Muskuläre Atrophie bei lumbalen Bandscheibenvorfällen

– eine klinische und MRT-Studie

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. med.)
der Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Ilya Grossman
aus Petrosawodsk, Russland
2026

Angefertigt mit der Genehmigung

der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. em. Ulrich A. Wagner
2. Gutachter: Prof. Dr. Tim Guido Clarner
3. Gutachter: Prof. Dr. Henning Boecker

Tag der mündlichen Prüfung: 15.09.2026

Aus dem AMEOS Klinikum Geestland

Meiner Familie in Dankbarkeit gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis 7

1 Einleitung 10

1.1 Epidemiologie 10

1.2 Anatomie der lumbalen Wirbelsäule 12

1.3 Klinische Diagnostik lumbaler Bandscheibenvorfälle 15

1.4 Radiologische Diagnostik 19

1.4.1 Röntgendiagnostik 19

1.4.2 MRT-Diagnostik 20

1.5 Fragestellung der Dissertation 22

1.6 Gang der Untersuchung 24

1.7 Zielsetzung der Arbeit 25

2 Material und Methoden 26

2.1 Patientenauswahl und Ethikkommission 26

2.2 Erstellung der Datenbögen 27

2.3 Bildgebende Diagnostik 27

2.3.1 Hurxthal-Klassifikation und Auswertungen 27

2.3.2 Klassifikation von Bandscheibenvorfällen 29

2.3.3 Evaluation des Spinalkanals, der kleinen Wirbelgelenke und Foramina 30

2.3.4 MRT Berechnungen der Muskelumfänge der spinalen Muskulatur 32

2.4 Statistische Methoden 33

3 Ergebnisse 36

3.1 Beschreibung der Stichprobe 36

3.2 Radiologische Auswertung 41

3.3 Beantwortung der empirischen Forschungsfragen 48

3.4 Vorschlag für eine Klassifikation der lumbalen muskulären Atrophie (LMA) 61
3.5 Kasuistiken 64
3.6 Beantwortung der informationssystembezogenen Forschungsfrage 68
3.6.1 Vorschlag für ein digitales Informationssystem 68
3.6.2 CeHRes-Roadmap und Literaturüberblick 69
3.6.3 Prototyp einer mobilen Applikation 70
4 Diskussion 76
4.1 Diskussion epidemiologischer Parameter 76
4.2 Diskussion der Resultate aus den Fragen 2-5 78
4.3 Diskussion der Röntgenauswertungen 82
4.4 Diskussion der MRT Auswertungen 82
4.5 Neues Klassifikationssystem der lumbalen muskulären Atrophie (LMA) 84
4.6 Diskussion der App Entwicklung 87
4.7 Limitationen 90
5 Zusammenfassung 96
6 Abbildungsverzeichnis 98
7 Tabellenverzeichnis 99
8 Literaturverzeichnis 100
9 Anhang 110
10 Erklärung zum Eigenanteil 113
11 Danksagung 114

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Android	Betriebssystem und Softwareplattform für mobile Geräte wie Smartphones, Tablets etc.
AOK	Allgemeine Ortskrankenkasse
App	Applikation, digitale Anwendung für Smartphones und Tablets
Apple	Software Firma /Cupertino/ Kalifornien/ USA
ASR	Achillessehnenreflex
BK	Berufskrankheit
BMI	Body-Mass-Index
BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzw.	beziehungsweise
Ca.	circa
CeHRes	Centre for eHealth Research
Copyright	Urheberrecht
CT	Computertomographie
DGSVO	Datenschutzgrundverordnung
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DPMA	Deutsches Patent und Markenamt, München
Drag and Drop	verschieben und loslassen, Bedienung graphischer Oberflächen
et al.	et alii, und andere
Fa.	Firma
fem.	femoralis
FHP	Fußheberparese
Frameworks	Rahmenwerk, Grundstruktur in der Softwareentwicklung
FSP	Fußsenkerparese
GBE	Gesundheitsberichterstattung
ggf.	gegebenenfalls
GoÄ	Gebührenordnung für Ärzte
GZHP	Großzehenheberparese

ICC	Intraklassen-Korrelationskoeffizient
IGEL	Individuelle Gesundheitsleistungen
iOS	mobiles Betriebssystem von Apple OS- operating system
IT	Informationstechnik
Kauda	cauda equina- unterer Teil des Nervengeflechts d. Wirbelsäule
KG	Kraftgrade
KI	künstliche Intelligenz
Konus	kegelförmiger unterer Abschnitt der Wirbelsäule
Korr.	Korrektur
lat.	Lateral
LMA	lumbale muskuläre Atrophie
LMA	lumbale Muskelatrophie (engl. „Lumbar Muscle Atrophy“)
LoA	Limits of Agreement (Bland–Altman-Grenzen der Übereinstimmung)
LOGO	graphische Zeichen zur Kennzeichnung eines Unternehmens
LWS	Lendenwirbelsäule
M.	musculus
MDM	Mobile Device Management
MRT	Magnetresonanztomographie
MRT	Magnetresonanztomographie
N.	nervus
ND	Nebendiagnose
NPP	Nucleus pulposus prolaps
o.a.	oben angeführt
ODI	Oswestry disability Index, klinischer Bewertungsindex bei Wirbelsäulenerkrankungen
OS	Oberschenkel
Overlay	Überlagerung, Teil eines Computerprogramms im Arbeitsspeicher
PSR	Patellarsehnenreflex
ROI	Region of interest
ROI	Region of Interest
Support	Unterstützung

SUS	System Usability Scale
TPR	Tibialis-posterior-Reflex
u.	und
US	Unterschenkel
Variation	Variabilität im Befundungsergebnis "intra- und interobserver variation", innerhalb eines oder mehrerer Befunde
vs.	Versus
z.B.	zum Beispiel
zit.n.	zitiert nach

