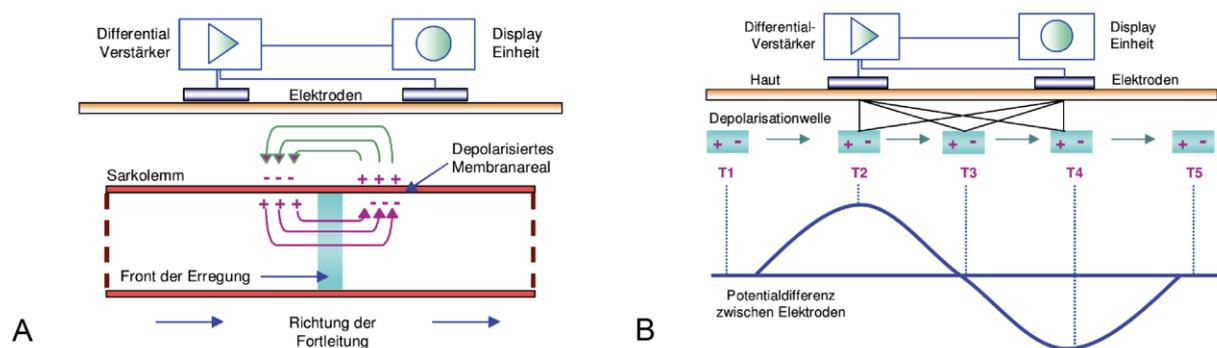


Abb. 9: Depolarisation der Zellmembran (A) und Modell eines wandernden Dipols auf der Muskelfasermembran (B). Dargestellt ist die Ableitung mittels Oberflächenelektroden auf der Haut (Konrad, 2011).

Bei der Muskelkontraktion sind gleichzeitig viele motorische Einheiten aktiviert, um eine ausreichende Anzahl an Muskelfasern bereitzustellen. Je nach Positionierung der EMG-Elektrode, erfasst diese die Signale aller erregten Muskelfasern innerhalb der aktivierten motorischen Einheit. Es kommt zu Überlagerungen, die durch die Detektion der Potentialdifferenzen aller erfasster Muskelfasern entstehen, welche „Motor Unit Action Potential“ (MUAP) genannte werden. Die MUAPs sind von der Positionierung der Elektroden und dem Faserverlauf der Muskulatur abhängig (Rodríguez-Carreño et al., 2012). „In kinesio- logischen Studien sind die MUAPs aller vom Elektrodenpaar erfassten motorischen Einheiten elektrisch überlagert“ (Konrad, 2011). Es erscheint ein bipolares Signal, dessen Mittelwert Null beträgt und welches sich aus symmetrisch verteilten negativen und positiven Signalamplituden zusammensetzt. Das Überlagerungssignal der einzelnen Signalamplituden heißt Interferenzsignal und „repräsentiert das eigentliche EMG-Messsignal“ (Konrad, 2011).

1.6.3 Das Oberflächen-EMG

Die Oberflächen-Elektromyographie (sEMG, engl. surface EMG), ist eine nicht invasive Messmethode, bei welcher die fortgeleiteten Aktionspotentiale der Muskulatur über, auf der Haut angebrachten, Elektroden transkutan registriert werden (Merletti und Muceli, 2019). Das entstehende bipolare EMG-Signal spiegelt die aktivierten Muskelfasern mit deren summierten motorischen Einheiten wieder (Stålberg et al., 2019).

Im Gegensatz zur sEMG, erlaubt die Nadel-Elektromyographie eine genauere Betrachtung der einzelnen aktivierten Muskelfasern, ist jedoch weniger hilfreich bei der Darstellung von Muskelaktivität der gesamten motorischen Einheit oder ganzer Muskeln und Muskelgruppen (Rubin, 2019).

1.6.3.1 Parameter der sEMG

1.6.3.1.1 Amplitude des EMG-Signals

Die Amplitude des EMG-Signals beschreibt grob die Anzahl der aktivierten Muskelfasern während einer Kontraktion (Martinez-Valdes et al., 2018). Wichtig für die Analyse von EMG-Daten ist der Amplituden-Mittelwert (engl. mean) des korrigierten EMG-Signals. Er lässt Rückschlüsse auf den Anteil der aktivierten Muskelfasern an der Kontraktion des Muskels zu (Konrad, 2011). So deutet eine Zunahme der EMG-Amplitude während einer isometrischen Kontraktion auf die Rekrutierung bislang nicht aktivierter motorischer Einheiten hin (Taylor et al., 1997).

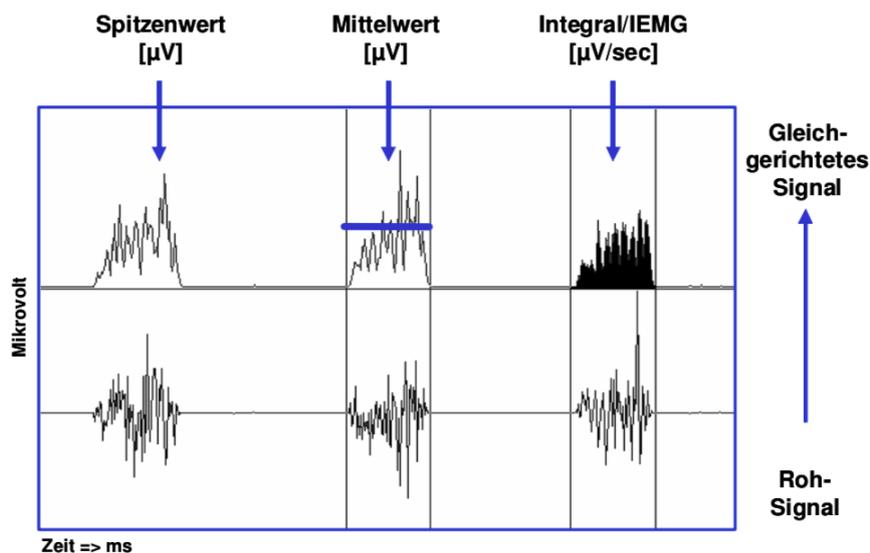


Abb. 10: Standard-Amplitudenparameter auf Grundlage des korrigierten EMG-Signals (Konrad, 2011).

1.6.3.1.2 Frequenz des EMG-Signals

Die Häufigkeit pro Sekunde, mit der APs die Muskelfasermembran erreichen und eine Kontraktion auslösen können, wird durch die Frequenz des EMG-Signals abgebildet (De Luca und Hostage, 2010).

Eine Frequenz-Analyse des EMG-Signals wird häufig benutzt um physiologische Phänomene, wie Ermüdung oder neuromuskuläre Pathologien zu beschreiben (Kamen und Caldwell, 1996).

Kommt es zu einer Ermüdung von Muskulatur, so werden vermehrt motorische Einheiten rekrutiert. Dies spiegelt sich im EMG in einer Amplitudensteigerung bei gleichzeitiger Abnahme der Frequenz wieder. Die Abnahme der Frequenz hängt u.a. mit einer verminderten Leitgeschwindigkeit der Muskelfasern für die MUAPs zusammen (Ebbecke, 2020).

1.6.3.2 Einflüsse und Störfaktoren des EMG-Signals

Das sEMG wird durch eine Vielzahl von Störfaktoren beeinflusst (Chowdhury et al., 2013). Die unterschiedlichen Störfaktoren, welche typischerweise eine Beeinflussung des Signals ergeben, sind in der folgenden Liste aufgeführt (Chowdhury et al., 2013; Konrad, 2011):

Externe Störfaktoren:

- Qualität der Messinstrumente: Das EMG-Signal kann bedeutend von der Verwendung geeigneter Hardware beeinflusst werden (Elektroden und Verstärker).
- Störspannung: Sollten sich elektronische Geräte mit hoher elektrischer Spannung ohne geeignete Erdung in näherer Umgebung befinden, kann dies zu Störspannungen im Untersuchungsumfeld führen, die Auswirkung auf das EMG-Signal haben können.

Interne Störfaktoren:

- Gewebeeigenschaften: Die unterschiedlichen Leitungseigenschaften der verschiedenen menschlichen Gewebe beeinflussen das EMG-Signal. Besonders Fettgewebe (Dicke und Anteil am Gewebe) kann einen Störfaktor darstellen. Deshalb ist bei mehreren Untersuchungszeitpunkten stets auf die gleiche Ableitstelle zu achten. Temperaturunterschiede wirken sich ebenfalls auf die Leitfähigkeit des Gewebes aus.
- Änderungen der Entfernung zwischen Elektroden und Muskel: Durch dynamische Muskelkontraktion entstehen Distanzveränderungen zwischen Elektroden und

Muskel, da dieser sich unter der Haut bewegt. Jede solche Bewegung verursacht Änderungen des EMG-Signals.

Externer Druck auf Haut oder Muskulatur kann ebenfalls die gleiche Art von Signalveränderung hervorrufen.

- „Cross-Talk“: Physiologischer „Cross-Talk“ ist das Einstrahlen der Aktivitätsmuster benachbarter Muskelgruppen in das abgeleitete EMG-Signal. Der Anteil an „Cross-Talk“ aus der Umgebungsmuskulatur liegt jedoch normalerweise nicht über 15 %. Das Einstrahlen von Herzmuskelaktivität in die EMG-Ableitung wird ebenfalls zum Cross-Talk gezählt.

1.6.3.3 Das Flexions-Relaxations-Phänomen

Das Flexions-Relaxations-Phänomen (FRP) ist ein gut bekanntes Phänomen, welches zuverlässig im EMG der meisten gesunden, rüschenschmerzfreien Personen auftritt (Neblett et al., 2013). Es bezieht sich auf das Muskelaktivitätsmuster, welches entsteht, wenn ein Proband eine Bewegungsabfolge z.B. bestehend aus entspanntem Stand gefolgt von Rumpfflexion zur maximalen Vorbeuge und zurück in den Stand vollführt. Initial kommt es zu einer Kontraktion der lumbalen Haltemuskulatur während der Flexion. Am Punkt der maximalen Flexion, im Sinne der maximal freiwilligen Vorbeuge (engl. maximum voluntary flexion, MVF) bei gestreckten Beinen, kommt es plötzlich zu einer Abnahme der Muskelaktivität des M. erector spinae bis hin zur völligen elektromyographischen Stille (Pouretzad et al., 2018). Dieses gelichtete Aktivitätsmuster entsteht, wenn andere passive anatomische Strukturen wie bspw. Bänder sowie die Beckenmuskulatur die Stabilisierungsfunktion des M. erector spinae übernehmen (Horn und Bishop, 2013). Floyd und Silver waren 1951 die Erstbeschreiber des Phänomens, welches seitdem stetig weiter erforscht wurde (Floyd und Silver, 1951). Klassischerweise ist das FRP in Patienten mit CLBP nicht zu finden ist (Ahern et al., 1988). Grund dafür scheint ein generell übersteigertes Aktivitätsniveau der lumbalen Muskulatur in CLBP Patienten zu sein (Ambroz et al., 2000).

Es gibt Hinweise darauf, dass eine erfolgreiche Therapie der Rückenschmerzen zu einer Normalisierung des vormals pathologischen Aktivitätsmusters im EMG führen kann. Eine

Schmerzreduktion kann zum Auftauchen eines vorher nicht vorhandenen Flexions-Relaxations-Phänomens führen (Mayer et al., 2009).

Um die Effekte verschiedener Therapien auf das FRP zu messen und zu quantifizieren, kann die Flexions-Relaxations-Ratio (FRR) verwandt werden (Watson et al., 1997).

Die FRR ist eine Ratio (Quotient) welche auf verschiedene Arten gebildet werden kann (Horn und Bishop, 2013). Hier findet die Ratio aus der Muskelaktivität während der maximalen Vorbeuge im Verhältnis zur Muskelaktivität während des entspannten Standes Anwendung. Es resultiert eine Zahl ohne Einheit.

1.7 Fragestellung

Im Rahmen der endoskopischen Facettengelenksthermokoagulation zur Behandlung von CLBP erfolgt der operative Zugang durch den M. multifidus auf Höhe der behandelten Segmente. Durch die Denervierung der, von den medialen Ästen der Rr. dorsales versorgten, Facettengelenke zwecks Schmerzbehandlung, ist auch die neuronale Versorgung des M. multifidus auf Segmenthöhe betroffen, welcher der wichtigste muskuläre Stabilisator der LWS ist.

Für diese prospektive Studie ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Wie verändert sich das EMG der Mm. multifidii der Probanden während einer dynamischen Bewegungsabfolge im postoperativen Verlauf nach endoskopischer Facettenthermokoagulation prozentual?
2. Welche Auswirkung auf das Flexions-Relaxations-Phänomen im EMG hat die Operation?
3. Welche Veränderungen der gesundheitspezifischen Lebensqualität der Patienten ergeben sich durch die OP?

2. Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Das vorliegende Studiendesign entspricht einer prospektiven klinischen Kohortenstudie mit einem Evidenzgrad Level IIa nach EbM-Kriterien (Sackett et al., 1996).

2.2 Patientenkollektiv

Das Patientenkollektiv wurde von insgesamt 40 Patienten gebildet, die in einem festgelegten Zeitraum über 15 Monate hinweg an der Universitätsklinik Bonn in der Abteilung für Orthopädie und Unfallchirurgie eine endoskopische Facettengelenksthermoagulation und Facettektomie erhalten haben. Nachdem sich die Patienten schriftlich zu einer Teilnahme an der Studie bereit erklärt hatten, wurden ihre personenbezogenen Daten mithilfe des Krankenhausinformationssystems ORBIS® abgerufen und Termine für die Untersuchungen geplant.

2.2.1 Studieneinschluss

Eingeschlossen in die Studie wurden alle Patienten, an denen im oben genannten Zeitraum in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des UKB indikationsgemäß eine endoskopische Facettengelenksthermoagulation und Facettektomie durchgeführt wurde. Der Operationsbereich umfasste die Facettengelenke L 3 / 4, L 4 / 5 und L 5 / S1.

2.2.2 Studienausschluss

Patienten, auf die ein im Studienplan festgelegtes Ausschlusskriterium zutraf, wurden von der Studie ausgeschlossen. Dieser umfasste die folgenden Kriterien:

- Patienten unter 18 Jahre
- Nicht einwilligungsfähige Patienten
- Erschwerte oder nicht mögliche Kommunikation mit dem Patienten
- Stillende, schwangere oder gebärfähige Patientinnen, die eine Schwangerschaft während der Teilnahme an der Studie planen
- Patienten mit systemischer neurologischer Erkrankung mit Einschränkung der Mobilität, z.B. fortgeschrittener M. Parkinson oder Multiple Sklerose
- Patienten mit Unverträglichkeiten oder bekannten Einschränkungen im Hinblick auf Untersuchungsmaterialien etc.
- Patienten mit Zustand nach Stabilisierungen durch Implantate der Wirbelsäule

2.3 Untersuchungsablauf und Beobachtungszeitraum

- t_0 : Baseline (Erstuntersuchung)
Die Eingangsuntersuchung des Patienten fand i.d.R. am Aufnahmetag, vor der geplanten Operation statt.
- t_1 : Entlassung
Am ersten oder zweiten postoperativen Tag fand die Entlassungsuntersuchung statt.
- t_2 : 6-Wochen-Follow-Up
Im Rahmen der wirbelsäulenorthopädischen Sprechstunde erfolgte 6 Wochen nach der Baseline-Untersuchung eine körperliche Nachuntersuchung sowie die Erfassung der studienspezifischen Inhalte.
- t_3 : 12-Wochen-Follow-Up
Ebenfalls im Rahmen der wirbelsäulenorthopädischen Sprechstunde erfolgte nach 12 Wochen eine zweite körperliche Nachuntersuchung und die erneute Erhebung der Studieninhalte.

- t₄: telefonisches Abschluss Follow-Up

Im Mittel 760 Tage nach der Baseline Untersuchung wurden die Patienten telefonisch zu den in der Studie erfassten Parametern befragt.

Tabelle 3 fasst die Erhebungstermine und jeweiligen Inhalte dieser zusammen.

Tab. 3: Übersicht über die Untersuchungszeitpunkte und ihre erhobenen Inhalte.

Untersuchungstermine	t ₀ : Baseline / prä-OP	t ₁ : post-OP / Entlas- sung	t ₂ : 6-Wo- chen- Follow- Up	t ₃ : 3-Mo- nats- Follow- Up	t ₄ : tel. Ab- schluss Follow- Up
Zeitraum (Tag)	0	1-6	40-50	90-100	Ø 760
Maßnahmen:					
Feststellung der Eignung zur Teilnahme an der Studie	X	-	-	-	-
Einholung Einwilligungserklärung	X	-	-	-	-
Dokumentation der Indikation	X	-	-	-	-
Demographische Daten	X	-	-	-	-
Messung NRS	X	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	-
Erhebung COMI	X	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾
Erhebung EQ5D	X	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾
Oberflächen EMG-Messung	X	X	X	X	-
Erfassung medikamentöse Schmerztherapie	X	X	X	X	X
Sozialmedizinische Anamnese	X	X	X	X	X
Erfassung von unerwünschten Ereignissen/Vorkomnissen	X<	X	X	X	X

¹⁾ Die Erhebung erfolgt vor der Durchführung von therapeutischen Maßnahmen.

Falls es von Seiten des Patienten frühzeitigen Bedarf einer Konsultation gab, erfolgte die Erhebung der Studieninhalte im Rahmen dieser und im Ermessen des betreuenden Arztes.

2.4 Methodik

2.4.1 sEMG Messung

2.4.1.1 Platzierung der Elektroden

Um die richtige Positionierung der Elektroden auf der Haut des Patienten zu finden, wurden am aufrecht stehenden Patienten die beiden Cristae iliaca durch den Untersucher palpirt. Eine horizontale Verbindung dieser Punkte lässt auf den Proc. spinosus des 4. LWK schließen (Schünke et al., 2014). Von hier wurde auf den Proc. spinosus des 5. LWK geschlossen. Mithilfe eines Lineals wurden im Abstand von 2 cm lateral des Proc. spinosus LWK 5 jeweils 2 Punkte auf der Haut markiert. Von diesen Punkten aus wurden die Elektroden jeweils 2 cm nach cranial und caudal platziert (s. Abb. 11).

Um optimale Leitungsbedingungen zu erzielen wurde etwaige Rückenbehaarung rasiert und die Stelle mit einer 70 %-igen Polyalkohollösung gesäubert und entfettet. Die verwendeten Elektroden waren selbstklebende EKG-Elektroden-Pads der Firma Covidien / Kendall®.

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen die Projektion der Elektroden auf die Rückenmuskulatur und den Sitz auf der Haut.

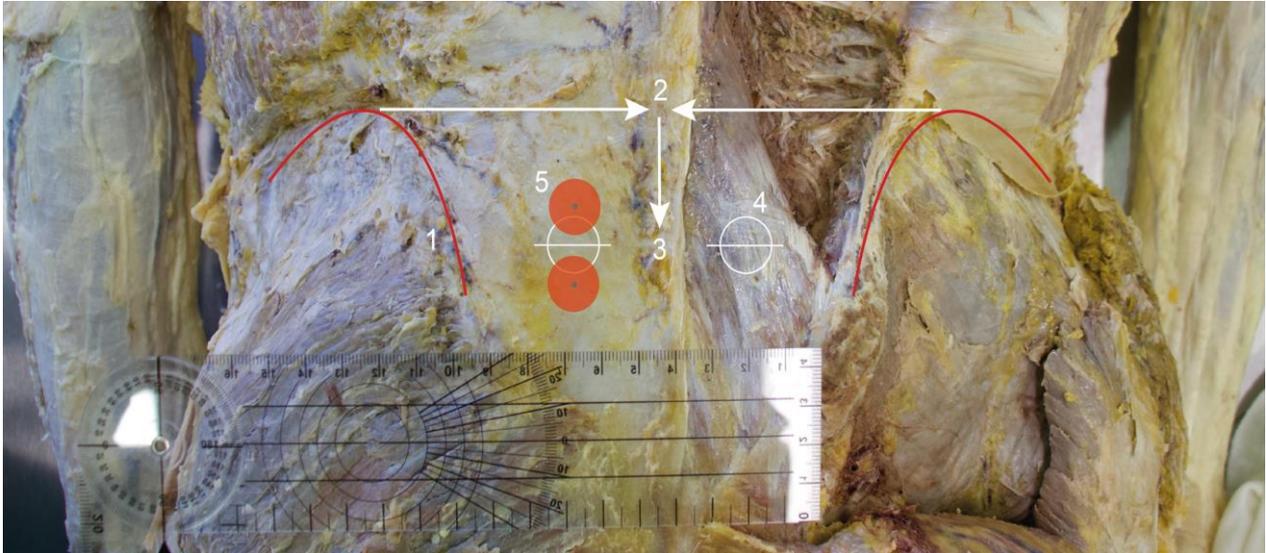


Abb. 11: Projektion der Oberflächenelektroden auf die anatomische Präparation des M. multifidus der LWS: (1) Crista iliaca, (2) Proc. spinosus LWK 4, (3) Proc. spinosus LWK 5, (4) Markierung des M. multifidus durch den Untersucher, (5) Projektion der Oberflächenelektroden, links (Schliwa und Weber, 2018).

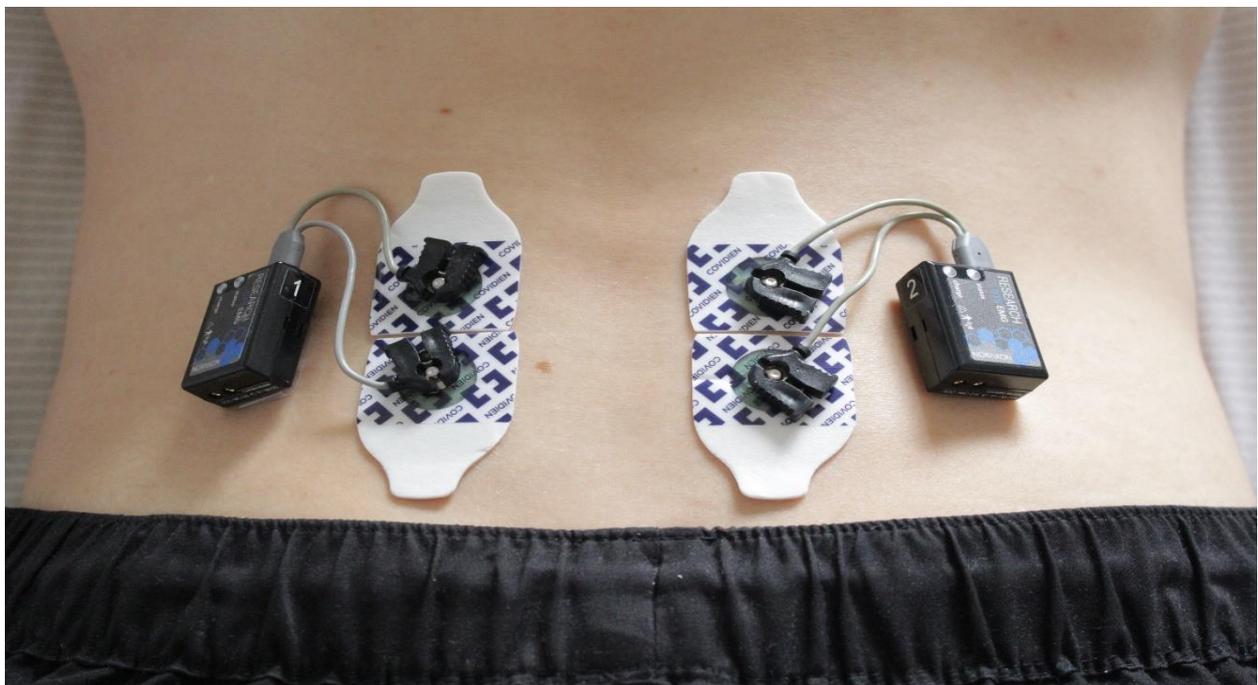


Abb. 12: Platzierung der Oberflächenelektroden am Probanden über den Mm. multifidii und angeschlossene Wireless-EMG-Sensoren.

Die elektromyographischen Signale wurden mit zwei Wireless-Sensoren der Firma Noraxon Inc. USA (Arizona, USA) aufgezeichnet.

Während der Messung wurden die Signale der Sensoren mithilfe eines Telemetriesystems (Mini DTS, Noraxon Inc. USA) kontinuierlich übertragen und durch die Software MyoResearch 3 (Noraxon Inc. USA) aufgezeichnet und verarbeitet.

2.4.1.1.1 Postoperative Platzierung der Elektroden

Postoperativ (t_1) wurde auf die gleiche Platzierung der Elektroden geachtet. Im Falle einer Überlappung mit den frischen OP Wunden, wurden die Klebeflächen der Elektroden angepasst, sodass eine möglichst identische Positionierung zur t_0 Messung erreicht werden konnte.

2.4.1.2 Versuchsaufbau

Die elektromyographische Untersuchung umfasste drei unterschiedliche Schritte:

1. Maximale willkürliche Kontraktion
2. Submaximale Kontraktion über 30 Sekunden
3. Dynamische Bewegungsabfolge zur Messung der Flexions-Relaxations-Ratio

Die Ergebnisse dieser Arbeit beziehen sich ausschließlich auf die dynamische Bewegungsabfolge zur Untersuchung der FRR.

Bei der Flexions-Relaxations-Messung wurde der Patient gebeten die im Folgenden beschriebene dynamische Bewegungsabfolge durchzuführen. Jeder Schritt wurde dabei vom Untersucher angesagt. Beginnend im aufrechten, entspannten Stand, beugte der Patient sich nach Aufforderung mit gestreckten Beinen nach vorne. Nach Erreichen der MVF verharrte der Patient ca. 5 Sekunden in dieser Position. Nachfolgend richtete er sich ohne Zuhilfenahme der Arme wieder auf, bis zum erneuten Erreichen des entspannten

aufrechten Stands. Die dynamische Bewegungsabfolge wurde jeweils zweimalig unmittelbar hintereinander durchgeführt. Ventralflexion und darauffolgende Dorsalextension erfolgten jeweils ohne Hilfsmittel. Beide Durchläufe wurden kontinuierlich elektromyo- und videographisch aufgezeichnet.

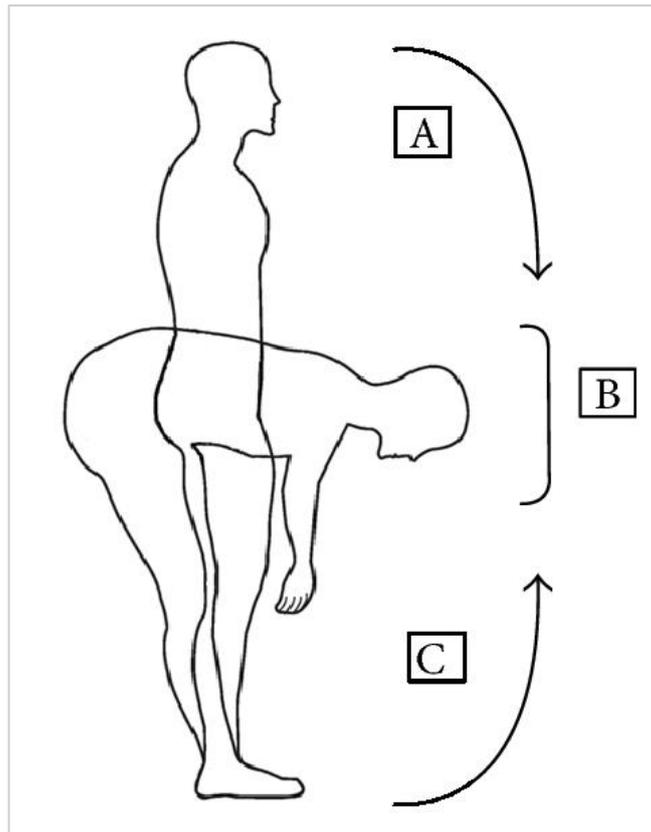


Abb. 13: Schematische Darstellung des Bewegungsablaufs während der Flexions-Relaxations-Messung. A: Vorbeugen, Flexion. B: MVF. C: Wiederaufrichten (Horn und Bishop, 2013).



Abb. 14: Beispielproband in Ausgangsposition der Flexions-Relaxations-Messung mit befestigten EMG-Elektroden. Aufrechter, entspannter Stand.



Abb. 15: MVF demonstriert vom Beispielprobanden mit befestigten EMG-Elektroden.

Die jeweiligen Aufzeichnungen der EMG-Signale und dazugehörigen Untersuchungsvidéos wurden innerhalb der Software in einer internen Datenbank (Database) gespeichert und wie folgt benannt:

- „präOP“
- „postOP“
- „6W FU“
- „12W FU“

Die Untersuchungszeitpunkte entsprechen hierbei t_0 , t_1 , t_2 und t_3 .

2.4.1.3 Erhobene Daten über Fragebögen

Die Erhebung der Fragebögen wurde mittels Tablet-Computern (Tablets) durchgeführt, auf denen eine eigens hierfür programmierte App der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des UKB installiert war. Alle erfassten Daten wurden auf einen lokalen Server der UK-IT übertragen, sodass sie nur innerhalb des Universitätsklinikums abrufbar waren. Um die personenbezogenen Daten (Name, Geschlecht, Geburtsdatum, Einwilligungserklärung und UKB Patienten-ID) pseudonymisiert auszuwerten zu können, wurden sie in einer verschlüsselten Form gespeichert und eine Pseudonymisierungs-ID erzeugt.

Die Erhebung der Daten bei der Erstuntersuchung beinhaltete eine detaillierte demografische und sozialmedizinische Anamnese. Es wurden neben Geschlecht, Alter, Körpergröße und Körpergewicht auch Vorerkrankungen, Allergien und Medikation abgefragt. Außerdem wurden folgende bereits vom Patienten ergriffene spezifische Therapiemaßnahmen zur Behandlung von CLBP erfasst:

- Schmerzmedikation
- Einspritzungen im Schmerzgebiet
- Akupunktur
- Elektrotherapie / TENS
- Physiotherapie
- Rückenschule / medizinisches Training
- Massage / Wärmetherapie

Des Weiteren wurden Scores erhoben um die Wirksamkeit der endoskopischen Facetengelenkstermokoagulation als operative Intervention bei Patienten mit CLBP zu ermitteln. Hierbei wurde eine Selbsteinschätzung des Patienten erfragt. Die Numerische Ratingskala (NRS), der Core Outcome Measure Index (COMI) und der EQ-5D wurden erfasst.

2.4.1.3.1 Numerische Ratingskala

Die Numerische Ratingskala (NRS) ist eine lineare Skala ohne Maßeinheit (Johnson, 2005). Hier wurde sie als Instrument genutzt um die Schmerzintensität des Patienten im Rücken, sowie im Gesäß / Bein zu objektivieren. Das linke Ende der Skala wird durch eine 0 gebildet, das rechte durch eine 10. Der Wert Null entspricht keinem Schmerz, während der Wert 10 den stärksten möglichen Schmerz beschreibt (Hawker et al., 2011). Außerdem wird der Gesamtgesundheitszustand der Patienten erfasst. Hierbei wurde eine veränderte Form der NRS verwandt. Die Skalierung ging von 0 % als schlechtesten Gesundheitszustand bis 100 % als vollkommen gesund, wobei der Patient entsprechend seiner persönlichen Einschätzung einen Punkt auf dem Tablet antippen sollte.

2.4.1.3.2 Core Outcome Measure Index (COMI)

Der COMI ist ein multidimensionaler Index, der den rüschmerzspezifischen Gesundheitszustand der Patienten erfragt. Er beinhaltet jeweils eine Frage zu den folgenden Kriterien (Mannion et al., 2016):

- Schmerzintensität bezogen auf den Rücken
- Schmerzintensität bezogen auf das Gesäß / Bein
- Beeinträchtigung der Arbeitsfähigkeit
- Beeinträchtigung der sozialen Interaktion
- Zufriedenheit bezogen auf die Rückenbeschwerden
- Lebensqualität insgesamt

Aus den Antworten der Patienten wurde ein Index errechnet, welcher zwischen 0 (keine Einschränkungen durch die Rückenbeschwerden) und 10 (maximale Einschränkung durch die Rückenbeschwerden) liegt.

Die Berechnung erfolgt anhand festgelegter Punktwerte, die für die einzelnen Antworten der Patienten vergeben werden und dann mittels einer von Pochon et al. entwickelten Formel zu einem Gesamtwert verrechnet werden (Pochon et al., 2016).

2.4.1.3.3 EQ-5D

Der EQ-5D ist ein von der EuroQol Research Foundation entwickelter 5-dimensionaler Fragebogen, welcher regelmäßig validiert wird (EuroQol Research Foundation, 2021).

Der Fragebogen zielt auf die Erfassung der präferenzbasierten gesundheitspezifischen Lebensqualität ab. Es werden die 5 Bereiche „Beweglichkeit / Mobilität“, „Selbstversorgung“, „Alltägliche Tätigkeiten“, „Schmerz / körperliche Beschwerden“ und „Angst / Depression“ abgedeckt. Aus den Antworten des Patienten lässt sich ein Index errechnen.

Hier wurde der EQ-5D-3L verwandt, welcher jeweils drei Antwortoptionen pro Frage zur Auswahl stellt. Je nach gegebener Antwort ergeben sich Zahlenreihenfolgen, welche validierten Indexwerten entsprechen. Der Auswertungsalgorithmus der Fragebögen ist urheberrechtlich geschützt.

Die Studie wurde bei der EuroQol Research Group registriert und die Erlaubnis zur Nutzung der Fragebögen samt Auswertung erteilt (Registration ID: 37784).

Die Fragen werden durch eine visuelle Analogskala ergänzt, auf welcher der Patient seinen Gesamtgesundheitszustand anzeigen soll. Hieraus ergibt sich ein globaler Indexwert für die präferenzbasierte Bewertung des Gesundheitszustands des Patienten (König HH et al., 2005).

2.5 Einverständniserklärung und Versicherung

Für die Durchführung der Studie sind zwei Einverständniserklärungen eingeholt worden. Eine zur Teilnahme an den Messungen und eine weitere zur Erhebung und Speicherung

der Daten mittels App. Deshalb konnten die Daten in pseudonymisierter Form ausgewertet und veröffentlicht werden.

Für die Nutzung der Abbildungen 12, 14 und 15 wurde ebenfalls eine Einverständniserklärung des Beispielprobanden eingeholt.

Alle eingesetzten Materialien waren bereits auf dem Markt eingeführte, CE-gekennzeichnete Medizinprodukte, sodass eine generelle Produkt-Haftpflichtversicherung bestand. Diese deckt Schadensfälle der Patienten durch die eingesetzten Produkte ab.

2.6 Ethikvotum

Vor Durchführung der Studie wurde bei der zuständigen Ethikkommission ein Ethikvotum (316/16) durchgeführt. Außerdem wurde die Studie nach der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

2.7 Datenauswertung

Die elektromyographischen Daten des Flexions-Relaxations-Phänomens der Untersuchungszeitpunkte t_0 bis t_3 (s. 2.4.1.2) sowie die durch Fragebögen erhobenen Scores zur gesundheitsspezifischen Lebensqualität der Patienten COMI und EQ-5D zu den Untersuchungszeitpunkten t_0 bis t_4 wurden mithilfe der Programme Microsoft Excel 2013 (Microsoft®, WA, USA) und IBM Statistics SPSS® 27 (IBM® Corp., NY, USA) statistisch ausgewertet (s. 2.4.1.3).

2.7.1 Auswertung der Oberflächen Elektromyographie

Mithilfe der Software MyoResearch 3 (Noraxon Inc., AZ, USA) wurden die aufgezeichneten EMG-Signale zunächst auf einstrahlende EKG-Signale untersucht. Dazu wurden die Untersuchungsdurchläufe aus der Datenbank („Database“) abgerufen und die Roh-EMG

Signale vom Untersucher überprüft. Im Falle von vorhandenen EKG-Signalen wurden diese mittels der Software herausgefiltert.

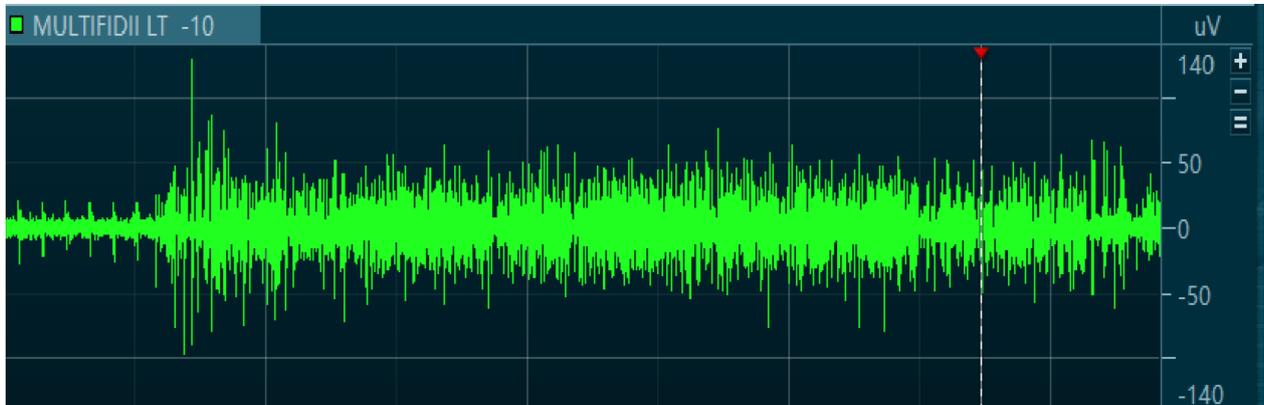


Abb. 16: Roh-EMG-Aufzeichnung mit EKG-Störspitzen im Ruhezustand (rote Klammer) (Weber 2020).

2.7.1.1 Auswertung des Flexions-Relaxation-Phänomens

Um die EMG-Messungen auszuwerten, wurde das Roh-Signal durch die Software in ein RMS-EMG-Signal (Root Mean Square) umgewandelt. Diese Form der Glättung basiert auf der mathematischen Quadrierung der Wurzel und gibt damit die mittlere Leistung des Roh-EMGs wieder. Der Glättungsalgorithmus mittels RMS ist nach aktueller Studienlage Standard (Konrad, 2011). Das geglättete EMG-Signal wurde anschließend unter visueller Kontrolle der gleichzeitig aufgezeichneten Videodateien jeweils an den Stellen markiert, an welchen der Proband sich im aufrechtsten Stand und in der maximalen Vorbeuge befand. Auf die digital gesetzten Marker folgend wurde ein Analysezeitraum von zwei Sekunden bestimmt, für welchen die Software einen Report erstellte (Abb. 18). Die im Report dargestellten Mittelwerte der Amplituden des rechten und linken M. multifidus in Mikrovolt (μV) im Stand (Relaxation) und maximaler Vorbeuge (MVF) für den festgelegten Analysezeitraum wurden in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2013 für Windows (Microsoft®, WA, USA) übertragen.



Abb. 17: Beispielhafter Screenshot der RMS-EMG-Signale während der Flexions-Relaxations-Messung. Grün: Amplitude linker M. multifidus. Rot: Amplitude rechter M. multifidus. Lila Pfeile: digitale Marker zu Beginn des Analysezeitraums.



Abb. 18: Beispielhafter Noraxon EMG-Analyse-Report der Flexions-Relaxation-Messung aus MyoResearch 3. Rote Umrandung: Für statistische Auswertung übernommene Werte

Mithilfe von Excel 2013 wurde, jeweils für den linken und rechten M. multifidus gesondert, die Flexions-Relaxations-Ratio (FRR) errechnet, indem der Mittelwert der Amplitude im Stand durch den Mittelwert der Amplitude der MVF geteilt wurde. Als Quotient hat die FFR keine Einheit.

Diverse Studien konnten belegen, dass die reflektorische Relaxation und damit das Absinken der Amplitude in der maximalen Vorbeuge bei Patienten mit chronischen Rückenschmerzen aufgehoben ist. Das Aktivitätsniveau während des Standes ist hiervon jedoch nicht betroffen (Gouteron et al., 2022).

Bei einem Patienten mit chronischen Rückenschmerzen werden sich im EMG daher ähnlich hohe Amplituden im Stand, aber deutlich gesteigerte Amplituden in der maximalen Vorbeuge messen lassen.

Im gesunden Patienten bedeutet dies, dass man eine Amplitude x während des Standes durch eine Amplitude y während der Vorbeuge teilt. Es ergibt sich der Quotient $\frac{x}{y}$.

Im Patienten mit chronischen Rückenschmerzen wird ebenfalls die Amplitude x während des Standes durch die Amplitude während der Vorbeuge geteilt. Diese beträgt jedoch aufgrund des reflektorisch gesteigerten Aktivitätsniveaus bspw. $2y$. Es ergibt sich folglich der Quotient $\frac{x}{2y}$, welcher kleiner ist als im gesunden Patientenkollektiv.

Es lässt sich im Folgenden ableiten, dass eine kleinere FRR für ein insgesamt kränkeres Patientenkollektiv spricht.

Je größer der Quotient im Verlauf der Studie wird, desto mehr normalisiert er sich. Es kann davon ausgegangen werden, dass das gemessene Aktivitätsmuster sich an das eines Rückengesunden Patienten annähert.

In dieser Studie wurden die Ergebnisse der FRR an den unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten miteinander verglichen um eine Entwicklung des Quotienten in einem Patienten zu zeigen.

2.7.2 Auswertung der Fragebogen gestützten Scores COMI und EQ-5D

Die per App erfassten Scores der Untersuchungszeitpunkte t_0 bis t_3 wurden der Datenbank (s. 2.4.1.2) entnommen und ebenfalls in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel 2013 für Windows (Microsoft®, WA, USA) übertragen. Die Angaben der Patienten, welche

abschließend am Zeitpunkt t_4 telefonisch erhoben wurden, wurden direkt während des Telefonats entsprechend ihrer Codierung (Zahlenwerte entsprechen Antwortmöglichkeiten der Fragebögen) in Excel notiert und die Scores danach errechnet.

2.7.3 Statistische Auswertung der Daten

Die statistische Datenauswertung wurde mithilfe des Programmes SPSS® Statistics 27 (IBM® Corp., NY, USA) durchgeführt. Hierzu wurde die vorher in Microsoft Excel erstellte Tabelle mit allen erhobenen Daten in SPSS® Statistics 27 importiert. In einem ersten Schritt wurden die Daten auf ihre Normalverteilung hin überprüft. Hierfür wurde sowohl grafisch mittels Histogramm als auch Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung getestet. Für die nicht normalverteilten Daten wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben als nicht parametrischer Test durchgeführt. Das Signifikanzniveau betrug $p < 0,05$ (95 %-iges Konfidenzintervall). Die Analyse der Untersuchungszeitpunkte t_1 bis t_3 wurde jeweils auf die Baseline t_0 bezogen. Außerdem wurde ein direkter Vergleich zwischen linker und rechter Seite des M. multifidus, sowohl in Bezug auf die EMG-Amplitude, als auch auf die FFR erhoben. Eine deskriptive Statistik der Studienpopulation wurde ebenfalls erhoben.

3. Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

Insgesamt wurden 40 Patienten prospektiv in die Studie eingeschlossen, die alle am UKB im festgelegten Studienzeitraum mit einer endoskopischen Facettengelenksthermokoagulation behandelt wurden. Ausgewertet wurden insgesamt 36 Patienten, da 4 Patienten den Wunsch hatten aus der Studie auszutreten. Nicht bei allen Patienten konnten alle Untersuchungstermine und der abschließende Fragebogen durchgeführt werden, sodass die Anzahl der Auswertungen zu den verschiedenen Zeitpunkten variiert. Um eine Vergleichbarkeit zu erzielen, wurden nur Patienten ausgewertet, die an mindestens zwei Zeitpunkten entweder eine EMG-Messung erhalten oder einen Fragebogen beantwortet haben.

Es ergibt sich ein Gesamtkollektiv von 34 ausgewerteten Patienten. Die jeweils ausgewertete Anzahl an Patienten, die an den EMG-Messungen teilgenommen oder die Fragebögen ausgefüllt hat, wird in den betreffenden Kapiteln separat ausgewiesen.

3.1.1 Demografische Daten des Gesamtkollektivs

In dem Patientenkollektiv von 34 Personen besteht eine Geschlechterverteilung von 15 (44,2 %) männlichen und 19 (55,8 %) weiblichen Probanden. Das mittlere Alter der Patienten lag bei $63,7 \pm 11,8$ Jahren. Außerdem waren sie im Durchschnitt $169,1 \pm 10,2$ cm groß und $83,4 \pm 19,8$ kg schwer. Hieraus ergibt sich ein Body-Mass-Index (BMI) von $28,9 \pm 4,9$ kg/m² für das Patientenkollektiv.