1 Einleitung

1.1 Epidemiologie

Erkrankungen der Wirbelsäule sind in der Bundesrepublik sehr weit verbreitet und betreffen Patient*innen in allen Altersgruppen vorwiegend jedoch ältere Patient*innen. Dabei haben etwa 2/3 der Bevölkerung in Europa im Laufe ihres Lebens chronische oder akute Rückenschmerzen. In Deutschland werden jährlich ca. 180.000 Bandscheibenvorfälle von den Krankenkassen erfasst. Chronische Rückenschmerzen betreffen 20 % der Frauen und ca. 15 % Männer. Dabei stellen Rückenschmerzen eine hohe Belastung für das deutsche Gesundheitssystem dar (Statistisches Bundesamt, Destatis 2020). Patient*innen mit chronischen Rückenschmerzen verursachten im Jahr 2020 durchschnittliche Gesamtkosten in Höhe von 31.148 Euro, wobei die direkten Krankheitskosten 8.862 Euro sowie die indirekten Kosten 22.287 Euro betrugen (Ossendorf, 2020). Rückenschmerzen waren im Jahr 2019 für die meisten Fehltage der AOK-Versicherten Beschäftigten im Rheinland verantwortlich. Im Durchschnitt fiel jeder AOK-Versicherte Beschäftigte im Rheinland mehr als zwei Tage wegen Rückenschmerzen aus. Besonders im Vordergrund stand die Metallbranche. Wie bereits in den früheren Jahren ist dieses Krankheitsbild somit für die meisten Fehltage verantwortlich (AOK Rheinland 2019).

Weiterhin melden die Rentenversicherungen im Jahre 2012 ca. 13.000 Renteneintritte unter anderem aufgrund reduzierter Erwerbsfähigkeit wegen Erkrankungen der Wirbelsäule (GBE Bund 2012). Der Altersgipfel für Patient*innen mit Rückenschmerzen liegt ca. zwischen 50 und 60 Jahren. Durchschnittlich berichten 60-70% der betroffenen Patient*innen über wiederkehrende Rückenschmerzen. Nur die Hälfte aller Patient*innen mit Beschwerden länger als 6 Monate kehrt wieder zurück in den normalen Arbeitsalltag. In Deutschland wurden im Jahre 2007 ca. 30.000 Patient*innen an den Bandscheiben operiert. Dabei wurden von der Bertelsmannstiftung teilweise unterschiedliche Häufigkeiten im Bereich Wirbelsäulenoperationen in der Bundesrepublik festgestellt (Bertelsmannstiftung Faktencheck-Gesundheit.de 2022). Auch die Indikationsstellung zu Versteifungsoperationen (Spondylodesen) oder die Entfernung von knöchernen

Strukturen am Spinalkanal wurde regional sehr unterschiedlich gehandhabt (Bertelsmannstiftung 2022).

Abb. 1: Bandscheibenvorfall – Präparat und CT-Bild
Die linke Abbildung zeigt ein pathologisches Präparat eines Bandscheibenvorfalls mit sichtbarer Gewebestruktur. Rechts ist das korrelierende CT-Bild dargestellt, das die knöchernen und weichen Strukturen der betroffenen Region veranschaulicht (nach Bullough et al., 1994).

Vor diesem Hintergrund stellt sich nicht nur die Frage nach der Häufigkeit und den gesundheitsökonomischen Folgen lumbaler Wirbelsäulenerkrankungen, sondern auch danach, welche strukturellen und funktionellen Faktoren die Schwere der Erkrankung und den klinischen Verlauf bestimmen. Insbesondere die Beziehungen zwischen beruflicher körperlicher Belastung, dem Ausmaß eines lumbalen Bandscheibenvorfalls, dem restverfügbaren Raum im Spinalkanal sowie begleitenden Veränderungen der paraspinalen Muskulatur sind bislang nur unvollständig geklärt. Gleichzeitig zeigen klinische Erfahrungen, dass bildgebende Befunde, Symptomatik und funktionelle Einschränkungen nicht immer deckungsgleich sind, was die Indikationsstellung und prognostische Einschätzung erschwert.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden zunächst die anatomischen und funktionellen Grundlagen der lumbalen Wirbelsäule und der stabilisierenden Muskulatur (Kapitel 1.2) sowie die klinische Diagnostik lumbaler Bandscheibenvorfälle (Kapitel 1.3) dargestellt. Anschließend wird die radiologische Diagnostik mit Schwerpunkt auf Röntgen- und MRT-Verfahren und deren Bedeutung für die Quantifizierung degenerativer Veränderungen und muskulärer Atrophie erläutert (Kapitel 1.4). Auf dieser Grundlage werden in Kapitel 1.5 die konkreten Fragestellungen der vorliegenden Dissertation formuliert und in Kapitel 1.6 der Gang der Untersuchung skizziert. Den Abschluss der Einleitung bildet die Zielsetzung der Arbeit in Kapitel 1.7.