Tab. 4: Mittelwerte mit Standardabweichung der demografischen Daten des Gesamtkollektivs.

Geschlecht		Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg / m ²]
männlich	weiblich				
15	19	$63,7 \pm 11,8$	$169,1 \pm 10,2$	$83,4 \pm 19,8$	$28,9 \pm 4,9$

3.2 Allgemeine Anamnese präoperativ

Von den 34 Personen waren 16 (47 %) zum Zeitpunkt der Baseline-Untersuchung t_0 Rentner, zwei (6 %) gaben an Hausfrau/ -mann zu sein.

Bezüglich Vorerkrankungen, die das muskuloskeletale System betreffen, gaben 5 (15 %) Patientinnen an eine Osteoporose zu haben. Drei Patientinnen (9 %) gaben Rheumatoide Arthritis als Grunderkrankung an und insgesamt 5 (15 %) Patienten hatten eine positive Sturzanamnese. Vier (12 %) der 34 Patienten gaben außerdem an, an einer Depression zu leiden, oder in ihrem Leben bereits mindestens eine depressive Episode durchlebt zu haben.

3.2.1 Spezifische Schmerzanamnese präoperativ

Die spezifische präoperative Schmerzanamnese wurde zusammen mit der allgemeinen Anamnese im Rahmen der Einschlussuntersuchung erfasst, sodass sie von allen 34 Patienten des ausgewerteten Kollektivs beantwortet wurde.

Der überwiegende Anteil von 30 der 34 Patienten (88 %) gab eine vornehmliche Schmerzlokalisation im Bereich der Lendenwirbelsäule an, lediglich ein Patient (3 %) des Kollektivs berichtete über Schmerzen in der Brustwirbelsäule. Diese Schmerzen dauerten bei 28 der Patienten (82 %) zum Zeitpunkt t_0 bereits über ein Jahr an. Zwei Patienten (6 %) berichteten über eine kürzere Schmerzdauer von insgesamt 6 bis 12 Monaten und nur ein Patient (3 %) gab für seine Schmerzanamnese eine Dauer von 6 Wochen bis 6 Monaten an. 24 Patienten (71 %) wurden am stärksten durch ihre Beschwerden im Rücken belastet und 7 Patienten (21 %) gaben an, dass die Belastung durch ins Bein einstrahlende Schmerzen am stärksten sei. 3 der Patienten (9 %) gaben Missempfindungen und Kribbelparästhesien als die am belastendsten wahrgenommenen Beschwerden an.

Zum Untersuchungszeitpunkt t_0 gaben außerdem 29 der 34 Patienten (85 %) an, dass sie regelmäßig Schmerzmedikamente einnahmen. Die restlichen 5 Patienten (15 %) nahmen keine.

Alle Patienten gaben an, bereits andere Therapieoptionen für ihre Rückenschmerzen ausprobiert zu haben. 31 (91 %) hatten eine positive Anamnese für Einspritzungen im

Schmerzgebiet, 15 (44 %) für Akupunktur, 24 (70 %) für Physiotherapie, 22 (65 %) für medizinisches Training bzw. Rückenschule, 25 (74 %) für Massagen und Wärmetherapie und 16 (47 %) für Elektrotherapie / TENS.

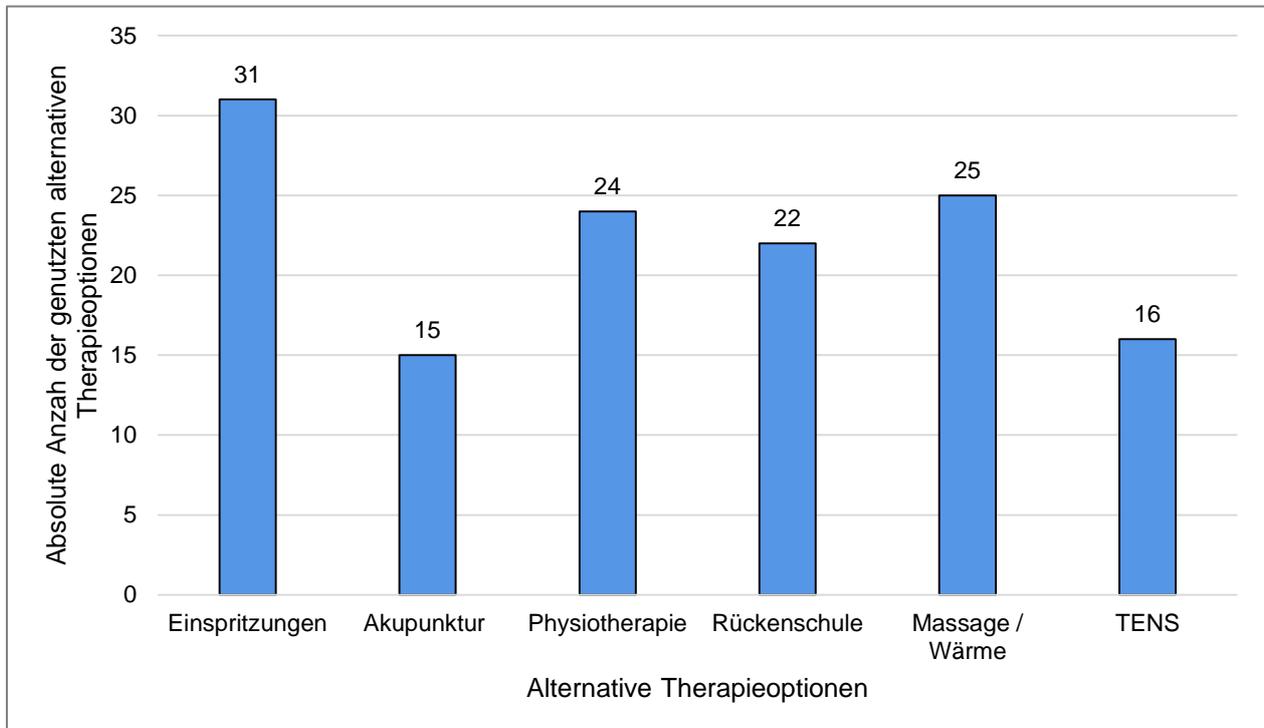


Abb. 19: Übersicht über die Anzahl der genutzten alternativen Therapieoptionen des Patientenkollektivs.

3.3 Anzahl der erfassten Fragebögen an den Untersuchungszeitpunkten

Die Anzahl der erfassten Fragebögen variiert im Laufe der Studie. In die Auswertung aufgenommen wurden alle Patienten, die mindestens an zwei Untersuchungszeitpunkten Fragebögen beantwortet hatten.

Hieraus ergibt sich die folgende Anzahl ausgewerteter Fragebögen über die Untersuchungszeitpunkte:

- t₀: 33 ausgewertete Fragebögen (100 %)
- t₁: 27 ausgewertete Fragebögen (81,8 %)
- t₂: 9 ausgewertete Fragebögen (27,3 %)
- t₃: 16 ausgewertete Fragebögen (48,5 %)
- t₄: 21 ausgewertete Fragebögen (60,6 %)

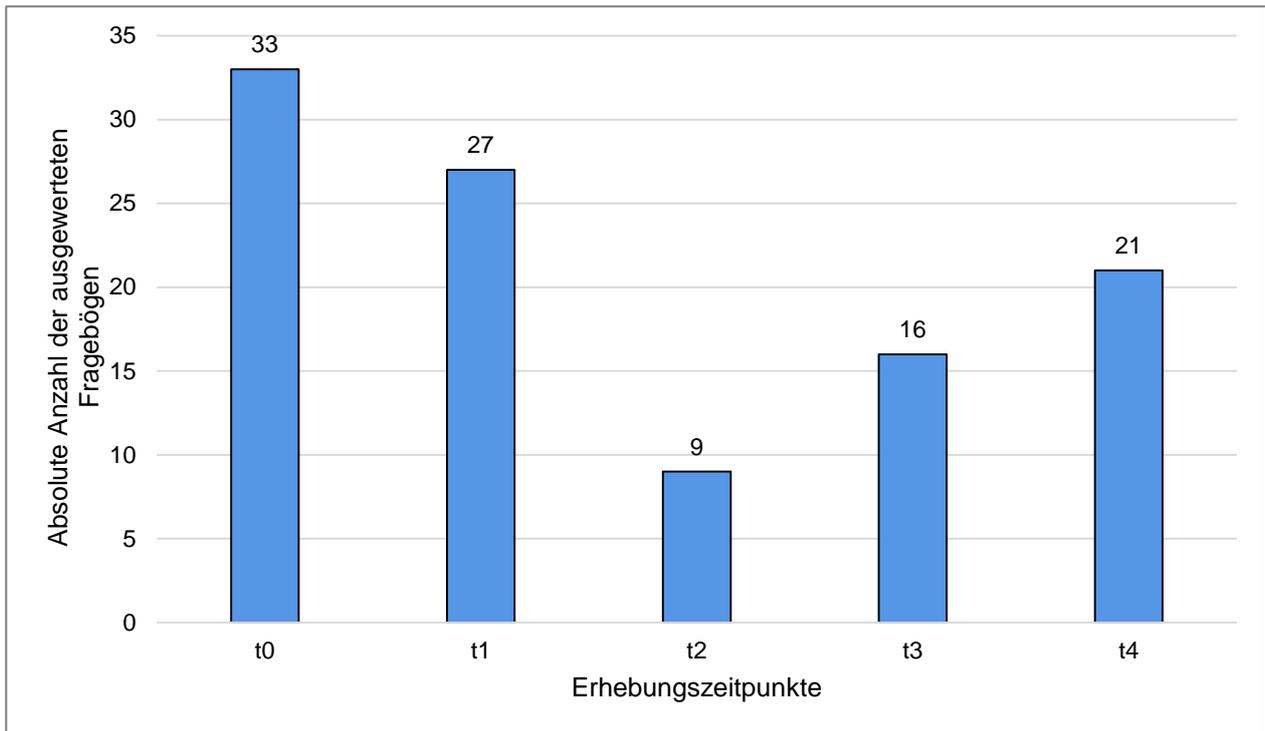


Abb. 20: Absolute Anzahl der ausgewerteten Fragebögen t_0 bis t_4 .

3.4 Numerische Rangskala (NRS)

3.4.1 NRS Rücken

Die Auswertung der NRS Rücken ergab eine signifikante Abnahme der Schmerzintensität während des Studienzeitraums.

Zu Beginn der Studie (t_0) lag der Median der NRS Rücken bei 8. Am postoperativen Tag (t_1) nahm der Median signifikant auf 7 ($p = 0,048$) ab. Während der beiden Follow-Up Termine t_2 (Median 7, $p = 0,031$) und t_3 (Median 6, $p = 0,001$) konnte ebenfalls eine signifikante Abnahme der von den Patienten angegebenen Schmerzintensität im Vergleich zu t_0 festgestellt werden.

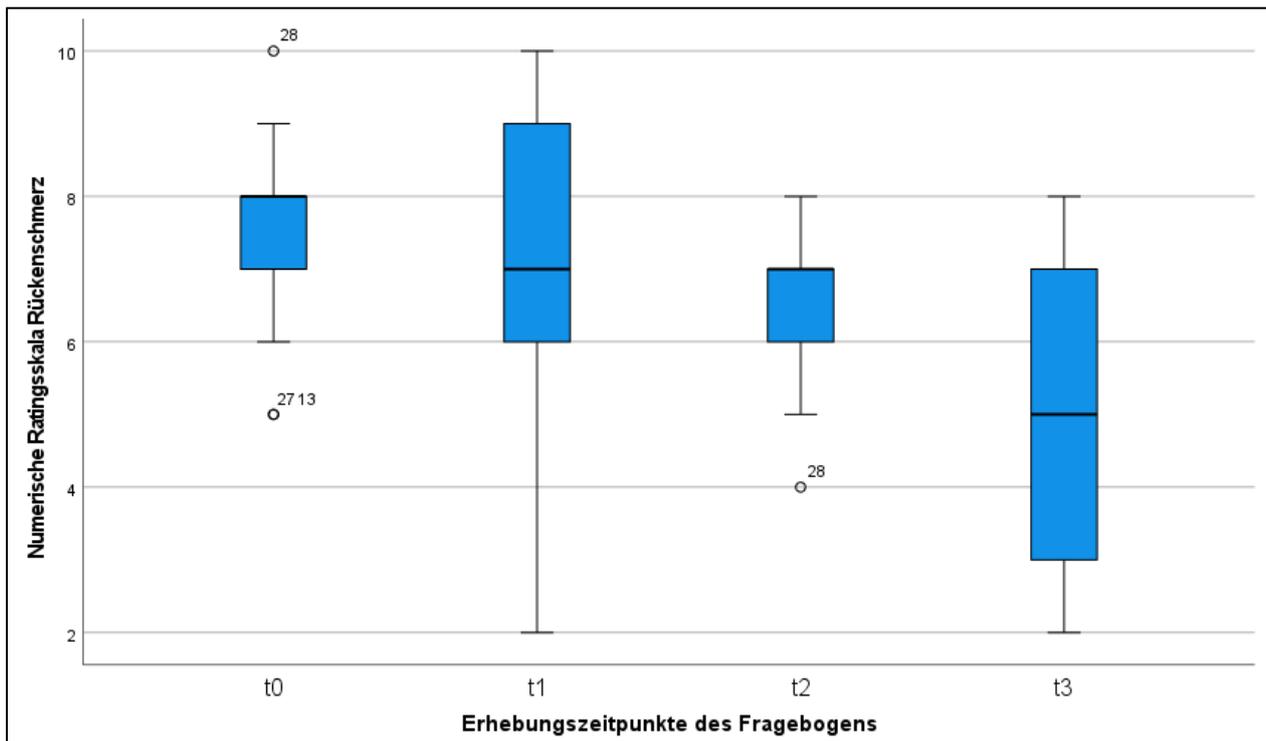


Abb. 21: Box-Whisker-Plots der NRS des Rückens für die unterschiedlichen Erhebungszeitpunkte.

3.4.2 NRS Bein

Bei der Auswertung der NRS Bein ergab sich ebenfalls eine signifikante Abnahme der Schmerzintensität.

Der während der Baseline Untersuchung erhobene Median lag bei 7. Zum postoperativen Tag ergab sich keine signifikante Veränderung (Median = 7, $p = 0,917$). Im Verlauf sinkt der Median auf 6 ab (t_2 , $p = 0,943$), allerdings konnte erst zum letzten Untersuchungszeitpunkt t_3 eine signifikante Abnahme der Schmerzintensität gezeigt werden (Median 5, $p = 0,036$).

3.5 Scores zur gesundheitsspezifischen Lebensqualität: EQ-5D und COMI

Die Scores zur gesundheitsspezifischen Lebensqualität EQ-5D und COMI wurden zusätzlich zu den Untersuchungszeitpunkten t_0 bis t_3 ebenfalls im Rahmen eines Telefoninterviews durchschnittlich 2 Jahre nach der Operation erhoben. Hieraus ergibt sich im Vergleich zu den oben beschriebenen NRS Ergebnissen ein weiterer Zeitpunkt t_4 .

3.5.1 EQ-5D

Für den gesundheitsspezifischen Lebensqualitätsscore EQ-5D kann eine signifikante Verbesserung von t_0 zu t_1 und t_0 zu t_3 und t_4 gezeigt werden.

Zum Untersuchungszeitpunkt t_0 lag der Median, des mithilfe der Fragebögen ermittelten EQ-5D bei 0,701. Dieser stieg am postoperativen Tag im Vergleich zu t_0 signifikant an und lag an t_1 bei 0,788 ($p = 0,023$). Während des nächsten Untersuchungstermins t_2 blieb der Median konstant bei 0,788, ($p = 0,223$: keine Signifikanz bei unterschiedlicher Teilnehmeranzahl). Erst an t_3 ergibt sich erneut eine signifikante Zunahme der durch den EQ-5D abgebildeten Lebensqualität der Patienten (Median 0,7995, $p = 0,023$). Zum Abschluss der Studie (t_4) lag der nun telefonisch erhobene Median des EQ-5D bei 0,788, sodass weiterhin eine signifikante Steigerung zum Ausgangswert gezeigt werden konnte ($p = 0,011$).

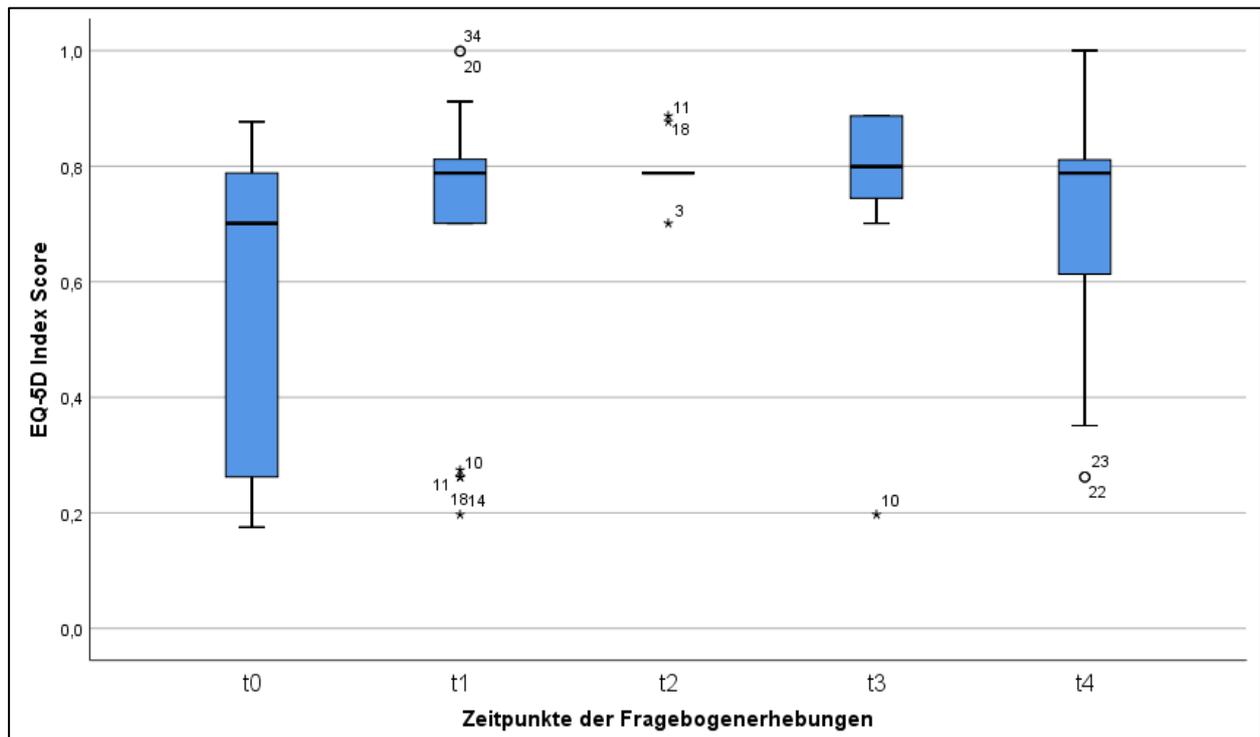


Abb. 22: Box-Whisker-Plots der EQ-5D Index Scores für die unterschiedlichen Erhebungszeitpunkte.

3.5.2 COMI

Für den COMI kann ebenfalls eine signifikante Verbesserung von t_0 zu t_1 , zu t_3 und zu t_4 erhoben werden.

Der COMI hat zum Zeitpunkt t_0 einen Median von 8. Dieser sinkt am postoperativen Untersuchungszeitpunkt t_1 signifikant auf 6,92 ($p = 0,026$). Beim nächsten Untersuchungstermin t_2 steigt er wieder minimal auf 7 an ($p = 0,066$). An t_3 kann jedoch erneut ein signifikanter Abfall des Medians auf 4,665 ($p = 0,001$) gezeigt werden.

Nach durchschnittlich 760 Tagen wurden im Rahmen einer telefonischen Befragung erneut COMI Scores ermittelt. Hierbei ergab sich ein Median von 5,1 ($p = 0,001$) und damit ebenfalls eine signifikante Verbesserung des Scores im Vergleich zum Ausgangswert.

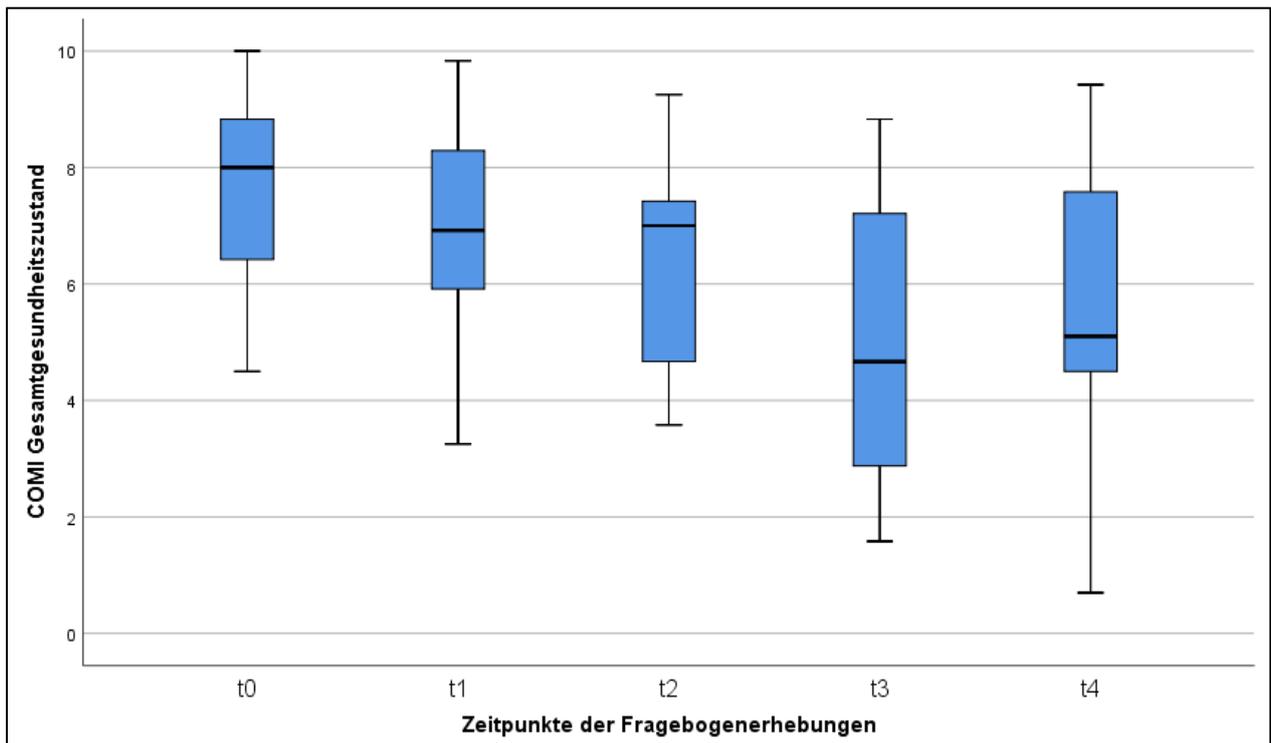


Abb. 23: Box-Whisker-Plots der COMI Scores des Gesamtgesundheitszustandes der Patienten an den Zeitpunkten der Fragebogenerhebungen.

3.6 EMG-Messungen

Bei insgesamt 23 Patienten konnten EMG-Messungen des Flexions-Relaxations-Phänomens ausgewertet werden, da sie an mindestens 2 EMG-Messungen teilgenommen hatten. Auf die einzelnen Untersuchungszeitpunkte entfallen dabei die folgenden Patientenzahlen:

- t₀: 23 Patienten gemessen (100 %)
- t₁: 17 Patienten gemessen (73,9 %)
- t₂: 9 Patienten gemessen (39,1 %)
- t₃: 10 Patienten gemessen (43,4 %)

Lediglich 2 Patienten (8,7 %) nahmen an allen 4 Untersuchungszeitpunkten an einer EMG-Messung teil.

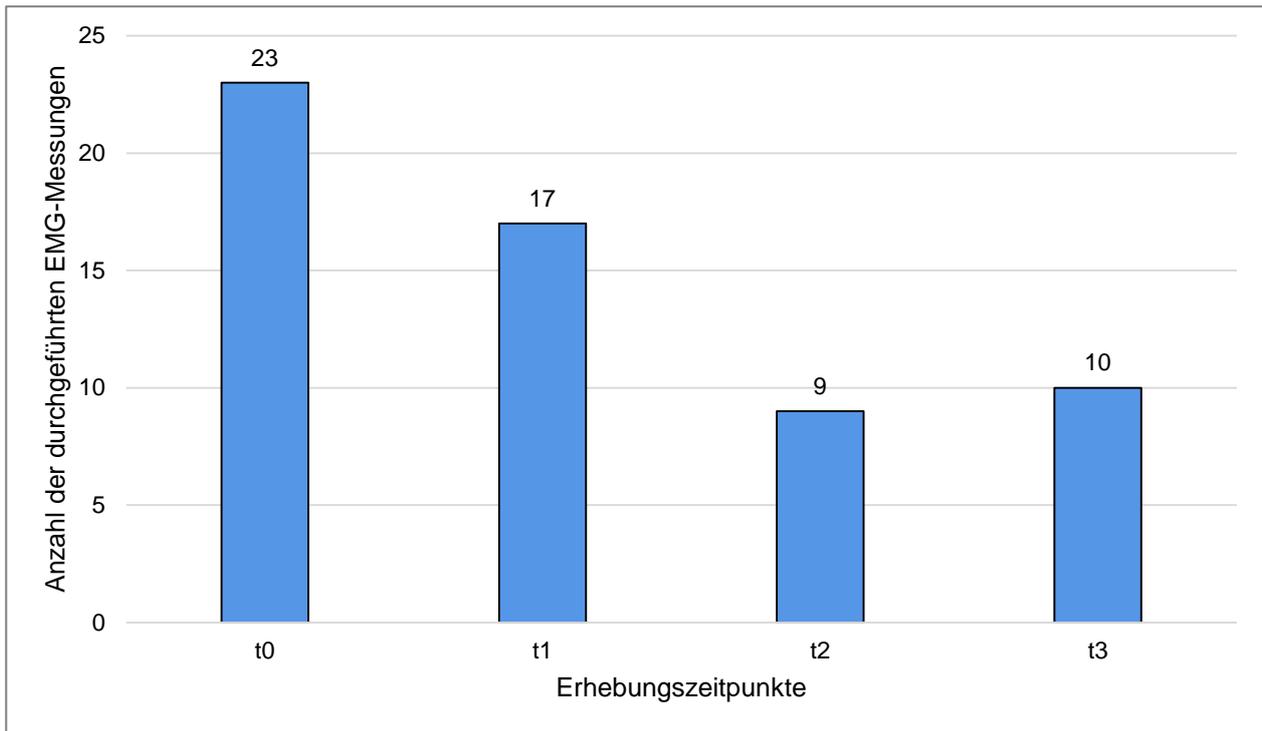


Abb. 24: Absolute Zahlen der durchgeführten EMG-Messungen t_0 bis t_3 .

3.6.1 Amplitudenanalyse der M. multifidii

3.6.1.1 M. multifidus links

Die Analyse der Amplituden des linken M. multifidus ergab zum Teil signifikante Veränderungen.

Um eine Vergleichbarkeit zu erzielen wurde die prozentuale Veränderung der Amplitudenwerte an den Untersuchungszeitpunkten t_1 , t_2 und t_3 im Vergleich zu t_0 errechnet. Die prozentualen Veränderungen wurden dann auf Signifikanz geprüft.

Im entspannten Stand ergibt sich für t_1 im Vergleich zu t_0 eine Abnahme der Amplitude um -17,97 % im Median. Darauf folgend beträgt die prozentuale Änderung median -7,02 % an t_2 verglichen mit t_0 . Diese Änderung ist nicht signifikant ($p = 0,249$). Zum Abschluss der Untersuchungen an t_3 ergibt sich eine signifikante Zunahme der Amplituden von 25,21 % im Vergleich zu t_0 ($p = 0,043$).

Für die maximale Vorbeuge (MVF) ergeben sich auf der linken Seite keine signifikanten Veränderungen.

Im Vergleich von t_0 zu t_1 beträgt die prozentuale Abnahme -16,75 % median.

Am nächsten Zeitpunkt t_2 fällt die Amplitude um -17,9 % im Vergleich zu t_0 ab. Hieraus ergibt sich eine asymptotische Signifikanz von $p = 0,753$ der prozentualen Veränderungen. Zuletzt ergibt sich eine nicht signifikante Zunahme der Amplitude um 14,05 % ($p = 0,893$) an t_3 .

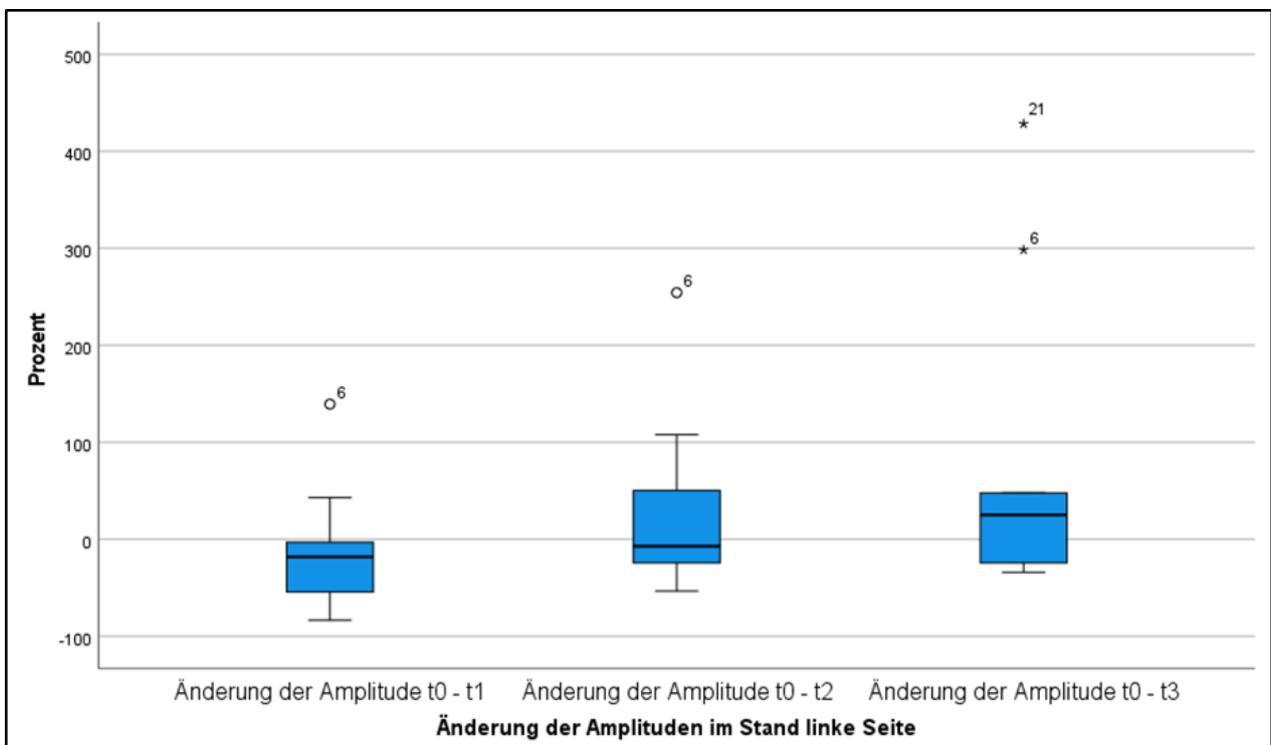


Abb. 25: Box-Whisker-Plots der intraindividuellen Amplitudenänderung in Prozent im entspannten Stand links.

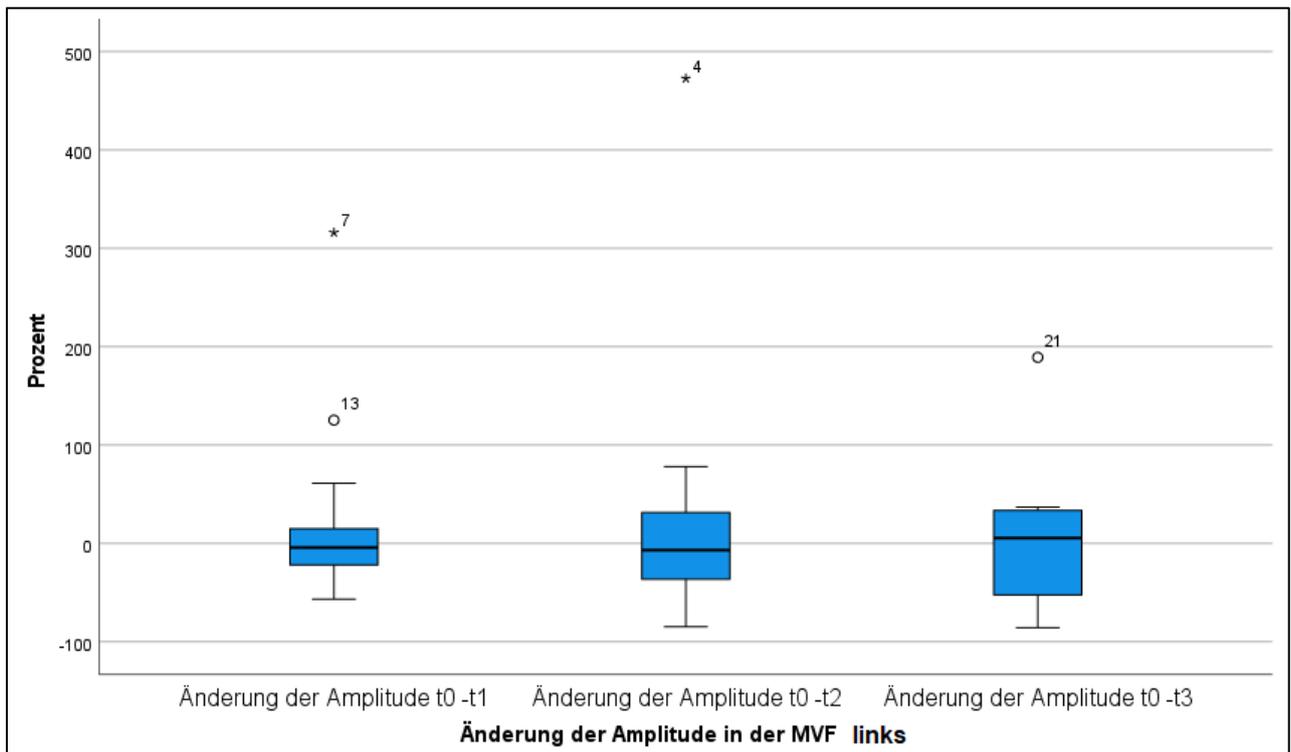


Abb. 26: Box-Whisker-Plots der Amplitudenänderung des linken M. multifidus lumborum während MVF in Prozent

3.6.1.2 M. multifidus rechts

Über dem rechten M. multifidus konnten im entspannten Stand teilweise signifikante Veränderungen der Amplituden gezeigt werden. In der maximalen Vorbeuge ergab sich keine signifikante prozentuale Änderungen der Amplituden im Vergleich zu t_0 .

Über dem rechten M. multifidus betrug die mediane Amplitudenveränderung an t_1 im entspannten Stand -13,53 % im Vergleich zu t_0 . Diese fiel an t_2 nicht signifikant auf -15,33 % im Vergleich zu t_0 ab ($p = 0,463$). Am letzten Untersuchungszeitpunkt t_3 stieg die mediane Amplitude um 1,45 % verglichen mit t_0 . Diese Steigung war signifikant ($p = 0,043$).

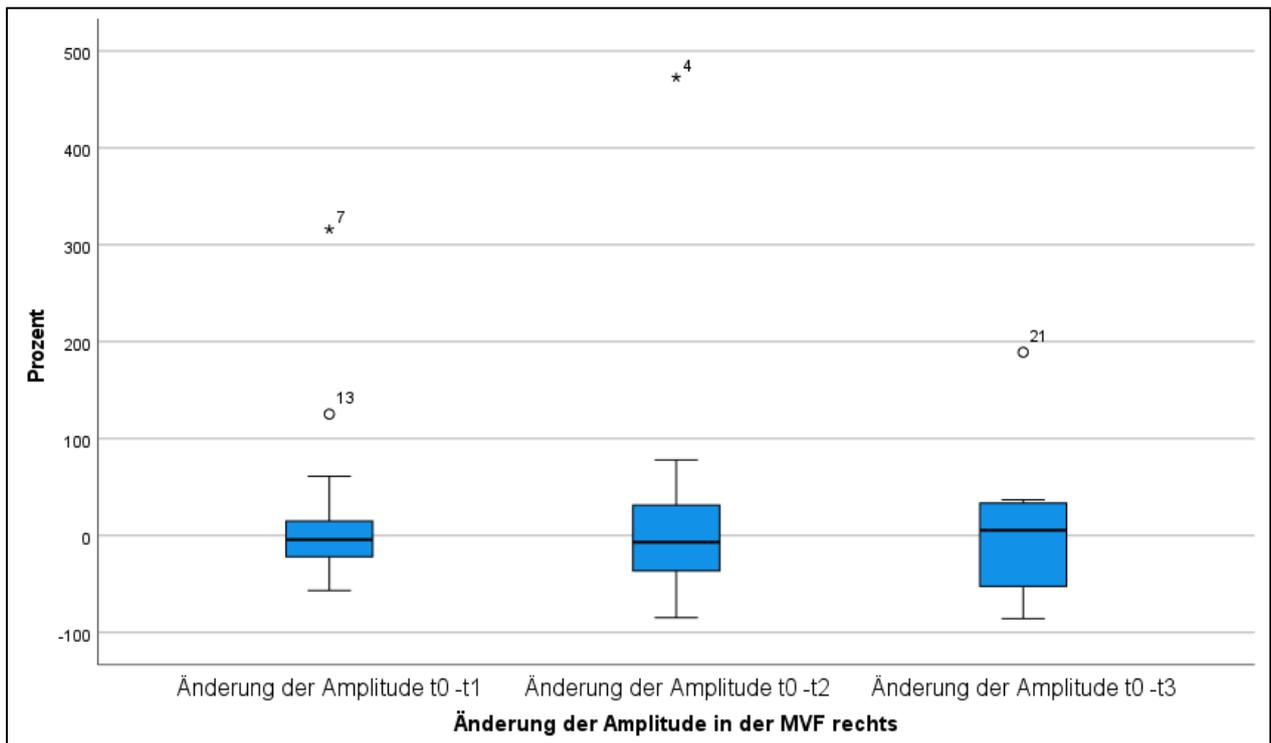


Abb. 27: Box-Whisker-Plots der intraindividuellen Amplitudenänderung in Prozent im entspannten Stand rechts.

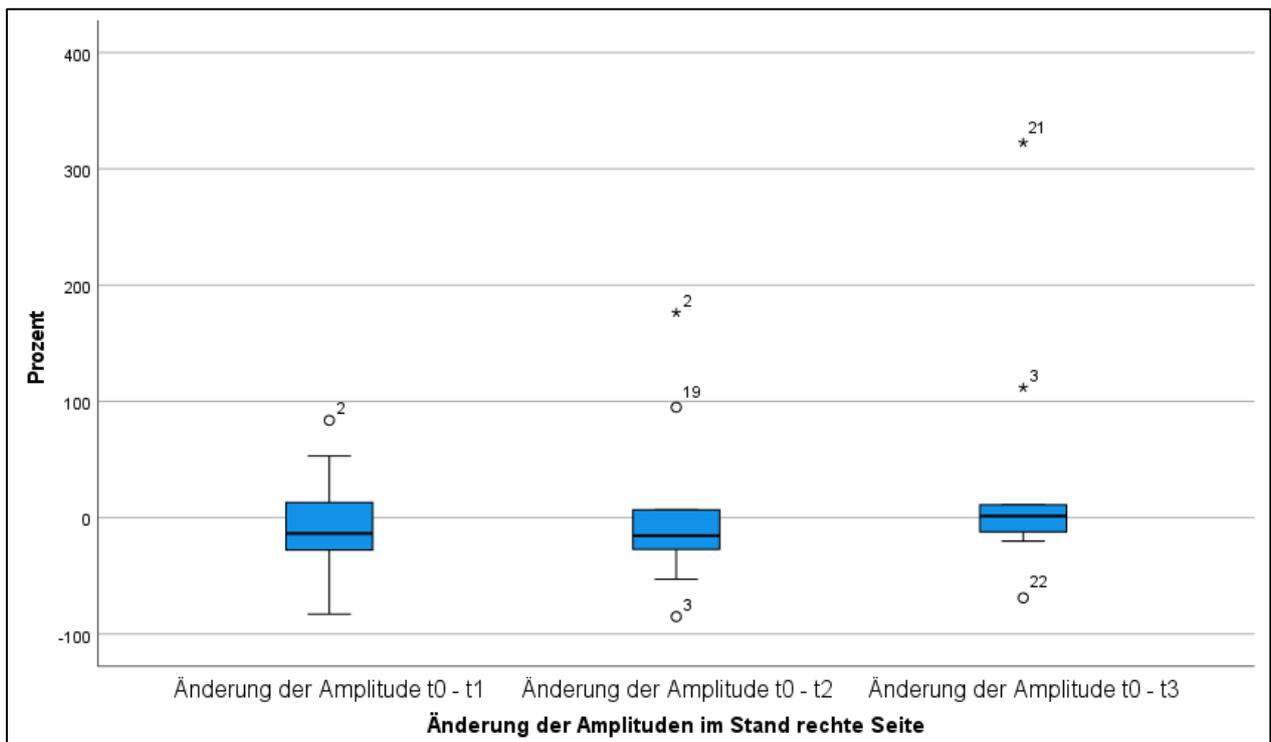


Abb. 28: Box-Whisker-Plots der Amplitudenänderung des rechten M. multifidus lumborum während MVF in Prozent.

In der maximalen Vorbeuge sank die Amplitude des rechten M. multifidus an t_1 verglichen mit t_0 um mediane -4,15 %. Im weiteren Verlauf sank die Amplitude erneut um -6,9 % im Median an t_2 verglichen mit t_0 . Es ergibt sich ein p von 0,06 und damit keine Signifikanz. Zuletzt ergab sich eine ebenfalls nicht signifikante Steigerung um 5,58 % im Median von t_3 zu t_1 ($p= 0,89$).

3.6.2 FRR

Die FRR wurde für jeden Untersuchungszeitpunkt für die linke und rechte Seite getrennt voneinander berechnet und die Ratios der unterschiedlichen Zeitpunkte miteinander verglichen. Weder auf der linken, noch auf der rechten Seite ergaben sich signifikanten Veränderungen.

3.6.2.1 FRR links

An t_0 ergab sich eine mediane FRR von 0,75 für die linke Seite. Die Ratio stieg nicht signifikant auf 1,45 am postoperativen Tag t_1 an ($p = 0,233$). Am darauffolgenden Untersuchungstermin t_2 zeigte sich ebenfalls keine signifikante Veränderung ($p = 0,779$). Der Median der Ratio lag hier bei 1,225. Am Abschlusstermin t_3 konnte gezeigt werden, dass die Ratio im Vergleich zur Baseline Untersuchung nicht signifikant sank. Der Median lag bei 0,49, die asymptotische Signifikanz bei 0,400.