1.2 Anatomie der lumbalen Wirbelsäule

Der Bereich Bandscheibe stellt eine sehr komplexe anatomische und funktionelle Einheit dar. Als zentraler Bereich findet sich hier der Anulus fibrosus (bindegewebiger Ring) als ein fibröser Gelenkknorpel sowie der Nucleus pulposus im Kern und die dazugehörigen Knorpelplatten. Das Bewegungssegment wird aus den benachbarten Wirbeln sowie den vorderen und hinteren Längsbändern und dem gelben Band (Ligamentum flavum) als Segment gebildet. Der Discus intervertebralis liegt zwischen den Wirbelkörpern, wobei die Wirbel durch Synchondrosen miteinander verbunden sind, mit Ausnahme der ersten beiden Wirbel der Halswirbelsäule. Im Zentrum des Discus intervertebralis befindet sich der weichere Nucleus pulposus. Die Bandscheiben sorgen einerseits für die Stabilität der Wirbelsäule durch eine bewegungslimitierende Wirkung, zum Zweiten ermöglichen sie Bewegungen der Wirbelkörper gegeneinander und verteilen dabei den Druck durch eine axiale Krafteinleitung gleichmäßig auf die Wirbelkörperplatten (Schünke et al. 2005., Putz et al. 2000)) In der beigefügten Abb. 1 zeigt sich ein pathologisches Präparat mit einem linksseitigen Bandscheibenvorfall und dem korrelierenden CT-Bild und in Abb. 2 findet sich die Abbildung eines anatomischen Modells mit einem simulierten Bandscheibenvorfall.

Abb. 2: Anatomisches Modell eines Bandscheibenvorfalls
Das anatomische Modell zeigt eine Bandscheibe mit einem Bandscheibenvorfall (rot), der nach links verlagert ist und Kontakt zur abgehenden Nervenwurzel hat. Im MRT würde dieser Befund spiegelverkehrt rechts erscheinen (eigenes Foto).

Die muskuläre Stabilisierung der Wirbelsäule erfolgt durch die Rückenmuskulatur, welche die Beweglichkeit und Stabilität des Rumpfes garantieren. Aufgrund der entwicklungsgeschichtlichen Herkunft und der Nervenversorgung findet sich die autochthone/ tiefe Rückenmuskulatur als Teil der Rumpfwandmuskulatur und die nicht autochthone Oberflächenrückenmuskulatur. Die Innervation der dorsalen autochthonen Rückenmuskulatur erfolgt segmental über die Spinalnerven. Der Erector spinae besteht aus den Muskeln des M. spinalis, M. longissimus, M. thoracicus longus und M. iliocostalis (Schünke et al. 2005). Einen exemplarischen horizontalen Muskelquerschnitt im Segment L5/ S1 zeigt die Abb. 3.

Die Innervation des M. psoas major erfolgt durch den N. femoralis und direkte Äste des Plexus lumbalis. Der N. femoralis hat seinen Ursprung in dem 1.- 4.ten Lendensegment (L1 - L4). Ein Bandscheibenvorfall in den Segmenten L4/5 und L5/S1 würde deshalb nicht

mehr zu einer Schädigung der innervierenden Fasern des N. femoralis führen und somit keine Auswirkungen auf die ventrale Wirbelsäulenmuskulatur haben. Der Austritt des Bandscheibenvorfalls aus dem Bandscheibenfach bestimmt die Nomenklatur des Vorfalls als medial, mediolateral, intraforaminal und lateral. Ein medialer und mediolateraler Vorfall komprimiert die weiter absteigende Nervenwurzel, die den Kanal aus dem Segment darunter verlässt. Ein intraforaminaler/ extraspinaler bzw. lateraler Bandscheibenvorfall komprimiert die Nervenwurzel auf der Höhe des Bandscheibenfachs.