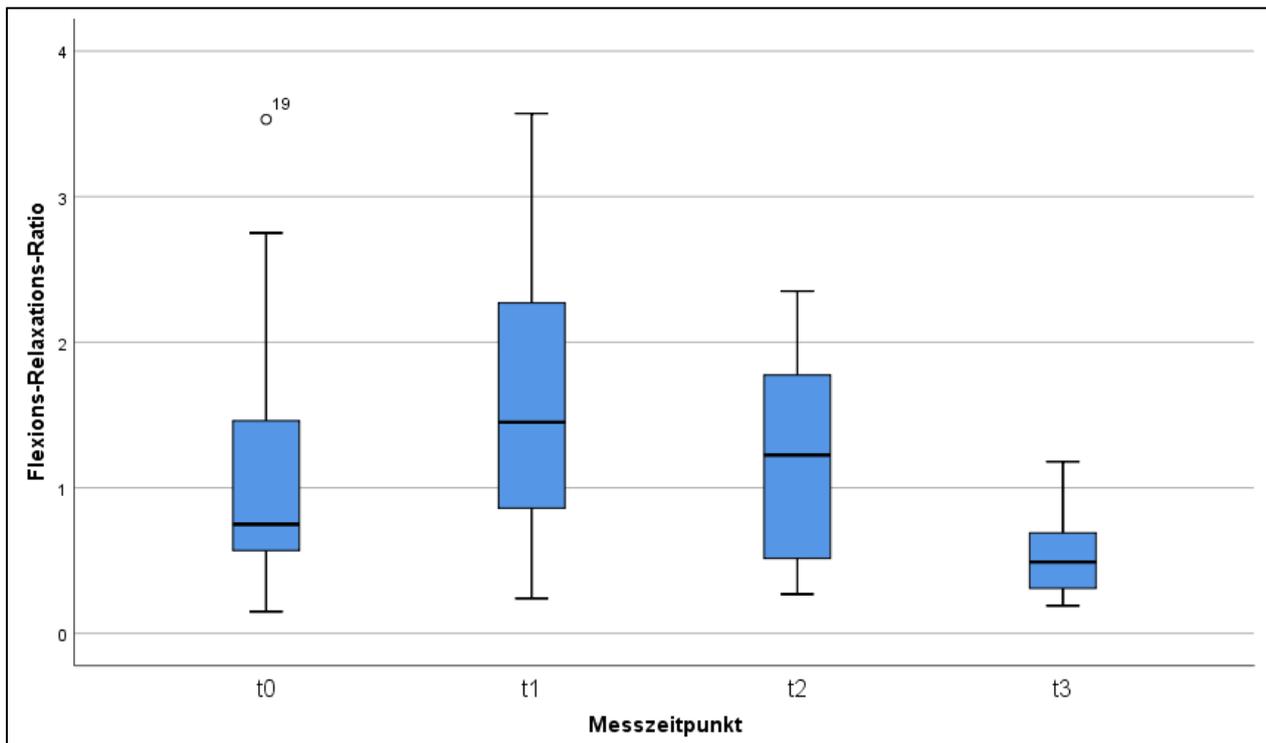


Abb. 29: Box-Whisker-Plots der FRR links.

3.6.2.2 FRR rechts

Für die rechte Seite ergab die Berechnung der FRR aus den gemessenen EMG-Daten an t_0 einen Median von 0,74. Die nach der postoperativen Messung ermittelte Ratio zeigte einen angestiegenen Median von 1,345. Diese Steigerung war nicht signifikant ($p = 0,979$). Bei den darauffolgenden Follow-Ups konnten an t_2 ein weiter gestiegener Median der FRR auf 1,83 ($p = 0,575$) und an t_3 ein unter das Ausgangsniveau auf 0,63 gefallener Median ermittelt werden ($p = 0,594$). Keine der Änderungen war signifikant.

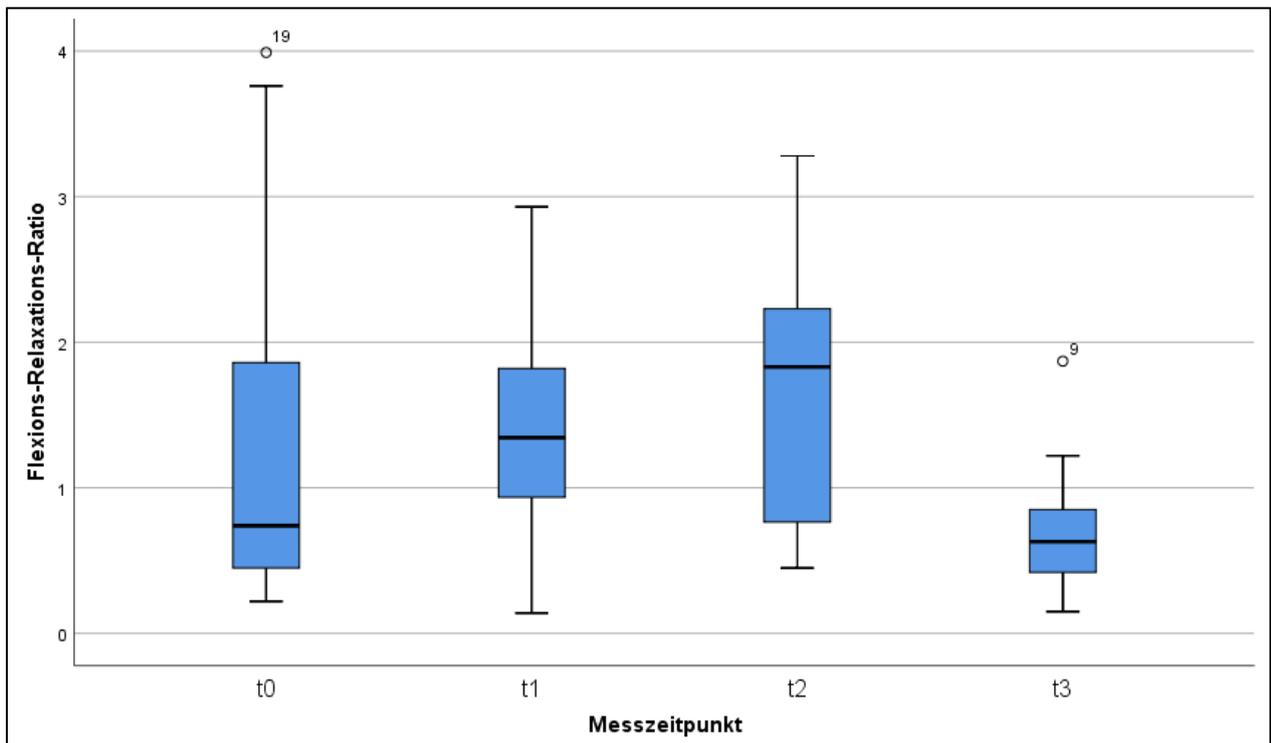


Abb. 30: Box-Whisker-Plots der FRR rechts.

4. Diskussion

4.1 Studienpopulation

In der vorliegenden Studie mit prospektivem, klinischem Kohortendesign wurde das klinische Outcome nach einer endoskopischen Facettengelenksthermoablation anhand von Fragebögen und EMG-Messungen bewertet.

Es wurde die Frage nach einer Abnahme der Rückenschmerzen und der damit zusammenhängenden Zunahme der, von den Patienten subjektiv empfundenen Lebensqualität über die Untersuchungszeitpunkte t_0 bis t_4 untersucht. Darüber hinaus wurde ebenfalls das neurophysiologische Verhalten der Mm. multifidii der LWS in Bezug auf ein FRP erfasst.

Die FRR wurde anhand von Messdaten der sEMG berechnet, welche während einer dynamischen Bewegungsabfolge von Stand und maximaler Vorbeuge (max. voluntary flexion, MVF) erhoben wurden.

Initial wurden 40 Patienten in die Studie eingeschlossen, von denen im Verlauf 6 als „lost-to-follow-up“ gewertet wurden. Dementsprechend erfolgte die Auswertung eines 34 Patienten umfassenden Kollektivs (s. 3.1). Das Patientenalter betrug durchschnittlich $63,7 \pm 11,8$ Jahre, wobei 55,8 % der eingeschlossenen Patienten weiblich waren. Sowohl die höhere Prävalenz von CLBP in weiblichen Personen als auch ein Maximum der Prävalenz im Alter von über 60 Jahren, ergibt sich laut Gesundheitsbericht des Bundes aus dem Jahr 2015 für die gesamte deutsche Bevölkerung (Robert-Koch-Institut, 2015).

Die angegebene Prävalenz von Facettengelenksarthrose in der Allgemeinbevölkerung schwankt stark innerhalb der Literatur. Es herrscht jedoch Einigkeit darüber, dass ein erhöhtes Alter mit einer erhöhten Prävalenz einhergeht (Cohen und Raja, 2007; Kalichman et al., 2008). Cohen und Raja kommen in ihrer Übersichtsarbeit „Pathogenesis, diagnosis and treatment of lumbar zygapophysial (facet) joint pain“ außerdem zu dem Schluss, dass anhand der Studienlage mindestens 10 % bis 15 % der CLBP Patienten eine Facettengelenksarthrose als schmerzinduzierende Ursache für ihre Rückenschmerzen haben (Cohen und Raja, 2007).

Neben einem erhöhten Lebensalter als Risikofaktor für CLBP, ist ebenfalls ein BMI von über 25 kg/m² ein entscheidender Risikofaktor für die Entstehung von CLBP und Facettengelenksarthrose (Yang et al., 2020). Als BMI wird die Relation von Körpergewicht zu Körpergröße beschrieben, sodass Rückschlüsse auf den Ernährungszustand einer Person gezogen werden können. Laut WHO besteht ab einem BMI von 25 kg/m² ein Übergewicht oder Präadipositas. Adipositas, also extremes Übergewicht besteht ab einem BMI von 30 kg/m² (WHO, 2020).

Aufgrund von stärkerer Beanspruchung der Muskulatur und des Achsenskeletts, ist das Risiko für eine Facettengelenksarthrose verdreifacht, wenn der BMI zwischen 25 und 30 kg/m² liegt (Gellhorn et al., 2013). In der Studienpopulation lag der durchschnittliche BMI bei 28,9 kg/m² und somit genau im erhöhten Risikobereich.

Es lässt sich zusammenfassen, dass sowohl Alter als auch ein BMI über 25 kg/m² Risikofaktoren für eine Facettengelenksarthrose und CLBP darstellen. Diese finden sich beide in der Studienpopulation wieder.

4.2 Absolute Anzahl der ausgewerteten Fragebögen und durchgeführten EMG-Messungen

Die absolute Anzahl der ausgewerteten Fragebögen variiert zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten (s. 3.3). Während 33 Patienten die Fragebögen zur Score-Ermittlung von EQ-5D und COMI an t_0 ausfüllten, so gibt es bereits für den postoperativen Zeitpunkt t_1 nur noch 27 Fragebögen zur Auswertung. Die restlichen 6 Patienten berichteten entweder über zu starkes Unwohlsein, um den Fragebogen auszufüllen oder waren bereits entlassen worden. An den folgenden Untersuchungszeitpunkten wurden 9 (t_2) und 16 (t_3) Fragebögen erhoben. Der Abschlussfragebogen wurde von 21 Patienten beantwortet.

Die absolute Anzahl der durchgeführten EMG-Messungen nimmt ebenfalls von Zeitpunkt t_0 zu t_2 jeweils ab, an t_3 steigt sie erneut geringfügig (s. 3.6). Während präoperativ noch alle 21 ausgewerteten Patienten in der Lage waren den Aufforderungen des Untersuchers

Folge zu leisten, so gelang dies am postoperativen Zeitpunkt t_1 nur noch 16 Patienten (76,2 %). Die übrigen Patienten berichteten über zu starke Schmerzen im Operationsgebiet oder Schwindel von der Narkose, sodass eine Vorbeuge aus dem freien Stand nicht möglich war. An den vereinbarten Follow-Up Untersuchungen und Messungen nahmen 8 (t_2 , 38,1 %) und 9 Patienten (t_3 , 42,9 %) teil.

Der deutliche Rückgang der ambulant durchgeführten Messungen legt nahe, dass weitere Faktoren bei den Messungen eine Rolle spielten. So erscheint die signifikante Abnahme der Schmerzen eine plausible Erklärung dafür, dass Patienten einen erneuten Arzttermin als „unnötig“ empfanden.

In seiner Arbeit „Neuromuskuläre Regeneration nach lumbaler endoskopischer Facettengelenksthermokoagulation“, welche die gleiche Studienpopulation beschreibt, legt Weber außerdem nahe, dass Patienten, die die Intervention als nicht hilfreich einschätzten, ebenfalls eher aus der Studie austreten und nicht mehr an den ambulanten Kontrollen teilnehmen würden (Weber, 2020). Dies war bei 3 Patienten der Fall.

Außerdem gibt es Hinweise darauf, dass Patienten mit CLBP häufig eine schlechte Adhärenz zeigen. So ergab eine 2018 von Peek et al. veröffentlichte Studie, dass lediglich 15 % der CLBP Patienten in der Lage waren, ein physiotherapeutisches Übungsprogramm in Follow-Up Terminen zu erinnern und vorzuführen (Peek et al., 2018).

Weiterhin bleibt zu beachten, dass die Follow-Up Untersuchungen t_2 und t_3 als ambulante Termine durchgeführt wurden und eine eigenständige Terminvereinbarung mit der Klinik erforderten. Es lässt sich vermuten, dass Termine daher aus beruflichen oder privaten Gründen nicht stattfanden.

4.3 sEMG

4.3.1 Versuchsaufbau und Berechnungsgrundlage FRR

Das Flexions-Relaxations-Phänomen beschreibt die Lichtung des Aktivitätsmusters der lumbalen Haltemuskulatur während der maximalen Flexion der Wirbelsäule (s. 1.4.3.3). Um die studienrelevanten, im Operationsgebiet befindlichen Anteile des M. multifidus

bestmöglich elektromyographisch abbilden zu können, wurde sich für eine Positionierung der Elektroden überhalb der untersuchten Muskulatur entschieden (s. 2.4.1.1).

Es wurde stets auf eine gründliche Palpation der anatomischen Landmarken sowie auf die exakte Vermessung mittels Lineals geachtet, um eine Reproduzierbarkeit der Elektrodenpositionierung auch bei unterschiedlichen Untersuchern gewährleisten zu können. So konnte sichergestellt werden, dass die gleichen Ableitungsbedingungen während der verschiedenen Untersuchungszeitpunkte t_0 bis t_3 trotz zwei Untersuchern gegeben waren. Aufgrund der operativ entstandenen Wundflächen im Gebiet der Messlandmarken, wurden falls nötig postoperativ die Klebeflächen der Elektroden angepasst, um eine Elektrodenplatzierung an der vorgesehenen Position zu ermöglichen und dabei gleichzeitig eine Verletzung des Patienten durch Manipulation des Wundgebietes zu verhindern. Dennoch ließ sich nicht in allen Fällen die vorgesehene Positionierung an t_1 exakt reproduzieren.

Die Untersuchungszeitpunkte wurden so ausgewählt, dass eine Wirksamkeit der operativen Intervention im zeitlichen Verlauf gezeigt werden konnte. Bereits nach 4 Wochen konnten elektromyographisch abbildbare Veränderungen des Aktivitätsmusters des *M. erector spinae* in Patienten mit CLBP gezeigt werden, die zuvor im Untersuchungszeitraum unterschiedliche Mobilisierungsübungen durchgeführt hatten. (Ali et al., 2019). Dennoch scheint das muskuläre Aktivitätsmuster, mit welchem langfristig durch eine therapeutische Intervention zu rechnen ist, erst nach frühestens 10 Wochen erreicht zu sein (Hides et al., 1996). Somit ist davon auszugehen, dass Veränderungen der EMG-Signale durch die Intervention an den Untersuchungszeitpunkten t_2 und t_3 repräsentativ gezeigt werden können.

Für die Berechnung der FRR wurde der Quotient der Muskelaktivität während entspanntem Stand und MVF gebildet, welche im Rahmen einer dynamischen Bewegungsabfolge bestehend aus Stand zu Vorbeuge mit anschließendem Wiederaufrichten abgeleitet wurde (s. 2.7.1.1). Es gilt zu beachten, dass es eine Vielzahl von unterschiedlichen Berechnungs- und Untersuchungsmöglichkeiten der FRR in der Literatur beschrieben sind. Berechnungen auf der Grundlage anderer Bewegungsmuster waren teilweise geringfügig signifikanter in der Lage den Zusammenhang zwischen Klinik und muskuloskelettalen

Anomalien numerisch abzubilden als die hier angewandte (Neblett et al., 2013). Dennoch ist die hier ausgewählte Methode zur Berechnung der FRR in der Literatur ebenfalls als ausreichend signifikant bestätigt worden (Alschuler et al., 2009), so dass sich unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Recourssen für die in 2.7.1.1 beschriebene Methode entschieden wurde. Durch visuelle Kontrolle der abgeleiteten EMG-Signale durch denselben Untersucher, konnte außerdem eine akkurate Bestimmung der Ratio erreicht werden.

Da es für die gewählte Berechnungsmethode in der Literatur bisher keine normierten Referenzwerte gibt, erfolgt die Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext in Bezug auf die bereits beschriebenen normierten Berechnungsmethoden (Alschuler et al., 2009). Des Weiteren wird das Vorhandensein eines FRP deshalb als Amplitudenhöhe Stand > Amplitudenhöhe MVF definiert (Othman et al., 2008).

Das EMG-Signal als solches wird durch verschiedene Störfaktoren in seiner Qualität beeinflusst. Neben dem physiologischen Cross-Talk durch angrenzende Muskelgruppen, spielt v.a. die Gewebeeigenschaft eine wichtige Rolle. Nordander et al. konnten zeigen, dass die Dicke des subkutanen Fettgewebes einen signifikanten Einfluss auf die EMG-Amplitudengröße hat (Nordander et al., 2003). Es bildet einen sog. Tiefpassfilter, welcher zu einer Abschwächung des EMG-Signals führt (Konrad, 2011).

Wie Nadeem et al. 2018 zeigen konnten, korreliert die mittels Ultraschall gemessene Dicke des subkutanen Fettgewebes mit dem BMI (Nadeem et al., 2018). Bei der ausgewerteten Studienpopulation mit einem mittleren BMI von $28,9 \pm 4,9$ kg/m², könnte der durch subkutanes Fettgewebe entstandene Tiefpassfilter daher eine Auswirkung auf die generelle Qualität des EMG-Signals gehabt haben. Ebenfalls abschwächend auf das Signal könnte die degenerative Infiltration der Mm. multifidii mit Fettgewebe gewirkt haben. So ergab eine radiologische Studie, dass bei CLBP Patienten bis zu 50 % der lumbalen Muskelmasse durch fettgewebige Infiltration strukturell verändert sind (Yanik et al., 2013).

Aufgrund des lediglich intraindividuellen Vergleichs der Messdaten, kann davon ausgegangen werden, dass sich eine solche, oben beschriebene Abschwächung des EMG-Signals auf alle Messungen gleichermaßen auswirkt und die Berechnungen daher nicht tangiert.

Das Operationstrauma führt durch Hämatom- und Narbenbildung zu einer geringgradigen Veränderung der Gewebestruktur, diese könnte sich auf die postoperativen Messungen ausgewirkt haben (s. 1.4.3.2).

Dennoch ermöglicht es die Oberflächen-Elektromyographie einen globalen Überblick über das Aktivitätsmuster der untersuchten lumbalen Muskulatur und deren motorischen Einheiten zu erhalten (Zhang et al., 2018).

Des Weiteren sollte auch die Motivation der Patienten zur Teilnahme an der Studie berücksichtigt werden. Die Gewissenhaftigkeit bei der Durchführung der Übungen, sowie die ehrliche Beantwortung der Fragen könnte durch die jeweilige Motivation der Patienten beeinflusst worden sein. Die Teilnahme an der Studie erfolgte freiwillig und unentgeltlich.

Die hier aufgeführten Punkte sind bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

4.3.2 Amplitudenanalyse der Mm. multifidii und FRR

Die Amplitudenanalyse der Mm. multifidii ergibt für beide Seiten einen prozentualen intraindividuellen Anstieg der Amplituden von Untersuchungszeitpunkt t_0 zur Abschlussuntersuchung t_3 bezogen auf den aufrechten Stand. In der Vorbeuge ergibt sich rechts eine prozentuale, intraindividuelle Abnahme von t_0 zu t_3 . Links ergibt sich ebenfalls eine Amplitudenanstieg, dieser ist jedoch im Verhältnis kleiner als der Anstieg im Stand. Das dadurch entstehende Muskelaktivitätsmuster während der dynamischen Bewegungsabfolge bedeutet eine Annäherung an das von gesunden Probanden im Sinne eines FRP. Dementsprechend liegt die FRR bei Untersuchungsabschluss durchschnittlich unter der initial erhobenen Ratio, was für die Wirksamkeit der Intervention spricht.

Während des Standes fällt die Amplitude beider Seiten am postoperativen Tag im Vergleich zu t_0 ab. Der kleineren Amplitude liegt eine geringere Anzahl angesteuerter motorischer Einheiten zugrunde (Martinez-Valdes et al., 2018). Die Intervention setzt durch die Denervierung ein neurogenes Trauma am R. dorsalis, sodass die Innervation der Muskulatur unterbrochen wird. Aufgrund der daraus folgenden fehlenden Ansteuerbarkeit

durch die Motoneurone, können weniger motorische Einheiten aktiviert werden, die EMG-Amplitude sinkt (Bischoff und Schulte-Mattler, 2015).

An den folgenden beiden Untersuchungszeitpunkten t_2 und t_3 konnten zunächst eine weitere Abnahme gefolgt von einem Anstieg über das Ausgangsniveau der Amplituden gemessen werden. Dabei lagen die Amplituden linksseitig nach 6 Wochen ungefähr auf Ausgangsniveau. Rechtsseitig war weiterhin eine Abnahme ähnlich der postoperativen Messung zu verzeichnen. Damit scheint dieser Zeitraum mindestens nötig zu sein um durch gezielte Nachsorge (z.B. Physiotherapie, Rückenschule, Schmerztherapie etc.) zusätzlich zu einer Schmerzfreiheit bzw. -reduktion das präoperative, muskuläre Niveau wiederherzustellen. Zu Abschluss der Studie ergab sich beidseits eine prozentuale Steigerung der Amplitudenhöhe im Vergleich zu t_0 , was sich sowohl auf die signifikant gesunkenen Schmerzen, als auch die neuromuskuläre Regeneration zurückführen lässt. Nicht denervierte Nervenenden sprießen im Rahmen des sog. Remodelings aus und Axonkollateralen innervieren die Muskulatur erneut (Navarro und Valero-Cabré, 2007). Diese Regenerationsfähigkeit ist von unterschiedlichen Faktoren, wie u.a. den verbliebenen Schwann-Zellen abhängig. Eine vorangegangene degenerative Schädigung durch CLBP verschlechtert den Regenerationsprozess, ebenso wie ein erhöhtes Patientenalter (Gibson und Ma, 2011).

Die gesteigerte Amplitudenhöhe an t_3 bedeutet jedoch eine Vergrößerung der motorischen Einheit, was auf einen erfolgreichen Remodeling-Prozess hindeutet (Bischoff und Schulte-Mattler, 2015).

Dass Schmerz eine Auswirkung auf die Amplitudenhöhe hat erklärt sich dadurch, dass die nervale Ansteuerbarkeit von stabilisierender Haltemuskulatur eines Gelenkes erniedrigt ist, wenn von diesem Schmerzen ausgehen (Russo et al., 2018).

Die initiale Schmerzbelastung von durchschnittlich 8 auf der NRS (s. 3.4.1) legt also eine geringere Ansteuerung der Mm. multifidii der betroffenen Segmente als bei gesunden, schmerzfreen Probanden nahe, was demnach in einer erniedrigten Amplitude resultiert. Aufgrund des signifikanten Abfalls des Schmerzempfindens im Studienverlauf, könnten die Effekte der sog. „arthrogenen Inhibition“ weniger ins Gewicht fallen (Rice und McNair, 2010). Die Schmerzreduktion bedeutet also eine bessere neuronale Ansteuerung der regenerierten Axonkollateralen an t_3 , was die höhere Amplitude erklärt.

Bei der Amplitudenanalyse sollte außerdem beachtet werden, dass im sEMG in geringem Maße auch die Potenziale der synergistisch wirkenden Haltemuskulatur des M. erector spinae (s. 1.2.4.1) erfasst werden. Das signifikant gesunkene Schmerzempfinden (s. 3.4.1) könnte sich ebenfalls positiv auf die Aktivierung der restlichen Rückenmuskulatur ausgewirkt haben.

Weiterhin auffallend ist die zu Studienbeginn unterschiedliche durchschnittliche Amplitudenhöhe der beiden untersuchten Seiten. Diese lag auf der linken Seite um 26,73 % höher als auf der rechten Seite (li 12,8 μ V, re 10,1 μ V).

In der Vergangenheit konnte eine ungleichmäßige Aktivierung der Muskulatur bei Patienten mit CLBP nachgewiesen werden (Massé-Alarie et al., 2017). Zwar kommen auch bei Gesunden Seitenasymmetrien vor, diese sind u.a. auf die Händigkeit, den individuellen Trainingszustand oder das Alter der Probanden zurückzuführen (Sung et al., 2004). Jedoch wird die muskuläre Asymmetrie durch Aktivierung synergistischer Muskelketten, wie dem M. erector spinae, ausgeglichen (Fortin et al., 2013; Niemeläinen R, 2011).

Bei Schmerzpatienten kommt es allerdings eher zu einer Verteilung der Last auf die gesunde bzw. weniger schmerzhaft Seite, was Seitenasymmetrien insbesondere bei CLBP Patienten noch verstärken kann (Oddsson und De Luca, 2003). So konnten ipsilateral empfundene Schmerzen in direkten Zusammenhang mit einem, auf dieser Seite verhältnismäßig kleineren M. multifidus gebracht werden (Hides et al., 2008). Dies könnte eine Erklärung der linksseitig durchschnittlich größeren Amplitudenhöhe gegenüber der rechten zu Studienbeginn sein, da eine Mehrheit der Patienten initial ebenfalls entweder rechts betonte oder beidseitige Schmerzen angab, links betonte Schmerzen waren die Minderheit (vgl. Weber, 2020 Abb. 24). Retrospektiv lässt sich aufgrund der anonymisierten Datenlage jedoch nicht mehr eruieren, ob dieser Zusammenhang tatsächlich nachgewiesen werden konnte oder es sich lediglich um einen Zufall handelt.

Da im Rahmen der Behandlung immer beide Seiten eines Segmentes denerviert wurden, zeigen sich alle postoperativen Tendenzen zudem ebenfalls beidseits.

In der Vorbeuge ergibt die prozentuale Amplitudenanalyse eine Tendenz, welche mit dem Auftreten eines FRP zu vereinbaren ist.

In gesunden Patienten tritt im Rahmen der dynamischen Bewegungsabfolge am Punkt der MVF eine elektromyographische Stille, bzw. eine Abnahme der Muskelaktivität im Vergleich zum aufrechten Stand ein. Diese Beobachtung deckt sich mit der in der Literatur beschriebenen Übererregbarkeit der lumbalen Muskulatur in Patienten mit CLBP und dem Unvermögen solcher ein FR zu erreichen (Colloca und Hinrichs, 2015).

Am postoperativen Tag sanken die Amplitudenhöhen im Vergleich zu t_0 prozentual im Stand mehr als in der Vorbeuge. Dies könnte am OP Trauma liegen, da die Patienten zwar generell eine signifikante Schmerzreduktion im Vergleich zu t_0 angaben (s. 3.4.1), jedoch weiterhin über Schmerzen während der Bewegung klagten. Da das Vorhandensein von Schmerzen eine signifikante Verkleinerung des Flexionswinkels der MVF zur Folge hat (Coyle et al., 2017), bleibt außerdem anzunehmen, dass die Patienten weniger tief flektierten, als für das Erreichen eines signifikant gesunkenen Aktivitätsmusters nötig gewesen wäre.

Im Vergleich der prozentualen Verkleinerung der Amplituden von t_0 zu t_1 verglichen mit t_0 zu t_2 ergibt sich nur rechtsseitig eine Signifikanz für die in Vorbeuge gemessenen Werte. Am Tag der Abschlussuntersuchung t_3 konnte jedoch für die im Stand gemessenen Werte eine signifikante prozentuale Zunahme der Amplituden gezeigt werden. Die Werte für die MVF zeigen eine nicht signifikante, ebenfalls steigende Tendenz.

Aufgrund der kleinen Studienpopulation und der inkohärenten Teilnehmeranzahl der Untersuchungszeitpunkte lässt sich trotz eindeutig erkennbarer Tendenzen keine statistische Signifikanz für die FRR zeigen.

Dennoch ist eine eindeutige Tendenz erkennbar. So steigt die Ratio an den Zeitpunkten t_1 und t_2 im Vergleich zu t_0 beidseits. Zur Abschlussuntersuchung t_3 sinkt sie beidseits jedoch unter das Ausgangsniveau, was das für eine erfolgreiche Intervention im Sinne einer Annäherung des neuromuskulären Aktivitätsmusters an das Aktivitätsmuster gesunder Probanden spricht (Neblett et al., 2013). Die Daten spiegeln eine eindeutige Tendenz wider, es lässt sich jedoch aufgrund der oben genannten Limitationen keine mathematische Signifikanz zeigen.

Die Tatsache, dass eine erfolgreiche Intervention zur Nachweisbarkeit eines FRP in Patienten führen kann, die präinterventionell kein FRP im EMG zeigten, konnte bereits 2003 von Neblett et al. gezeigt werden (Neblett et al., 2003).

Weiterhin konnte unter anderem von Dickey et al. gezeigt werden, dass die häufige Wiederholung der Bewegungsabfolge das FRP verstärkt (Dickey et al., 2003). In der Studie absolvierten die Patienten die Abfolge aus Praktikabilitätsgründen jedoch nur max. zwei Mal hintereinander, sodass davon auszugehen ist, dass eine größere Anzahl an Wiederholungen zu einer Signifikanz der Ergebnisse in Bezug auf die FRR geführt hätte.

4.3.3 Lebensqualität abgebildet durch EQ-5D und COMI

Die beiden Messinstrumente COMI und EQ-5D wurden in der aktuellen Studie genutzt, um die gesundheitsbezogene Lebensqualität der Patienten und die Zufriedenheit mit der Wirksamkeit der Intervention zu erfassen.

Der EQ-5D ist ein 5-dimensionaler Fragebogen, der den präferenzbasierten Gesundheitszustand der Patienten ermittelt. Er wird regelmäßig einer Validierung unterzogen und gilt in der Literatur seit seiner Einführung in deutscher Sprache 1998 als valides Testverfahren zur Beschreibung der gesundheitspezifischen Lebensqualität von Patienten (Rabin und Charro, 2001). Gerade bei Patienten mit CLBP hat die Verwendung des EQ-5D zur Bewertung derer gesundheitsbezogenen Lebensqualität eine lange Tradition in der Wissenschaft und ist allgemein anerkannt (Finch et al., 2016). Außerdem konnte gezeigt werden, dass der EQ-5D eine sinnvolle Methode ist um Veränderungen des Gesundheitszustandes von Patienten im Rahmen von klinischen Studien abzubilden (Payakachat et al., 2015).

Es sollte erwähnt werden, dass in der vorliegenden Studie die 3L Version des EQ-5D verwandt wurde, da hierfür bereits Nutzungsrechte der Klinik vorlagen. Die neuere 5L Version hat eine höhere Sensitivität und ist unempfindlicher gegenüber Deckeneffekten (EuroQol, 2020). Dennoch konnte für beide Versionen insgesamt eine vergleichbare Validität der Ergebnisse gezeigt werden (Selivanova et al., 2018).

Um die Spezifität der Ergebnisse zu erhöhen wurde zusätzlich ein weiterer wissenschaftlich etablierter Score zur Lebensqualität und Zufriedenheit der Patienten erfasst. Der rüchenspezifische Core Outcome Measure Index (COMI-back) konnte ebenfalls als valides Messinstrument für Studien zur Untersuchung der Wirksamkeit operativer Maßnahmen bestätigt werden (Mannion et al., 2016). Außerdem ist er das offizielle Outcome Instrument der „Spine Tango“, dem europäischen Wirbelsäulenregister (Euro Spine, 2020). Er ist wie der EQ-5D ein multidimensionaler Index, welcher neben symptomspezifischen Beschwerden und allgemeiner Lebensqualität auch die Zufriedenheit der Patienten mit der Behandlung abfragt. Außerdem wird eine Einschätzung darüber verlangt, wie die Intervention dem Patienten geholfen hat (Pochon et al., 2016).

Die Fragebögen wurden in Verbindung mit den EMG-Messungen von den Patienten ausgefüllt. Dafür wurden die Fragebögen in einer App auf einem Tablet aufgerufen und von den Patienten eigenhändig oder bei Bedarf unter Mithilfe der Untersucher ausgefüllt.

Für die Erhebung von Langzeitdaten wurden die Patienten nach durchschnittlich 760 Tagen erneut telefonisch nach ihrem Gesundheitszustand gefragt. Dafür wurden die Telefon-Interview Versionen der beiden Fragebögen verwendet.

Mulhern et al. konnten 2015 zeigen, dass die verschiedenen Modi der Fragebogendurchführung vergleichbare Ergebnisse liefern (Mulhern et al., 2015). Dementsprechend konnten auch die Ergebnisse der telefonisch erhobenen Fragebögen in Bezug zu den persönlich ausgefüllten, mobilen Tablet-Versionen gesetzt werden und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse blieb gegeben.

Sowohl für den EQ-5D als auch den COMI Index ergaben sich signifikante Verbesserungen über die Studienlaufzeit hinweg.

Präoperativ lag der mediane EQ-5D Score bei 0,701 (schlechtmöglicher Gesundheitszustand 0, bestmöglicher Gesundheitszustand 1). Bereits an t_1 stieg der Score signifikant um ca. 12 % auf 0,788 an. Dieser Anstieg hielt sich stabil an t_2 . Zum Abschluss des EMG Studienzeitraums t_3 stieg der Score ein weiteres Mal signifikant auf 0,7995 an und lag damit um ca. 14 % über dem Ausgangsscore.

Die telefonisch erhobenen Scores an t_4 ergaben erneut einen Median von 0,788, sodass auch nach über 2 Jahren eine signifikante Verbesserung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität der Patienten gemessen wurde.

Für den COMI wurde ebenfalls eine signifikante Verbesserung des Scores im Studienverlauf gemessen (schlechtmöglicher Outcome Score 10, bestmöglicher Outcome Score 0).

Initial lag der Score im Mittel bei 8, bereits an t_1 zeigte sich eine Reduktion auf 6,92. Am 6-Wochen-Follow-Up Termin t_2 lag der COMI bei 7. Innerhalb der nächsten 6 Wochen sank der Score deutlich ab und lag am abschließenden Untersuchungstermin bei 4,665. Dies bedeutet eine Reduktion um über 70 % verglichen mit dem präoperativen Zustand. Der telefonisch erhobene Score nach durchschnittlich ca. 2 Jahren (t_4) lag mit 5,1 weiterhin signifikant niedriger als der Ausgangswert. Es bestand weiterhin eine Verbesserung von ca. 57 % bezogen auf den präoperativ erhobenen Score.

Diese Ergebnisse liegen im Rahmen der erwarteten Verbesserung der Lebensqualität durch die Intervention und zeigen eine Wirksamkeit der endoskopischen Facettengelenksthermoablation zur Therapie von CLBP an.

Dass der COMI Score deutlich bessere Ergebnisse liefert, kann daran liegen, dass er den symptom-spezifischen Zustand des Patienten abfragt, wohingegen der EQ-5D den gesamten Gesundheitszustand des Patienten erfragt. Aufgrund des langen Zeitraums zwischen Abschluss der EMG-Studie und telefonischer Erhebung der Scores, könnte es im Leben der Patienten bspw. zu anderweitigen Erkrankungen gekommen sein, die die Lebensqualität beeinflussen. Diese würden sich lediglich im unspezifischeren EQ-5D niederschlagen. Außerdem sollte beachtet werden, dass die letzten Telefon-Interviews im März und April 2020 geführt wurden, als die SARS-CoV-2 Pandemie zum landesweiten Lockdown in Deutschland geführt hatte. Die Pandemielage und der Lockdown gingen mit einer teils starken psychischen Belastung und verstärkter Angst innerhalb der Bevölkerung einher (Mukhtar, 2020). Psychische Belastungen spielen besonders bei chronischen Schmerzpatienten eine wichtige Rolle (Mills Set al., 2019), sodass von einer Auswirkung auf die Beantwortung der Fragebögen ausgegangen werden kann. Da die psychische Belastung

der Patienten lediglich im EQ-5D erfragt wird, könnte dies zu einer schlechteren Performance in diesem Fragebogen geführt haben.

Dass in beiden Scores die maximale Verbesserung nach 12 Wochen erreicht wurde, lässt sich durch das Remodeling der versorgenden nervalen Strukturen erklären (s.o.). Zu diesem Zeitpunkt ist die Regeneration der propriozeptiven Fasern noch nicht vollständig abgeschlossen (Menorca et al., 2013), sodass weiterhin eine Reduktion des Schmerzempfindens vorliegt. Gleichzeitig konnte eine Verbesserung der muskulären Strukturen, die die lumbale Wirbelsäule stabilisieren bereits erreicht werden. Hieraus ergibt sich eine positive Kombination von Schmerzreduktion und Wirbelsäulenstabilität für die Patienten, die im untersuchten Zeitraum im maximalen Zugewinn von Lebensqualität resultiert.

Dies deckt sich mit Daten aus der Literatur, welche zeigen konnten, dass es Patienten nach einer operativen Intervention am Rücken nach 12 Wochen am besten geht, bezogen auf die individuell empfundene Lebensqualität (Rommelspacher et al., 2020).

Dass der COMI nach ca. 2 Jahren (t_4) weiterhin signifikant unter dem Ausgangswert liegt, bedeutet, dass die endoskopische Facettengelenksthermoablation auch Erfolge in der Langzeittherapie von CLBP erbringen kann.

Da der EQ-5D ebenfalls eine signifikante Verbesserung ergab, scheint sich eine Verbesserung der rügenspezifischen Symptomatik auch auf die allgemeine gesundheitsbezogene Lebensqualität der Patienten auszuwirken.

Die Tatsache, dass in die Entstehung und Unterhaltung eines chronischen Schmerzsyndroms unterschiedliche Aspekte einfließen, welche über rein physische Veränderungen (Degeneration der Bandscheiben, chronische Inflammation etc.) hinausgehen (bspw. Katastrophisieren, Selbstwirksamkeitsempfinden) ist unumstritten. Daraus ergibt sich trotz der nachweislichen schmerztherapeutischen Erfolge der Intervention weiterhin die Empfehlung eines multimodalen Therapiekonzepts (Nationale Versorgungsleitlinien, 2017).

Die in dieser Studie beschriebenen Ergebnisse decken sich weitestgehend mit den von Walter et al. aus 2018, welche eine größeren Studienpopulation beschreibt (Walter et al., 2018).

4.4 Schlussfolgerungen

Wenn eine konservative Therapie in der Behandlung von CLBP nicht zum gewünschten Erfolg geführt hat, stellt die endoskopische Facettengelenksthermokoagulation mit Facettektomie eine gute schmerztherapeutische Option dar (Walter et al., 2018).

In dieser Studie wurden EMG-Messungen der lumbalen Muskulatur mit der Erhebung von Scores zur Beschreibung der Lebensqualität der Patienten kombiniert, um eine umfassende Bewertung der Interventionswirksamkeit zu erreichen.

Der Einsatz von elektromyographischen Messungen der Mm. multifidii als wichtigsten Stabilisatoren der lumbalen Wirbelsäule ist zur Untersuchung von CLBP Patienten in der klinischen Forschung bereits seit langem etabliert. Dennoch konnte kein Studiendesign gefunden werden, welches einen longitudinalen Verlauf der elektromyographischen Veränderungen in Kombination mit der patientenempfundenen Lebensqualität abbildet (Weber, 2020). Meist wurde an nur einem Untersuchungszeitpunkt ein gesundes mit einem erkrankten Kollektiv verglichen (u.a. Ahern et al., 1988; Alschuler et al., 2009; Neblett et al., 2013).

Der beschriebene Hintergrund sollte bei der Beurteilung und Interpretation der erhobenen Ergebnisse der, für das untersuchte Krankheitsbild repräsentativen Studienpopulation (s. 4.1) berücksichtigt werden.

Es folgt die Beantwortung der Fragestellungen aus 1.7:

Zu 1: Wie verändert sich das EMG der Mm. multifidii der Probanden während einer dynamischen Bewegungsabfolge im postoperativen Verlauf nach endoskopischer Facettenthermokoagulation prozentual?

Postoperativ sinkt die Amplitude der Mm. multifidii in Stand und Vorbeuge beidseits, was durch das Trauma der Operation erklärbar ist. Die unterbrochene nervale Ansteuerbarkeit der lumbalen Muskulatur resultiert in einer verkleinerten Amplitude im EMG. Nach erfolgreicher Regeneration kann an t_3 für den Stand eine Zunahme der Amplitude um ca. 25 %

links und ca. 1,5 % rechts verglichen mit t_0 verzeichnet werden. Dies spricht für die Vergrößerung der motorischen Einheit im Rahmen der erfolgreichen Regeneration nach der Intervention, sowie ein Ansprechen des gleichzeitig angewandten multimodalen Therapiekonzepts (Krafttraining, Physiotherapie etc.). In der MVF kommt es im Studienverlauf nach einer Abnahme an t_1 und t_2 abschließend an t_3 zu einer Zunahme der Amplitude über das Ausgangsniveau um durchschnittlich ca. 14 % links und ca. 5,5 % rechts. Dass sich das Aktivitätsmuster der Probanden dem gesunder Personen annähert, lässt sich erst in Kombination mit der Auswertung des FRP darstellen. Dies spricht dafür, dass sich die mit CLBP assoziierte Übererregbarkeit der lumbalen Muskulatur normalisiert (Neblett et al., 2013).

Zu 2.: Welche Bedeutung für das Flexions-Relaxations-Phänomen im EMG hat die operative Intervention?

Das Flexions-Relaxations-Phänomen ist durch ein gelichtetes Aktivitätsmuster der lumbalen Muskulatur während MVF im Vergleich zum Stand gekennzeichnet. Im Verlauf der Studie konnte keine prozentuale Reduktion der Amplitudenhöhe während der MVF beobachtet werden, welche unter das Ausgangsniveau sank (+14,05 % links, +5,58 % rechts). Aufgrund einer verhältnismäßig größeren prozentualen Zunahme der Amplituden im Stand, wird dennoch ein Flexions-Relaxations-Phänomen erreicht. Die aus den Amplituden während der dynamischen Bewegungsabfolge errechnete FRR sank um ca. 38 % links und 15 % rechts.

Standard der Studie war das zweimalige Durchführen einer MVF. Da es Daten gibt, die nahelegen, dass das häufigere Durchführen der Bewegungsabfolge das FRP Aktivitätsmuster signifikant verändert, kann davon ausgegangen werden, dass noch eindeutigere Ergebnisse für die FRR bei einer größeren Anzahl an Wiederholungen der Bewegungsabfolge hätten erzielt werden können (Dickey et al., 2003).

Dennoch spricht die Tendenz der gemessenen Veränderungen für eine erfolgreiche Intervention.

Zu 3.: Welche Auswirkungen auf die gesundheitspezifische Lebensqualität der Patienten hat die Intervention?

Sowohl für den EQ-5D als auch den COMI konnten signifikante Verbesserungen der Scores im Studienverlauf gezeigt werden. Die durch den EQ-5D Index Score abgebildete globale gesundheitspezifische Lebensqualität der Patienten verbesserte sich im Studienverlauf signifikant von 0,701 auf 0,7995 ($p = 0,023$), was einer Verbesserung um ca. 14 % entspricht. Langfristig konnte eine signifikante Verbesserung um ca. 12 % auf 0,788 gemessen werden ($p = 0,011$).

Das durch den COMI abgebildete Outcome der Intervention ergab eine drastische signifikante Verbesserung um über 70 % von initial 8 auf 4,665 ($p = 0,001$) an t_3 . Hier konnte langfristig (t_4) eine um ca. 56 % verbesserte Patientenzufriedenheit gemessen werden (5,1; $p = 0,001$).

Die Wirksamkeit der endoskopischen Facettengelenksthermokoagulation als schmerztherapeutische Intervention, sowie deren positive Auswirkung auf die gesundheitspezifische Lebensqualität der Patienten konnte somit bestätigt werden.

5. Zusammenfassung

Die Lendenwirbelsäule ist mit etwa 70 % der Hauptentstehungsort chronischer Rückenschmerzen. Sie sind meist multifaktorieller Genese, wobei Degenerationen der Facettengelenke mit bis zu 40 % ursächlich für die Schmerzentstehung sind.

Die Wirksamkeit einer endoskopischen Facettengelenksthermokoagulation und Facettekтомie wurden in dieser prospektiven klinischen Studie untersucht. Dafür wurden Ergebnisse der Oberflächenelektromyographie der Mm. multifidii sowie standardisierte Fragebögen zur gesundheitsspezifischen Lebensqualität ausgewertet.