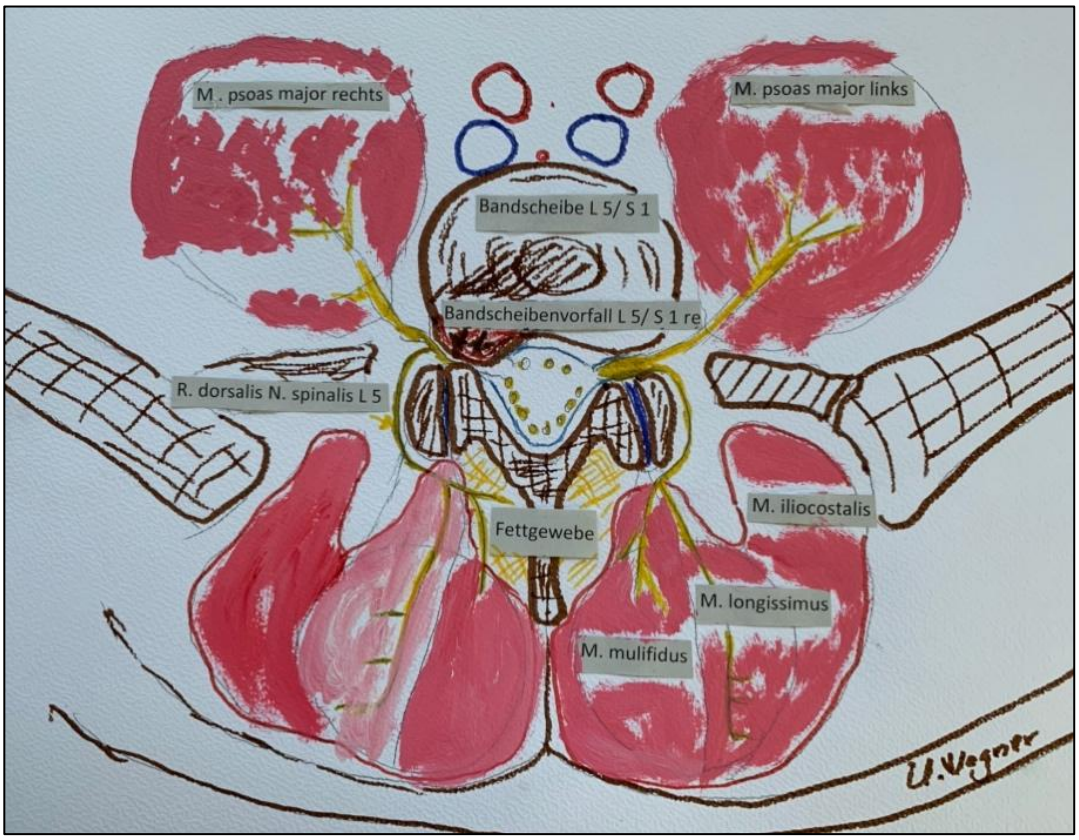


Abb. 3: Schematischer Muskelquerschnitt L5/S1 mit Bandscheibenvorfall
Die Zeichnung zeigt einen horizontalen Querschnitt durch den Musculus erector spinae in Höhe von L5/S1. Medial liegt der M. multifidus, weiter lateral der M. longissimus und am weitesten lateral der M. iliocostalis. Ventralseitig ist der M. psoas major im Bereich der Lendenwirbelsäule dargestellt. Zudem ist ein Bandscheibenvorfall auf Höhe L5/S1 re eingezeichnet, der eine Nervenwurzel komprimiert (Zeichnung: Prof. Dr. U. Wagner, 2021).

Die Wirbel funktionieren wie Hebel mit einem Drehpunkt in den kleinen Wirbelgelenken, so dass die axialen Druckkräfte direkt und indirekt durch die Zwischenwirbelscheibe aufgenommen und weitergeleitet werden. Diese Bewegungsfunktion wird durch die autochthone Rückenmuskulatur unterstützt. Das Bewegungssegment wurde als eine funktionelle Einheit erstmals von Junghans (1951) und Junghans u. Schmorl (1968) dargestellt. Dazu gehören der Discus intervertebralis mit Nucleus pulposus und Anulus fibrosus, sowie die Hälfte der benachbarten Wirbel, das Foramen intervertebrale, die Facettengelenke, das Ligamentum flavum, das Ligamentum longitudinale anterius und posterius, das Ligamentum interspinale und alle Muskeln zwischen den Dorn- und Querfortsätzen auf gleicher Wirbelsegmenthöhe.

1.3 Klinische Diagnostik lumbaler Bandscheibenvorfälle

Zentraler Bestandteil der klinischen Diagnostik ist weiterhin die Anamnese und die klinische Untersuchung. Bei der Anamnese werden die zentralen Fragen über Art sowie die Dauer der Rückenschmerzen, die Schmerzverstärkung oder Ausstrahlung beim Husten, Niesen und Pressen sowie nach motorischen Defiziten und Störungen der Gefühlssensation und der Blasen- und Mastdarmfunktion gefragt. Weiterhin sind auch Störungen der Potenz von besonderer Bedeutung. Durch die Anamnese ergeben sich schon Hinweise auf die etwaige Höhe des betroffenen Segmentes. Weiterhin wird nach arbeitsplatzbezogenen Risiken sowie der speziellen Krankengeschichte, bei welcher Gelegenheit sich erstmals die Kreuz- und Rückenschmerzen zeigten, gefragt.

Die neurologische Untersuchung sucht gezielt nach sensorischen und motorischen Ausfällen. Durch klinische Untersuchungen werden die Beinlängen eingeschätzt und gegebenenfalls durch Brettchenunterlage korrigiert. Der Untersucher beurteilt das entsprechende Bewegungssegment, den Muskeltonus oder eventuell tastbare Besonderheiten am Weichteilapparat. Dabei werden die Rückenstrecker sowie die Gesäß- und Beinmuskulatur und die übrige Muskulatur sorgfältig überprüft, die Eigenreflexe werden getestet und die gezielte Untersuchung auf Durchblutung, Motorik und Sensibilität auch an den Extremitäten durchgeführt.

Tab. 1: Grade der Muskelkraft nach Janda
Die Tabelle stellt die Klassifikation der Grade der Muskelkraft nach Janda (1965, zit. n. Grifka, J., Bayrisches Ärzteblatt 3/21) dar.

Kraftgrad	Beschreibung
0 – Plegie	Keine Muskelkontraktion spürbar
1 – Spur	Spürbare Muskelkontraktion ohne daraus resultierende Gelenkbewegung
2 – Sehr schwach	Volle Bewegung im Gelenk nur bei aufgehobener Schwerkraft möglich
3 – Schwach	Volle Bewegung im Gelenk gegen Schwerkraft aber nicht gegen Widerstand möglich
4 – Gut	Herabgesetzte Muskelkraft, volle Bewegung im Gelenk nur gegen leichten Widerstand möglich
5 – Normal	Volle Muskelkraft, volle Bewegung im Gelenk auch gegen starken Widerstand möglich

Wenn möglich wird der Fingerbodenabstand geprüft und auch die Beweglichkeit der Wirbelsäule mit Seitabweichungen und Abweichungen in den entsprechenden Bewegungsrichtungen. Dabei muss individuell entschieden werden, ob aufgrund einer Schmerzhaftigkeit die Prüfungen im Stehen oder im Liegen durchgeführt werden können. Häufig ist es den an der Bandscheibe erkrankten Patient*innen nicht möglich adäquat zu stehen oder sich zu bewegen. Der Fingerbodenabstand wird mit gestreckten Knien und einer vorsichtigen vornüber Neigung eingeschätzt, die Nervenversorgung untersucht und der Tonus der glutealen und der Beinmuskulatur eingeschätzt. Dabei sind die Valleix-Druckpunkte im Verlauf des Nervus ischiadicus hinweisend. Zur Untersuchung der motorischen Funktionsfähigkeit wird die Steh- und Gehfähigkeit sowie der Hacken- und Spitzengang überprüft. Umfangsmessungen an der Ober- und Unterschenkelmuskulatur zeigen ggf. Hinweise auf Muskelatrophien. Besondere Bedeutung hat auch der Grad des Wurzeldehnungsschmerzes mit dem Zeichen nach Lasègue und Bragard. An wichtigen Eigenreflexen werden der Patellarsehnenreflex sowie der Achillessehnenreflex und der Tibialis posterior Reflex beidseits ausgelöst. Durch die Ausstrahlung der Schmerzen oder

der vorhandenen Sensibilitäts- und motorischen Störung kann das entsprechende Dermatom einer komprimierten Spinalnervenwurzel bestimmt werden (vgl. Tab. 2). Die Muskelkraft wird in der Klassifikation nach Janda (1965) durchgeführt (vgl. Tab. 1). Die Überprüfung der Quadricepskraft sowie der Fußheber- Adduktion-, Abduktion – und Senker Funktion gibt Hinweise auf eine gestörte Funktion eines Leitmuskels.

Besondere Bedeutung kommt einem Ausschluss eines Konus-/ Kaudasyndroms zu, mit plötzlich aufgetretenen Störungen im Bereich der Blasen- Mastdarmfunktion bzw. entsprechenden sensiblen und anderer Lähmungserscheinungen z. B. einer reithosenartigen Gefühlsstörung. Teilweise berichten die Patient*innen sogar über ein aneuralgisches Symptom, welches bei einem drohenden Wurzeltod bei einem Massenvorfall vorkommen kann.

Tab. 2: Schädigungshöhen der unteren LWS mit Kennmuskeln und Reflexausfällen
Die Tabelle zeigt die Zuordnung von Schädigungshöhen an der unteren Lendenwirbelsäule zu den entsprechenden Kennmuskeln, sensiblen Ausfällen und Reflexveränderungen. Die Einteilung erfolgt nach den Segmenten L3 bis S1, wobei für jede Höhe die betroffenen Muskelgruppen, sensible Symptome und Reflexveränderungen angegeben sind (ausgewertet nach Schünke et al., 2008).

Höhe der Schädigung	Kennmuskel	Klinik: Sensibel	Reflex
L 3	M. Quadriceps fem. M. iliopsoas Adduktoren	Vorderseite des Oberschenkels	Patellarsehnen-Reflex (PSR)
L 4	M. quadriceps fem. (Vastus medialis) M. ilipsoas	Oberschenkelaussenseite Unterschenkelinnenseite Tibiavorderkante	PSR
L 5	M. extensor hallucis longus M. tibialis anterior M. glutaeus medius	Dorsolateral Oberschenkel Knieaussenseite Fußrücken bis zur Großzehe	Tibialis posterior Reflex (TPR)
S 1	M. triceps surae M. glutaeus maximus M. biceps femoris	Außen u Rückseite des OS und US, äußerer Malleolus, lat. Fußkante, Zehen 3-5	Achillessehnenreflex (ASR)

1.4 Radiologische Diagnostik

1.4.1 Röntgendiagnostik

An radiologischen und bildgebenden Verfahren werden in unserer Klinik in der Regel eine Röntgenuntersuchung des betroffenen Wirbelsäulenabschnittes in zwei Ebenen durchgeführt ggf. auch ergänzt durch Schrägaufnahmen oder Funktionsaufnahmen. Damit kann in Zusammenhang mit der weiterhin durchgeführten MRT- oder CT-Diagnostik eine exakte Höhenlokalisation des Bandscheibenvorfalls durchgeführt werden. In seltenen Fällen liegen lumbalisierte oder sakralisierte Wirbel vor, bei denen die zuvor durchgeführte Röntgendiagnostik von entscheidender Bedeutung für die intraoperative Höhenlokalisation ist. Hier könnte es sonst zu einer Höhenverwechslung kommen. Bei der radiologischen Diagnostik kann die entsprechend reduzierte Strahlenbelastung der digitalisierten Röntgendiagnostik in Kauf genommen werden. Die konventionelle Röntgendiagnostik der Wirbelsäule erlaubt aber eine kostengünstige und zuverlässige Darstellung von angeborenen Anomalien sowie Blockwirbelbildungen, Bogenschlussdefekten sowie die Darstellungen von Seitverbiegungen, wie der Skoliose oder auch kyphotischen Veränderungen. Auch Frakturen oder Tumoren sowie strukturelle Veränderungen können mit hinreichender Sicherheit diagnostiziert werden. Durch die Funktionsaufnahmen in In- und Reklination können Stabilitätsuntersuchungen zum Ausschluss von Wirbelgleiten oder zur Planung der operativen Behandlung durchgeführt werden.

Myelographien wurden nicht durchgeführt, Computertomogramme nur in Ausnahmefällen, in denen keine MRT Diagnostik möglich war, z. B. bei Zustand nach Schrittmacherimplantationen durchgeführt (vgl. Abb. 4). Im vorliegenden Falle wurde zur normierten Bestimmung der Bandscheibenhöhe die Auswertungsmethode nach Hurxthal (1968) durchgeführt. Hierbei werden im seitlichen Strahlengang die Bandscheibenhöhen ausgemessen und auf Höhe der Mitte der Grund- bzw. Deckplatte deren Höhe in einem Tabellensystem mit normierten Prozentwerten nachkalkuliert. Dieses Verfahren wird häufig bei der Beurteilung von Einflüssen aus regelmäßiger Arbeitstätigkeit für die Anerkennung von bandscheibenbedingten Erkrankungen (Berufskrankheit – BK 2108) von den Berufsgenossenschaften gefordert. Dadurch erkennt man, in welchen

Segmenten und zu welchem Prozentsatz die jeweiligen Bandscheibenhöhen gemindert sind.