In die Studie wurden 36 Patienten eingeschlossen. An den Untersuchungszeitpunkten t_0 (präoperativ), t_1 (postoperativ), t_2 (6-Wochen-Follow-Up) und t_3 (12-Wochen-Follow-Up) wurden EMG-Daten einer dynamischen Bewegungsabfolge erhoben und einer Amplitudenanalyse unterzogen. Außerdem wurde die Fähigkeit der Patienten ein Flexions-Relaxations-Phänomen zu erreichen untersucht.

Für den aufrechten Stand konnte nach anfänglicher Reduktion der Amplituden an t_1 und t_2 eine Steigerung der Amplituden an t_3 um ca. 25 % links und 1,5 % rechts im Vergleich zum präoperativen Zustand gezeigt werden. Hieraus lässt sich eine erfolgreiche Regeneration der lumbalen Haltemuskulatur, sowie eine Wirksamkeit der multimodalen Therapie in Bezug auf den Muskelaufbau erkennen. In der maximalen Vorbeuge lässt sich an t_3 ebenfalls eine Steigerung der Amplituden zeigen, insgesamt ist diese jedoch geringer als im Stand, sodass sich ein Aktivitätsmuster ergibt, was dem eines gesunden Patienten eher entspricht. Dies lässt sich an den errechneten Flexions-Relaxations-Ratios veranschaulichen.

Die aus den Amplituden abgeleitete Flexions-Relaxations-Ratio sank im Studienverlauf links um 38 % und rechts um 15 %.

Die Ergebnisse sprechen für eine objektivierbare Verbesserung des lumbalen Aktivitätsmusters im EMG, im Sinne eines Angleichens des pathologischen Musters an das von gesunden Personen.

Die zeitgleich zu den EMG-Messungen erhobenen Scores zur gesundheitspezifischen Lebensqualität verbesserten sich signifikant. Nach 12 Wochen wurde eine globale gesundheitspezifische Lebensqualitätsverbesserung von ca. 14 % erhoben, die Rückenschmerz spezifische Lebensqualität verbesserte sich um über 70 %.

Nach ca. 2 Jahren konnte weiterhin eine gesamtgesundheitsspezifische Lebensqualitätsverbesserung von ca. 12 % festgestellt werden. Das Outcome des rüchenspezifischen Scores lag immer noch bei einer 56 %-igen Verbesserung im Vergleich zu t_0 .

Die endoskopische Facettengelenksthermokoagulation als schmerztherapeutische Intervention für Patienten mit chronischen unspezifischen Rückenschmerzen konnte demnach sowohl als kurz- als auch langfristig wirksame Therapieoption bestätigt werden.

6. Anhang

Tabellen zur Messübersicht

Tab. 5: Messdatenübersicht zur NRS.

Numerische Rangskala (NRS)								
NRS Rücken								
t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
0	34	8	5	10	7	8	1,0000	
1	27	7	2	10	6	9	3,0000	0,048
2	9	7	4	8	5,5	7,5	2,0000	0,031
3	16	6	2	8	3	7	4,0000	0,001
NRS Bein								
t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
0	34	7	0	10	5	8	3,0000	
1	27	7	0	10	3	8	5,0000	0,917
2	9	6	2	9	4,5	8	3,5000	0,943
3	16	5	0	8	3	6,75	3,7500	0,036

Tab. 6: Messdatenübersicht der Index Scores.

Index Scores zur gesundheitsspezifischen Lebensqualität								
EQ-5D								
t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
0	33	0,7010	0,18	0,88	0,2620	0,7880	0,5260	
1	27	0,7880	0,20	1,00	0,7010	0,8130	0,1120	0,023
2	9	0,7880	0,70	0,89	0,7880	0,8325	0,0445	0,223
3	16	0,7995	0,20	0,89	0,7228	0,8870	0,1643	0,023
4	21	0,78800	0,262	1,000	0,61300	0,83150	0,2185	0,011
COMI								
t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
0	33	8,0000	4,50	10,00	6,1250	8,8300	2,7050	
1	27	6,9200	3,25	9,83	5,5800	8,5000	2,9200	0,026
2	9	7,0000	3,58	9,25	4,4200	7,7100	3,2900	0,066
3	16	4,6650	1,58	8,83	2,6475	7,7300	5,0825	0,001
4	21	5,10000	0,700	9,420	4,50000	7,79000	3,2900	0,001

Tab. 7: Messdatenübersicht zur EMG-Messung: Amplitudenanalyse.

Amplitudenänderung li Stand (%)

t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
t0 bis t1	17	-17,9700	-83,29	139,46	-57,5550	10,6150	68,1700	
t0 bis t2	9	-7,0200	-53,17	254,41	-24,3900	79,1550	103,5450	0,249
t0 bis t3	10	25,8675	-33,89	428,43	-25,8675	110,5800	136,4475	0,043

Amplitudenänderung re Stand (%)

t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
t0 bis t1	17	-13,530	-82,90	83,76	-30,1750	18,1200	48,2950	
t0 bis t2	9	-15,330	-84,98	176,35	-40,0150	-15,3300	24,6850	0,463
t0 bis t3	10	1,4550	-68,87	322,46	-14,1325	1,4550	15,5875	0,043

Amplitudenänderung li MVF (%)

t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
t0 bis t1	17	-16,7500	-50,43	350,98	-38,0150	42,8300	80,8450	
t0 bis t2	9	-17,9000	-83,67	479,33	-56,1350	189,4950	245,6300	0,753
t0 bis t3	10	14,0550	-83,88	488,94	-79,3125	165,8325	245,1450	0,893

Amplitudenänderung re MVF (%)

t	n	Median	Min.	Max.	1. Quartil	2. Quartil	IQA	p
t0 bis t1	17	-4,1500	-56,58	315,97	-28,0450	15,1300	43,1750	
t0 bis t2	9	-6,9000	-84,66	472,69	-54,9550	54,7300	109,6850	0,06
t0 bis t3	10	5,5800	-85,67	189,15	-59,4900	5,5800	65,0700	0,89

Spine Tango COMI Patienten - Selbsteinschätzung



Rücken 2008

Anweisungen

- Benutzen Sie einen weichen #2 Bleistift zur Markierung.
- Pro Frage ist nur eine Antwort erlaubt.
- Felder sind komplett auszufüllen.
- Pflichtangaben

Kompatibel mit SGS-SWISSpine Register

Nur zum internen Gebrauch! Nicht vom Scanner getrennen!

Nachname	Vorname	Geschlecht
Strasse		Platz, Nr.
Land	Postleitzahl	Wohnort
Sozialversicherungsnummer (AHV)		Geburtsdag (TT.MM.JJJJ)

Untersuchungsintervall

- | | | | |
|--|-----------------------------------|--|---|
| <input type="checkbox"/> vor Operation | <input type="checkbox"/> 3 Monate | <input type="checkbox"/> 2 Jahre | |
| <input type="checkbox"/> 4 Wochen | <input type="checkbox"/> 6 Monate | <input type="checkbox"/> 3 Jahre | |
| <input type="checkbox"/> 6 Wochen | <input type="checkbox"/> 9 Monate | <input type="checkbox"/> 4 Jahre | |
| <input type="checkbox"/> 2 Monate | <input type="checkbox"/> 1 Jahr | <input type="checkbox"/> 5 Jahre | |
| | | <input type="checkbox"/> anderes Jahre | z.B. 4 Monate
= 4Mon/12Mon
= 0.33 Jahre |

Rückenbeschwerden können zu Rückenschmerzen und/oder Schmerzen im Gesäss, Bein oder Fuss sowie zu Kribbeln, Taubheit oder anderen Missempfindungen im Rücken, Gesäss, Bein oder Fuss führen.

1 Welche Beschwerden belasten Sie **am stärksten**? Bitte **nur ein Kästchen** ausfüllen.

- Schmerzen im Rücken
 Schmerzen im Bein/Gesäss
 Kribbeln, Taubheit oder andere Missempfindungen im Rücken/Bein/Gesäss
 Keine der aufgeführten Beschwerden

2 Bitte füllen Sie in Frage 2a und 2b das Kästchen aus, das der Intensität Ihrer Schmerzen entspricht, wobei "0" keine Schmerzen und "10" stärkste vorstellbare Schmerzen bedeutet. Wir bitten Sie, **zwischen Rücken- und Beinschmerzen zu unterscheiden**.

2a Wie stark waren Ihre **Rückenschmerzen** in der letzten Woche?

- | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| keine Schmerzen | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | stärkste Schmerzen, die ich mir vorstellen kann |
| <input type="checkbox"/> | |

2b Wie stark waren Ihre **Bein-/Gesässschmerzen** in der letzten Woche?

- | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| keine Schmerzen | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | stärkste Schmerzen, die ich mir vorstellen kann |
| <input type="checkbox"/> | |

3 Wie stark haben Ihre Rückenbeschwerden Ihre **normalen Aufgaben** (Arbeit und zu Hause) in der letzten Woche beeinträchtigt?

- gar nicht
 ein wenig
 mässig
 erheblich
 sehr stark

4 Wie würden Sie sich fühlen, wenn Sie den **Rest Ihres Lebens** mit Ihren derzeitigen Rückenbeschwerden leben müssten?

- sehr zufrieden
 etwas zufrieden
 weder zufrieden noch unzufrieden
 etwas unzufrieden
 sehr unzufrieden

5 Bitte blicken Sie **auf die letzte Woche** zurück. Wie würden Sie Ihre Lebensqualität beurteilen?

- sehr gut
 gut
 mittelmässig
 schlecht
 sehr schlecht

Bitte wenden...

Abb. 31: Verwendete Fragebogen Version COMI, Seite 1 (EuroSpine, 2020).

EuroQol EQ-5D

Patientenfragebogen

Anweisungen

- Benutzen Sie einen weichen #2 Bleistift zur Markierung
- Alle Fragen beantworten falls kein anderer Vermerk.
- Felder sind komplett auszufüllen.

Fragestypen

nur 1 Antwort erlaubt

mehrere Antworten erlaubt

Nachname	Vorname	Geschlecht
Strasse		Plat. Nr.
Postleitzahl	Wohnort	
Beruf	Geburtsdag (TT.MM.JJJJ)	Telefon

Nur zum internen Gebrauch. Nicht vom Benutzer gesehen.

Gesundheit

Untersuchungsdatum

Tag (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (0) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (0) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (0) (1) (2)

Monat (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (0) (1) (2)

Jahr (0) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (0) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (0)

Untersuchungszeitpunkt (nach Eingriff)

<input type="radio"/> vor Eingriff	<input type="radio"/> 4 Jahre	<input type="radio"/> 11 Jahre
<input type="radio"/> 6 Wochen	<input type="radio"/> 5 Jahre	<input type="radio"/> 12 Jahre
<input type="radio"/> 3 Monate	<input type="radio"/> 6 Jahre	<input type="radio"/> 13 Jahre
<input type="radio"/> 6 Monate	<input type="radio"/> 7 Jahre	<input type="radio"/> 14 Jahre
<input type="radio"/> 9 Monate	<input type="radio"/> 8 Jahre	<input type="radio"/> 15 Jahre
<input type="radio"/> 1 Jahr	<input type="radio"/> 9 Jahre	<input type="radio"/> > 15 Jahre
<input type="radio"/> 2 Jahre	<input type="radio"/> 10 Jahre	
<input type="radio"/> 3 Jahre		

Bitte geben Sie an, welche Aussagen Ihren heutigen Gesundheitszustand am besten beschreiben:

Beweglichkeit/ Mobilität

- ich habe keine Probleme herumzugehen
- ich habe einige Probleme herumzugehen
- ich bin ans Bett gebunden

Für sich selbst sorgen

- ich habe keine Probleme, für mich selbst zu sorgen
- ich habe einige Probleme, mich selbst zu waschen oder mich anzuziehen
- ich bin nicht in der Lage, mich selbst zu waschen oder anzuziehen

Allgemeine Tätigkeiten

- ich habe keine Probleme, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen
- ich habe einige Probleme, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen
- ich bin nicht in der Lage, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen

Schmerzen/ körperliche Beschwerden

- ich habe keine Schmerzen oder Beschwerden
- ich habe einige Schmerzen oder Beschwerden
- ich habe extreme Schmerzen oder Beschwerden

Angst/ Niedergeschlagenheit

- ich bin nicht ängstlich oder deprimiert
- ich bin mässig ängstlich oder deprimiert
- ich bin extrem ängstlich oder deprimiert

Visuelle Analogskala (VAS) zum Gesundheitszustand

Bitte kreuzen Sie die Stelle auf der Linie an, die Ihren Gesundheitszustand am besten beschreibt.

Schlechtest denkbarer Gesundheitszustand	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="flex: 1; border-bottom: 1px solid black; position: relative;"> <div style="position: absolute; top: -5px; left: 0; right: 0; border-top: 1px solid black;"></div> </div> </div>	Best denkbarer Gesundheitszustand
	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 80%; margin: 0 auto;"> () </div>	

Abb. 33: Verwendete Fragebogen Version des EQ-5D 3L (EuroQol, 2020).

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Skizze eines LWK in lateraler Ansicht (A) und cranialer Ansicht (B)	14
Abbildung 2: Schematische Skizze der Facettengelenksinnervation	16
Abbildung 3: Anatomische Präparation des rechten M. multifidus in der LWS.....	19
Abbildung 4: Schematischer Querschnitt durch die lumbale Wirbelsäule 1	20
Abbildung 5: Schematischer Querschnitt durch die lumbale Wirbelsäule 2	23
Abbildung 6: Lumbale Wirbelsäule in a.-p.-Projektion. Korrekte Positionierung des Trokars.....	28
Abbildung 7: A: Intraoperativer Blick während der Thermokoagulation. B: nach der Denervation.....	28
Abbildung 8: Schematische Darstellung eines AP	31
Abbildung 9: Depolarisation der Zellmembran (A) und Modell eines wandernden Dipols auf der Muskelfasermembran (B).....	32
Abbildung 10: Standard-Amplitudenparameter auf Grundlage des korrigierten EMG-Signals	34
Abbildung 11: Projektion der Oberflächenelektroden auf die anatomische Präparation des M. multifidus der LWS	42
Abbildung 12: Platzierung der Oberflächenelektroden am Probanden über den Mm. multifidii und angeschlossene Wireless-EMG-Sensoren.....	42
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Bewegungsablaufs während der Flexions-Relaxations-Messung.....	44
Abbildung 14: Beispielproband in Ausgangsposition der Flexions-Relaxations-Messung mit befestigten EMG-Elektroden. Aufrechter, entspannter Stand.....	45
Abbildung 15: MVF demonstriert vom Beispielprobanden mit befestigten EMG-Elektroden.....	45
Abbildung 16: Roh-EMG-Aufzeichnung mit EKG-Störspitzen im Ruhezustand	50
Abbildung 17: Beispielhafter Screenshot der RMS-EMG-Signale während der Flexions-Relaxations-Messung.....	51
Abbildung 18: Beispielhafter Noraxon EMG-Analyse-Report der Flexions-Relaxation-Messung aus MyoResearch 3.....	52

Abbildung 19: Übersicht über die Anzahl der genutzten alternativen Therapieoptionen des Patientenkollektivs.....	57
Abbildung 20: Absolute Anzahl der ausgewerteten Fragebögen t_0 bis t_4	58
Abbildung 21: Box-Whisker-Plots der NRS des Rückens für die unterschiedlichen Erhebungszeitpunkte.	59
Abbildung 22: Box-Whisker-Plots der EQ-5D Index Scores für die unterschiedlichen Erhebungszeitpunkte	61
Abbildung 23: Box-Whisker-Plots der COMI Scores des Gesamtgesundheitszustandes der Patienten an den Zeitpunkten der Fragebogenerhebungen.....	62
Abbildung 24: Absolute Zahlen der durchgeführten EMG-Messungen t_0 bis t_3	63
Abbildung 25: Box-Whisker-Plots der intraindividuellen Amplitudenänderung in Prozent im entspannten Stand links	64
Abbildung 26: Box-Whisker-Plots der Amplitudenänderung des linken M. multifidus lumborum während MVF in Prozent.....	65
Abbildung 27: Box-Whisker-Plots der intraindividuellen Amplitudenänderung in Prozent im entspannten Stand rechts.	66
Abbildung 28: Box-Whisker-Plots der Amplitudenänderung des rechten M. multifidus lumborum während MVF in Prozent.....	66
Abbildung 29: Box-Whisker-Plots der FRR links	68
Abbildung 30: Box-Whisker-Plots der FRR rechts.....	69
Abbildung 31: Verwendete Fragebogen Version COMI, Seite 1	90
Abbildung 32: Verwendete Fragebogen Version COMI, Seite 2	91
Abbildung 33: Verwendete Fragebogen Version des EQ-5D 3L	92

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Systeme des M. erector spinae.	17
Tabelle 2: Begriffserklärungen degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen.	21
Tabelle 3: Übersicht über die Untersuchungszeitpunkte und ihre erhobenen Inhalte....	40
Tabelle 4: Mittelwerte mit Standardabweichung der demografischen Daten des Gesamtkollektivs	55
Tabelle 5: Messdatenübersicht zur NRS	88
Tabelle 6: Messdatenübersicht der Index Scores.....	88
Tabelle 7: Messdatenübersicht zur EMG-Messung: Amplitudenanalyse.....	89

9. Literaturverzeichnis

Ahern DK, Follick MJ, Council JR, Laser-Wolston N, Litchman H. Comparison of lumbar paravertebral EMG patterns in chronic low back pain patients and non-patient controls. *Pain*. 1988; 34(2):153-160

Ali MN, Sethi K, Noohu MM. Comparison of two mobilization techniques in management of chronic non-specific low back pain. *J Bodyw Mov Ther*. 2019; 23(4): 918-923

Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*. 2008; 88(1): 287-332

Alschuler KN, Neblett R, Wiggert E, Haig AJ, Geisser ME. Flexion-relaxation and clinical features associated with chronic low back pain: A comparison of different methods of quantifying flexion-relaxation. *Clin J Pain*. 2009; 25(9): 760-766

Ambroz C, Scott A, Ambroz A, Talbott EO. Chronic low back pain assessment using surface electromyography. *J Occup Environ Med*. 2000; 42(6): 660-669

Arbeitsmedizinische S2k-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM) und der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), 2013: Oberflächenelektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft. https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/002-016l_S2k_Oberflaechen_Elektromyographie_2013-03-abgelaufen.pdf (Zugriffsdatum: 28.10.2020)

Aumüller G, Aust G, Doll A, Engele J, Kirsch J, Mense S, Reißig D, Salvetter J, Schmidt W, Schmitz F, Schulte E, Spanel-Borowski K, Wolff W, Wurzinger LJ, Zilch H-G. *Duale Reihe Anatomie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2010

Benninghoff A, Drenckhahn D, Waschke J. *Taschenbuch der Anatomie*. München: Elsevier, Urban & Fischer, 2008

Bernard TN Jr, Kirkaldy-Willis WH. Recognizing specific characteristics of nonspecific low back pain. *Clin Orthop Relat Res*. 1987; (217): 266-280

Berven S, Tay BB, Colman W, Hu SS. The lumbar zygapophyseal (facet) joints: a role in the pathogenesis of spinal pain syndromes and degenerative spondylolisthesis. *Semin Neurol.* 2002; 22(2): 187-196

Binder DS, Nampiaparampil DE. The provocative lumbar facet joint. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2009; 2(1): 15-24

Bischoff C, Schulte.-Mattler W. *Das EMG-Buch. EMG und periphere Neurologie in Frage und Antwort.* Stuttgart: Thieme Verlag, 2015

Bogduk N, Dreyfuss P, Govind J. A narrative review of lumbar medial branch neurotomy for the treatment of back pain. *Pain Med.* 2009; 10(6): 1035-1045

Chen WY, Wang K, Yuan WA, Zhan HS. [Relationship between lumbosacral multifidus muscle and lumbar disc herniation]. *Zhongguo Gu Shang.* 2016; 29(6): 581-584

Chenot JF, Greitemann B, Kladny B, Petzke F, Pflingsten M, Schorr SG. Non-Specific Low Back Pain. *Dtsch Arztebl Int.* 2017; 114(51-52): 883-890

Chowdhury RH, Reaz MB, Ali MA, Bakar AA, Chellappan K, Chang TG. Surface electromyography signal processing and classification techniques. *Sensors (Basel).* 2013; 13(9): 12431-12466

Cohen SP, Raja SN. Pathogenesis, diagnosis, and treatment of lumbar zygapophysial (facet) joint pain. *Anesthesiology.* 2007; 106(3): 591-614

Cohen SP, Williams KA, Kurihara C, Nguyen C, Shields C, Kim P, Griffith SR, Larkin TM, Crooks M, Williams N, Morlando B, Strassels SA. Multicenter, randomized, comparative cost-effectiveness study comparing 0, 1, and 2 diagnostic medial branch (facet joint nerve) block treatment paradigms before lumbar facet radiofrequency denervation. *Anesthesiology.* 2010; 113(2): 395-405

Colloca CJ, Hinrichs RN. The biomechanical and clinical significance of the lumbar erector spinae flexion-relaxation phenomenon: a review of literature. *J Manipulative Physiol Ther.* 2005; 28(8): 623-631

Coyle PC, Velasco T, Sions JM, Hicks GE. Lumbar Mobility and Performance-Based Function: An Investigation in Older Adults with and without Chronic Low Back Pain. *Pain Med.* 2017; 18(1): 161-168

Cretoiu D, Pavelescu L, Duica F, Radu M, Suciu N, Cretoiu SM. Myofibers. *Adv Exp Med Biol.* 2018; 1088: 23-46

Curtis L, Shah N, Padalia D. Facet Joint Disease. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2020

Dahm KT, Brurberg KG, Jamtvedt G, Hagen KB. Advice to rest in bed versus advice to stay active for acute low-back pain and sciatica. *Cochrane Database Syst Rev.* 2010; (6): CD007612

De Luca CJ, Hostage EC. Relationship between firing rate and recruitment threshold of motoneurons in voluntary isometric contractions. *J Neurophysiol.* 2010 Aug; 104(2): 1034-1046

Dickey JP, McNorton S, Potvin JR. Repeated spinal flexion modulates the flexion-relaxation phenomenon. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2003; 18(9): 783-789

Draguhn, A. Membranpotenzial und Signalübertragung in Zellverbänden. In Pape H-C, Kurtz A, Silbernagel S, Hrsg. *Physiologie.* Stuttgart: Thieme Verlag, 2014: 86-125

Du S, Hu L, Bai Y, Dong J, Jin S, Zhang H, Zhu Y. The Influence of Self-Efficacy, Fear-Avoidance Belief, and Coping Styles on Quality of Life for Chinese Patients with Chronic Nonspecific Low Back Pain: A Multisite Cross-Sectional Study. *Pain Pract.* 2018; 18(6): 736-747

EQ-5D, 2020. <https://euroqol.org/eq-5d-instruments/3l-vs-5l/comparing-eq-5d-3l-and-eq-5d-5l-value-sets/> (Zugriffsdatum: 16.11.2020)

Euro Spine Forms, 2020. <https://www.eurospine.org/forms.htm> (Zugriffsdatum: 08.11.2020)

Falco FJ, Manchikanti L, Datta S, Sehgal N, Geffert S, Onyewu O, Singh V, Bryce DA, Benyamin RM, Simopoulos TT, Vallejo R, Gupta S, Ward SP, Hirsch JA. An update of the systematic assessment of the diagnostic accuracy of lumbar facet joint nerve blocks. *Pain Physician*. 2012; 15(6): E869-907

Finch AP, Dritsaki M, Jommi C. Generic Preference-based Measures for Low Back Pain: Which of Them Should Be Used? *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016; 41(6): E364-74.