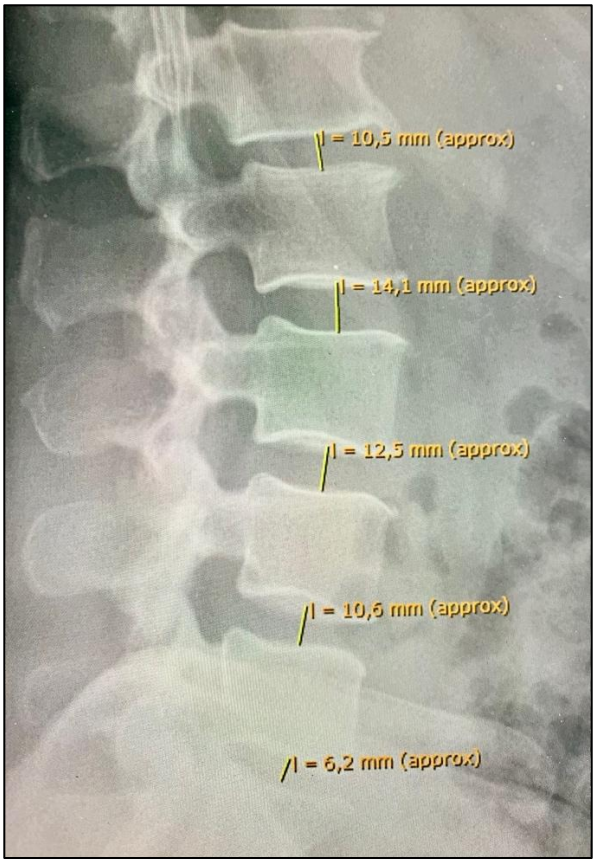


Abb. 4: Bandscheibenhöhen nach Hurxthal (1968)
Das Röntgenbild zeigt die Messung der Bandscheibenhöhen in der Lendenwirbelsäule anhand der Methode nach Hurxthal (1968). Die Höhe der einzelnen Bandscheibenräume ist in Millimetern angegeben und dient der Beurteilung degenerativer Veränderungen und der Bandscheibenmorphologie.

1.4.2 MRT-Diagnostik

Die MRT hat den höchsten Informationsgehalt und bietet die höchste Sensibilität und Spezifität in der Diagnostik von Bandscheibenvorfällen. Insofern ist die MRT die Methode der Wahl zur Differentialdiagnostik und Therapie der bandscheibenbedingten Erkrankungen. Die MRT zeigt frühzeitige degenerative Veränderungen auch in den Wirbelkörpergrund- und Deckplatten, wenn diese im Röntgenbild noch nicht sichtbar sind. Hierdurch kann auch das angrenzende Knochenmark mitbeurteilt werden. Die

Degenerationsstufen werden nach Modic (1988) klassifiziert (vgl. Abb. 5), mit einer Beurteilung der ödematösen Reaktionen des angrenzenden Knochenmarks (T1 signalarm, T2 signalreich) kombiniert mit der Beurteilung der fettigen Degeneration (signalreich T1, isointens T2) und den späteren Stadien mit sklerotischem Umbau (signalarm in T1 und T2).

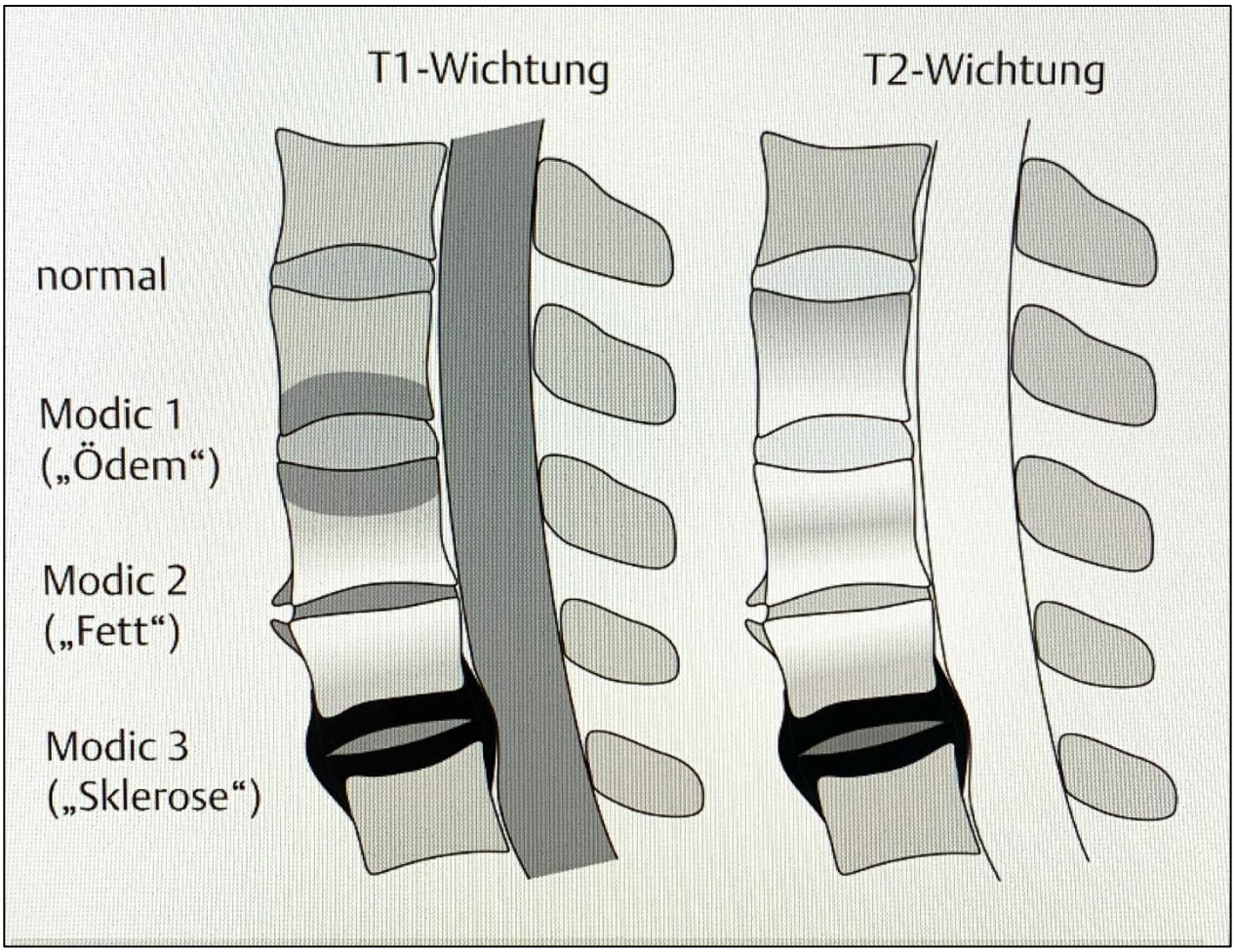


Abb. 5: Modic-Klassifikation der Bandscheibendegeneration

Die schematische Darstellung zeigt die Klassifikation der Bandscheibendegeneration nach Modic in T1- und T2-gewichteten MRT-Bildern. Modic 1 weist auf ein Ödem hin, Modic 2 zeigt eine fettige Degeneration, und Modic 3 ist durch sklerotische Veränderungen gekennzeichnet. Die Einteilung dient der radiologischen Beurteilung degenerativer Wirbelsäulenveränderungen (Schema nach Fessl, 2015).

Degenerative Veränderungen der kleinen Wirbelgelenke spielen auch eine Rolle und werden auch in einer gesonderten Klassifikation miterfasst. Die MRT geht auf die Entdeckung von Lauterbur aus dem Jahre 1973 zurück. Hier können durch Ausreifung des Verfahrens Mehrschichtensequenzen sowie höhere Feldstärken eine verbesserte Qualität der MRT-Bildgebung erreicht werden. Nach Felber (2011) ist die MRT die wichtigste Methode in der Diagnostik der Erkrankung der Wirbelsäulen. Die MRT Diagnostik lumbaler muskulärer Degenerationen und der Anteil der fettigen Degeneration wird in der Literatur in den letzten Jahren trotz Metaanalysen sehr kontrovers diskutiert und es liegt keine vollständige Evidenz dazu vor (Brinjikji et al. 2015, Hu et al. 2020, Battie et al. 2012, Stevens et al. 2020, Cooley et al. 2018, Yazici et al. 2022, Wan et al. 2015, Ranger et al. 2017, Park et al. 2018, Goubert et al. 2016, Dallaway et al. 2020, Lee et al. 2008). Insofern soll die vorliegende Studie durch genaue Analyse von 200 Fällen und Erfassung der klinischen und radiologischen Parameter mit Ihren Fragestellungen bislang offene Forschungsfragen klären.

1.5 Fragestellung der Dissertation

Die vorangegangenen Ausführungen sowie die Literatur zeigen, dass operativ behandelte lumbale Bandscheibenvorfälle ein häufiges Krankheitsbild sind, bei dem klinische Symptomatik, berufsbezogene Belastungen und bildgebende Morphologie nicht immer deckungsgleich erscheinen. Die vorliegende retrospektive Auswertung von 200 Patientinnen und Patienten nutzt standardisierte MRT-Messungen, um das Ausmaß des Prolapses sowie Begleitstrukturen quantifizierbar zu machen und diese Befunde mit klinischen Parametern zu verknüpfen. Auf dieser Basis sollen (1) potenzielle Zusammenhänge zwischen beruflicher Hebe-/Tragebelastung und Vorfallsfläche, (2) die Relation von Vorfallsfläche zu verfügbarem Raum im Recessus spinalis und zum Lasègue-Zeichen, (3) der Zusammenhang von Schmerzdauer mit muskulärer Atrophie (inkl. Fettinfiltration) sowie (4) mögliche Seitenunterschiede zwischen dorsal-autochthoner und ventraler Muskulatur geprüft werden. Die Kombination aus objektiver Bildgebung und klinischen Variablen erlaubt eine pathophysiologisch begründete, datengestützte Einordnung dieser Fragen. Entsprechend werden vier erste Forschungsfragen formuliert:

1. Liegen Zusammenhänge zwischen der Berufstätigkeit mit häufigem schwerem Heben und Tragen und dem Ausmaß des im MRT flächenmäßig berechneten Bandscheibenvorfalles vor?

2. Gibt es Zusammenhänge zwischen dem Ausmaß des Bandscheibenvorfalles (bzw. der Fläche des Vorfalles) und
    a) der Querschnittsfläche des restverfügbaren freien Raumes im Recessus spinalis (in mm^2) bzw.
    b) der Höhe des klinischen Lasègue-Zeichens?

3. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Zeitraum der präoperativ angegebenen Schmerzen und dem Ausmaß der Atrophie der Rückenstreckmuskeln im betroffenen Bereich sowie dem Ausmaß der fettigen Atrophie im betroffenen Segment?

4. Zeigt sich eine Seitendifferenz zwischen der dorsalen und ventralen Wirbelsäulenmuskulatur auf der von einem Bandscheibenvorfall betroffenen Seite und der unbetroffenen Gegenseite?