Floyd WF, Silver PH. Function of erector spinae in flexion of the trunk. *Lancet*. 1951; 1(6647): 133-134

Fortin M, Yuan Y, Battié MC. Factors associated with paraspinal muscle asymmetry in size and composition in a general population sample of men. *Phys Ther*. 2013; 93(11): 1540-1550.

Frisch, H. *Programmierte Therapie am Bewegungsapparat*. Heidelberg: Springer Verlag. 1996

Fujiwara A, Lim TH, An HS, Tanaka N, Jeon CH, Andersson GB, Haughton VM. The effect of disc degeneration and facet joint osteoarthritis on the segmental flexibility of the lumbar spine. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000; 25(23): 3036-3044

Gellhorn AC, Katz JN, Suri P. Osteoarthritis of the spine: the facet joints. *Nat Rev Rheumatol*. 2013; 9(4): 216-224

Gibson DA, Ma L. Developmental regulation of axon branching in the vertebrate nervous system. *Development*. 2011; 138(2): 183-195

Goldthwait, J. The lumbosacral articulation: an explanation of many cases of lumbago, sciatica and paraplegia. *Bost. Med. & Surg. J*. 1911: 365-372

Gouteron A, Tabard-Fougère A, Bourredjem A, Casillas JM, Armand S, Genevay S. The flexion relaxation phenomenon in nonspecific chronic low back pain: prevalence, reproducibility and flexion-extension ratios. A systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J*. 2022 Jan; 31(1):136-151

Grgić V. Lumbosakralni fasetni sindrom: funkcijski i organski poremećaji lumbosakralnih fasetnih zglobova [Lumbosacral facet syndrome: functional and organic disorders of lumbosacral facet joints]. *Lijec Vjesn.* 2011; 133(9-10): 330-336

Hawker GA, Mian S, Kendzerska T, French M. Measures of adult pain: Visual Analog Scale for Pain (VAS Pain), Numeric Rating Scale for Pain (NRS Pain), McGill Pain Questionnaire (MPQ), Short-Form McGill Pain Questionnaire (SF-MPQ), Chronic Pain Grade Scale (CPGS), Short Form-36 Bodily Pain Scale (SF-36 BPS), and Measure of Intermittent and Constant Osteoarthritis Pain (ICOAP). *Arthritis Care Res (Hoboken).* 2011; 63(11): 240-252

Heckman CJ, Enoka RM. Motor unit. *Compr Physiol.* 2012; 2(4): 2629-2682

Heneweer H, Vanhees L, Picavet HS. Physical activity and low back pain: a U-shaped relation? *Pain.* 2009; 143(1-2): 21-25

Hestbaek L, Leboeuf-Yde C, Manniche C. Low back pain: what is the long-term course? A review of studies of general patient populations. *Eur Spine J.* 2003; 12(2): 149-165

Hides J, Gilmore C, Stanton W, Bohlscheid E. Multifidus size and symmetry among chronic LBP and healthy asymptomatic subjects. *Man Ther.* 2008; 13(1): 43-49

Hides JA, Richardson CA, Jull GA. Multifidus muscle recovery is not automatic after resolution of acute, first-episode low back pain. *Spine (Phila Pa 1976).* 1996; 21(23): 2763-2769

Hoffman BM, Papas RK, Chatkoff DK, Kerns RD. Meta-analysis of psychological interventions for chronic low back pain. *Health Psychol.* 2007; 26(1): 1-9

Hoffmann CH, Scholz M, Kandziora F. Indikationen zur Korrekturspondylodese bei degenerativer Spondylolisthesis. *Z Orthop Unfall.* 2016; 154(1): 85-97

Horn ME, Bishop MD. Flexion Relaxation Ratio Not Responsive to Acutely Induced Low Back Pain from a Delayed Onset Muscle Soreness Protocol. *ISRN Pain.* 2013; 2013: 617-698

Igarashi A, Kikuchi S, Konno S, Olmarker K. Inflammatory cytokines released from the facet joint tissue in degenerative lumbar spinal disorders. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2004; 29(19): 2091-2095

Jeong SY, Kim JS, Choi WS, Hur JW, Ryu KS. The effectiveness of endoscopic radiofrequency denervation of medial branch for treatment of chronic low back pain. *J Korean Neurosurg Soc*. 2014; 56(4): 338-343

Johnson C. Measuring Pain. Visual Analog Scale Versus Numeric Pain Scale: What is the Difference? *J Chiropr Med*. 2005; 4(1): 43-44

Kalichman L, Li L, Kim DH, Guermazi A, Berkin V, O'Donnell CJ, Hoffmann U, Cole R, Hunter DJ. Facet joint osteoarthritis and low back pain in the community-based population. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2008; 33(23): 2560-2565

Kamen G, Caldwell GE. Physiology and interpretation of the electromyogram. *J Clin Neurophysiol*. 1996; 13(5): 366-384

Kapetanakis S, Gkantsinikoudis N, Papathanasiou JV, Charitoudis G, Thomaidis T. Percutaneous endoscopic ventral facetectomy: An innovative substitute of open decompression surgery for lateral recess stenosis surgical treatment? *J Craniovertebr Junction Spine*. 2018; 9(3): 188-195

Kazamel M, Warren PP. History of electromyography and nerve conduction studies: A tribute to the founding fathers. *J Clin Neurosci*. 2017; 43: 54-60

Kim DH, Kim KH, Kim YC. *Minimally Invasive Percutaneous Spinal Techniques* E-book. Elsevier. 2010

Kong YS, Park S, Kweon MG, Park JW. Change in trunk muscle activities with prone bridge exercise in patients with chronic low back pain. *J Phys Ther Sci*. 2016; 28(1): 264-268

König HH, Bernert S, Angermeyer MC. Gesundheitszustand der deutschen Bevölkerung: Ergebnisse einer repräsentativen Befragung mit dem EuroQol-Instrument Gesundheitswesen. 2005; 67(3): 173-182

Konrad, P. EMG-Fibel: eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie. Köln: Velamed GmbH, 2011

Kraft T, Brenner B. Muskulatur. In Pape H-C, Kurtz A, Silbernagl S, Hrsg., Physiologie Stuttgart: Thieme Verlag, 2014: 133-155

La Touche R, Pérez-Fernández M, Barrera-Marchessi I, López-de-Uralde-Villanueva I, Villafañe JH, Prieto-Aldana M, Suso-Martí L, Paris-Aleman A. Psychological and physical factors related to disability in chronic low back pain. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2019; 32(4): 603-611

Mainka T, Lemburg SP, Heyer CM, Altenscheidt J, Nicolas V, Maier C. Association between clinical signs assessed by manual segmental examination and findings of the lumbar facet joints on magnetic resonance scans in subjects with and without current low back pain: a prospective, single-blind study. *Pain.* 2013; 154(9): 1886-1895

Manchikanti L, Manchikanti KN, Cash KA, Singh V, Giordano J. Age-related prevalence of facet-joint involvement in chronic neck and low back pain. *Pain Physician.* 2008; 11(1): 67-75

Manchikanti L, Manchikanti KN, Manchukonda R, Cash KA, Damron KS, Pampati V, McManus CD. Evaluation of lumbar facet joint nerve blocks in the management of chronic low back pain: preliminary report of a randomized, double-blind controlled trial: clinical trial NCT00355914. *Pain Physician.* 2007; 10(3): 425-440

Mannion AF, Vila-Casademunt A, Domingo-Sàbat M, Wunderlin S, Pellisé F, Bago J, Acaroglu E, Alanay A, Pérez-Grueso FS, Obeid I, Kleinstück FS; European Spine Study Group (ESSG). The Core Outcome Measures Index (COMI) is a responsive instrument for assessing the outcome of treatment for adult spinal deformity. *Eur Spine J.* 2016; 25(8): 2638-2648

Martinez-Valdes E, Negro F, Falla D, De Nunzio AM, Farina D. Surface electromyographic amplitude does not identify differences in neural drive to synergistic muscles. *J Appl Physiol* (1985). 2018; 124(4): 1071-1079

Massé-Alarie H, Beaulieu LD, Preuss R, Schneider C. The side of chronic low back pain matters: evidence from the primary motor cortex excitability and the postural adjustments of multifidi muscles. *Exp Brain Res*. 2017; 235(3): 647-659

Mayer TG, Neblett R, Brede E, Gatchel RJ. The quantified lumbar flexion-relaxation phenomenon is a useful measurement of improvement in a functional restoration program. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009; 34(22): 2458-2465

McLain RF, Pickar JG. Mechanoreceptor endings in human thoracic and lumbar facet joints. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1998; 23(2): 168-173

Menorca RM, Fussell TS, Elfar JC. Nerve physiology: mechanisms of injury and recovery. *Hand Clin*. 2013; 29(3): 317-330

Merletti R, Muceli S. Tutorial. Surface EMG detection in space and time: Best practices. *J Electromyogr Kinesiol*. 2019; 49: 102363

Meucci RD, Fassa AG, Faria NM. Prevalence of chronic low back pain: systematic review. *Rev Saude Publica*. 2015; 49: 1

Mills SEE, Nicolson KP, Smith BH. Chronic pain: a review of its epidemiology and associated factors in population-based studies. *Br J Anaesth*. 2019; 123(2): e273-e283

Mukhtar S. Psychological health during the coronavirus disease 2019 pandemic outbreak. *Int J Soc Psychiatry*. 2020; 66(5): 512-516

Mulhern B, O'Gorman H, Rotherham N, Brazier J. Comparing the measurement equivalence of EQ-5D-5L across different modes of administration. *Health Qual Life Outcomes*. 2015; 13: 191

Nadeem B, Bacha R, Gilani SA. Correlation of Subcutaneous Fat Measured on Ultrasound with Body Mass Index. *J Med Ultrasound*. 2018; 26(4): 205-209

Nationale Versorgungsleitlinie Nicht-spezifischer Kreuzschmerz, 2017: NVL Nichtspezifischer Kreuzschmerz. <https://www.leitlinien.de/nvl/html/kreuzschmerz/kapitel-2/#> (Zugriffsdatum: 19.10.2020)

Navarro X, Vivó M, Valero-Cabré A. Neural plasticity after peripheral nerve injury and regeneration. *Prog Neurobiol.* 2007; 82(4): 163-201

Neblett R, Brede E, Mayer TG, Gatchel RJ. What is the best surface EMG measure of lumbar flexion-relaxation for distinguishing chronic low back pain patients from pain-free controls? *Clin J Pain.* 2013; 29(4): 334-340

Neblett R, Mayer TG, Gatchel RJ, Keeley J, Proctor T, Anagnostis C. Quantifying the lumbar flexion-relaxation phenomenon: theory, normative data, and clinical applications. *Spine (Phila Pa 1976).* 2003 Jul 1; 28(13): 1435-1446

Niemeläinen R, Briand MM, Battié MC. Substantial asymmetry in paraspinal muscle cross-sectional area in healthy adults questions its value as a marker of low back pain and pathology. *Spine (Phila Pa 1976).* 2011; 36(25): 2152-2157

Niethard FU, Pfeil J. *Duale Reihe Orthopädie und Unfallchirurgie.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2017

Nordander C, Willner J, Hansson GA, Larsson B, Unge J, Granquist L, Skerfving S. Influence of the subcutaneous fat layer, as measured by ultrasound, skinfold calipers and BMI, on the EMG amplitude. *Eur J Appl Physiol.* 2003; 89(6): 514-519

Oddsson LI, De Luca CJ. Activation imbalances in lumbar spine muscles in the presence of chronic low back pain. *J Appl Physiol (1985).* 2003; 94(4): 1410-1420

Ostermann G, Igressa A. Endoskopische Facettendenerverung. In Jerosch J, Hrsg., *Minimalinvasive Wirbelsäulenintervention.* Berlin: Springer Verlag. 2019: 147-155

Othman S.H., Ibrahim F., Omar S.Z., Rahim R.B.A. Flexion Relaxation Phenomenon of Back Muscles in Discriminating Between Healthy and Chronic Low Back Pain Women. In: Abu Osman N.A., Ibrahim F., Wan Abas W.A.B., Abdul Rahman H.S., Ting HN, eds, 4th Kuala Lumpur International Conference on Biomedical Engineering 2008. IFMBE Proceedings, vol 21. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008: 199-203

Paulsen F, Waschke J. *Sobotta Allgemeine Anatomie und Bewegungsapparat.* München: Urban und Fischer, 2017

Payakachat N, Ali MM, Tilford JM. Can The EQ-5D Detect Meaningful Change? A Systematic Review. *Pharmacoeconomics*. 2015; 33(11): 1137-1154

Peek K, Carey M, Mackenzie L, Sanson-Fisher R. Patient adherence to an exercise program for chronic low back pain measured by patient-report, physiotherapist-perception and observational data. *Physiother Theory Pract*. 2019; 35(12): 1304-1313

Perolat R, Kastler A, Nicot B, Pellat JM, Tahon F, Attye A, Heck O, Boubagra K, Grand S, Krainik A. Facet joint syndrome: from diagnosis to interventional management. *Insights Imaging*. 2018; 9(5): 773-789

Pochon L, Kleinstück FS, Porchet F, Mannion AF. Influence of gender on patient-oriented outcomes in spine surgery. *Eur Spine J*. 2016; 25(1): 235-246

Pouretzad M, Salehi R, Negahban H, Yazdi MJS, Mehravar M. Effects of cognitive loading on lumbar flexion relaxation phenomenon in healthy people. *J Phys Ther Sci*. 2018; 30(6): 744-747

Pschyrembel Online 2017. Arthrose. <https://www.pschyrembel.de/Arthrose/K02XU> (Zugriffsdatum: 26. Oktober 2020)

Rabin R, de Charro F. EQ-5D: a measure of health status from the EuroQol Group. *Ann Med*. 2001; 33(5): 337-343

Rice DA, McNair PJ. Quadriceps arthrogenic muscle inhibition: neural mechanisms and treatment perspectives. *Semin Arthritis Rheum*. 2010; 40(3): 250-266

Robert-Koch-Institut, 2012. Rückenschmerzen. Gesundheitsberichterstattung des Bundes.

https://www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Gesundheitsberichterstattung/GBEDownloadsT/rueckenschmerzen.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum: 16.11.2020)

Robert-Koch-Institut, 2015: Gesundheit in Deutschland. Gesundheitsberichterstattung des Bundes. Gemeinsam getragen von RKI und Destatis. <http://www.gbe-bund.de/pdf/GESBER2015.pdf> (Zugriffsdatum: 29. September 2020)

- Rodríguez-Carreño I, Gila-Useros L, Malanda-Trigueros A. Motor Unit Action Potential Duration: Measurement and Significance, *Advances in Clinical Neurophysiology*. 2012
- Rubin DI. Needle electromyography: Basic concepts. *Handb Clin Neurol*. 2019; 160: 243-256
- Russo M, Deckers K, Eldabe S, Kiesel K, Gilligan C, Vieceli J, Crosby P. Muscle Control and Non-specific Chronic Low Back Pain. *Neuromodulation*. 2018; 21(1): 1-9
- Ryang Y-M, Pape H, Mayer B. Degenerative Lumbale Instabilität – Definition, klinische und radiologische Zeichen, Management. *Die Wirbelsäule* 01(02), 101-116
- Sackett DL, Rosenberg WM, Gray JA, Haynes RB, Richardson WS. Evidence based medicine: what it is and what it isn't. *BMJ*. 1996; 312(7023): 71-72
- Schmidt CO, Raspe H, 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 (Phila Pa 1976)*. 2007; 32(18): 2005-2011
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. Prometheus Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2014
- Selivanova A, Buskens E, Krabbe PFM. Head-to-Head Comparison of EQ-5D-3L and EQ-5D-5L Health Values. *Pharmacoeconomics*. 2018; 36(6): 715-725
- Slipman CW, Bhat AL, Gilchrist RV, Issac Z, Chou L, Lenrow DA. A critical review of the evidence for the use of zygapophysial injections and radiofrequency denervation in the treatment of low back pain. *Spine J*. 2003; (4): 310-316
- Stålberg E, van Dijk H, Falck B, Kimura J, Neuwirth C, Pitt M, Podnar S, Rubin DI, Rutkove S, Sanders DB, Sonoo M, Tankisi H, Zwartz M. Standards for quantification of EMG and neurography. *Clin Neurophysiol*. 2019; 130(9): 1688-1729
- Statistisches Bundesamt, 2020. 2015 2363-0001: Krankheitskosten: Deutschland, Jahre, Krankheitsdiagnosen (ICD-10)

<https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=23631-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1605534846552#abreadcrumb> (Zugriffsdatum: 16.11.2020)

Stelzeneder D, Trattnig S. Biochemische MR-bildgebung der bandscheibe und facettengelenke der wirbelsäuleRadiologe. 2010; 50(12): 1115-1119

Strohmenger L, Struwe C, Wirtz D, Pflugmacher R, Rommelspacher Y. Klinische Ergebnisse nach endoskopischer Facettengelenksthermokoagulation und Facettektomie. Z Orthop Unfall 2020, 158-159

Sung PS, Spratt KF, Wilder DG. A possible methodological flaw in comparing dominant and nondominant sided lumbar spine muscle responses without simultaneously considering hand dominance. Spine (Phila Pa 1976). 2004; 29(17): 1914-1922

Taylor AD, Bronks R, Bryant AL. The relationship between electromyography and work intensity revisited: a brief review with references to lacticacidosis and hyperammonia. Electromyogr Clin Neurophysiol. 1997; 37(7): 387-398

Trepel, M. Neuroanatomie, Struktur und Funktion. München: Elsevier GmbH, 2015

Ulfig, N. Kurzlehrbuch Embryologie. Stuttgart: Thieme Verlag, 2015

Walter SG, Schildberg FA, Rommelspacher Y. Endoscopic Sacrolumbar Facet Joint Denervation in Osteoarthritic and Degenerated Zygapophyseal Joints. Arthrosc Tech. 2018; 7(12): e1275-e1279

Watson PJ, Booker CK, Main CJ, Chen AC. Surface electromyography in the identification of chronic low back pain patients: the development of the flexion relaxation ratio. Clin Biomech (Bristol, Avon). 1997; 12(3): 165-171

Weber, M. Neuromuskuläre Regeneration nach lumbaler endoskopischer Facettengelenksthermokoagulation. Dissertationsschrift aus der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn (2020)

Whittaker RG. The fundamentals of electromyography. *Pract Neurol*. 2012; 12(3): 187-194

WHO, 2020. World Health Organization Europe: Body Mass Index - BMI. <https://www.euro.who.int/en/health-topics/disease-prevention/nutrition/a-healthy-lifestyle/body-mass-index-bmi> (Zugriffsdatum: 01.10.2020)

Yang M, Wang N, Xu X, Zhang Y, Xu G, Chang Y, Li Z. Facet joint parameters which may act as risk factors for chronic low back pain. *J Orthop Surg Res*. 2020; 15(1): 185

Yanik B, Keyik B, Conkbayir I. Fatty degeneration of multifidus muscle in patients with chronic low back pain and in asymptomatic volunteers: quantification with chemical shift magnetic resonance imaging. *Skeletal Radiol*. 2013; 42(6): 771-778

Yoshihara K, Shirai Y, Nakayama Y, Uesaka S. Histochemical changes in the multifidus muscle in patients with lumbar intervertebral disc herniation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001; 26(6): 622-626

Zhang S, Xu Y, Han X, Wu W, Tang Y, Wang C. Functional and Morphological Changes in the Deep Lumbar Multifidus Using Electromyography and Ultrasound. *Sci Rep*. 2018; 8(1): 6539

10. Danksagung

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. med. Robert Pflugmacher bedanken, der mich während der Zeit meiner Promotion begleitet und unterstützt hat.

Ich bedanke mich insbesondere bei dem weltbesten Betreuer Dr. med. Yorck Rommelspacher, ohne dessen Enthusiasmus und Begeisterung für die Sache ich diese Arbeit sicherlich niemals fertig gestellt hätte.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Sebastian Hebel und Dr. med. Tom Jansen für die gute Zusammenarbeit während der Durchführung und Datenerhebung der Studie. Mein Kommilitone Dr. Max Weber verdient ebenfalls ein ganz besonders großes Dankeschön.

Herrn Univ.-Prof. Dr. med. D. C. Wirtz, dem Direktor der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsklinik Bonn, möchte ich für die Übernahme meiner Doktorarbeit danken. Außerdem bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Universitätsklinik, insbesondere dem Team der Wirbelsäulenorthopädie für die nette und kollegiale Zusammenarbeit.

Herrn Dr. Julian A. Luetkens danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens dieser Arbeit.

Ich bin über die Maßen dankbar für meine Familie und Freunde, die immer an mich geglaubt haben und deren Zuspruch und Motivation mich dies auch selbst haben tun lassen. Dies gilt insbesondere für Nicolas Greiffenberg, Dr. Amelie Krause, Sophie Budde, und Dr. Lennart Wild.

Meinen Eltern bin ich für ihre uneingeschränkte Liebe dankbar, die mich maßgeblich zu dem Menschen gemacht hat, der ich bin.

Und danke Christian. Für Alles.