Sowohl für die Datenerhebung der vorangegangenen vier Forschungsfragen als auch im Klinikalltag sind detaillierte Flächenmessung paraspinaler Muskulatur essentiell, wenn auch zeitaufwändig und anfällig für Beobachtungsvarianzen. Um die Anschlussfähigkeit im Klinikalltag zu erhöhen, wurde ein pragmatisches, vereinfachtes Verfahren entwickelt, das mit kreisförmigen ROI-Platzierungen den Kernanteil der dorsalen autochthonen Muskulatur erfasst und damit einen raschen, reproduzierbaren Näherungswert liefert. Forschungsfrage 5 adressiert die Güte dieser Vereinfachung: In welchem Maß nähert sie die Standardmessung an, und mit welcher Wahrscheinlichkeit ist eine klinisch akzeptable Übereinstimmung zu erwarten? Die Beantwortung ist zentral, um eine belastbare Schwellenlogik (z. B. Muskel/Fett-Quotienten) auch unter Zeitdruck nutzbar zu machen,

ohne die diagnostische Aussage übermäßig zu kompromittieren. Entsprechend wird weitergehend folgende Forschungsfrage formuliert:

5. Kann durch ein vereinfachtes Verfahren zur Umfangmessung der dorsalen autochthonen Rückenmuskulatur eine Annäherung an die tatsächlichen Umfänge der autochthonen Rückenmuskulatur in den betroffenen Segmenten erzielt werden und wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung?

Voraussetzung für die breite Anwendung ist eine softwaregestützte Operationalisierung der Messlogik. Deshalb richtet sich Forschungsfrage 6 auf die Konzeption eines digitalen Informationssystems, das Bildimport, geführte ROI-Platzierung, automatische Flächen- und Quotientenberechnung, Seitenvergleich sowie eine transparente Klassifikation der lumbalen muskulären Atrophie in einem standardisierten Befundfluss zusammenführt. Ziel ist eine zeiteffiziente, nachvollziehbare und datenschutzkonforme Unterstützung, die Messvariabilität reduziert, Berichte strukturiert und den Transfer der erhobenen Kennwerte in klinische Entscheidungen erleichtert. Damit schließt die Arbeit den Bogen von der empirischen Analyse über eine validierte Vereinfachung hin zu einem praxistauglichen, digitalen Werkzeug für die Versorgung. Entsprechend wird folgende letzte Forschungsfrage formuliert:

6. Wie lässt sich ein digitales Informationssystem zur Befundung einer muskulären Atrophie der lumbalen Wirbelsäule konzipieren?

1.6 Gang der Untersuchung

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in einen einleitenden, einen methodischen, einen ergebnisorientierten und einen interpretativen Teil. Nach der Einführung in epidemiologische, anatomische, klinische und radiologische Grundlagen sowie der Formulierung der Forschungsfragen in Kapitel 1 werden im folgenden Abschnitt das untersuchte Patientenkollektiv, die Ein- und Ausschlusskriterien sowie die erhobenen klinischen und bildgebenden Parameter beschrieben. Daran anschließend werden die MRT-Messmethoden zur Quantifizierung des Bandscheibenvorfalls, des restverfügbaren

Raumes im Recessus spinalis und der dorsalen und ventralen lumbalen Muskulatur einschließlich des segmentalen Fettgewebes dargestellt. In diesem Zusammenhang werden sowohl das detaillierte Messprotokoll als auch das vereinfachte Verfahren zur Umfangmessung der dorsalen autochthonen Muskulatur erläutert.

Im anschließenden Ergebnisteil werden zunächst die Zusammenhänge zwischen Berufstätigkeit, klinischen Parametern und MRT-basierten Messgrößen analysiert und damit die Forschungsfragen 1 bis 4 beantwortet. Im weiteren Verlauf wird geprüft, in welchem Ausmaß das vereinfachte Messverfahren die Standardmessung annähert und welche Aussagekraft und praktische Anwendbarkeit sich daraus für den klinischen Alltag ableiten lassen (Forschungsfrage 5). Darauf aufbauend wird die Konzeption eines digitalen Informationssystems zur Befundung der lumbalen muskulären Atrophie vorgestellt, das die erarbeiteten Messgrößen und Klassifikationen in einen strukturierten, softwaregestützten Befundablauf überführt (Forschungsfrage 6).
Abschließend werden die Ergebnisse im Kontext der aktuellen Literatur diskutiert, methodische Stärken und Limitationen der Untersuchung kritisch gewürdigt und mögliche Konsequenzen für die klinische Praxis sowie Perspektiven für weiterführende Forschung und eine Weiterentwicklung der digitalen Befundunterstützung aufgezeigt.

1.7 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Dissertation setzt an dieser Schnittstelle an. Bei 200 operativ behandelten Patientinnen und Patienten mit lumbalem Bandscheibenvorfall werden standardisierte MRT-Messungen des Bandscheibenvorfalls, des verfügbaren Raums im Recessus spinalis und der dorsalen und ventralen lumbalen Muskulatur einschließlich des Anteils der fettigen Degeneration mit klinischen Parametern wie Schmerzdauer, Lasègue-Zeichen und beruflicher Hebe- und Tragebelastung verknüpft. Aufbauend auf diesen Analysen wird ein vereinfachtes Verfahren zur Umfangmessung der dorsalen autochthonen Rückenmuskulatur entwickelt und hinsichtlich seiner Übereinstimmung mit der detaillierten Standardmessung geprüft. Schließlich werden Anforderungen an ein digitales Informationssystem formuliert, das die erhobenen Messgrößen in einen strukturierten, softwaregestützten Befundablauf integrieren soll.

2 Material und Methoden

2.1 Patientenauswahl und Ethikkommission

Das Studienkollektiv der vorgelegten retrospektiven Analyse umfasst 200 operativ behandelte Patient*innen der Abteilung für Wirbelsäulenchirurgie am AMEOS Klinikum Geestland (Chefarzt Dr. A. Er). Zum Ausschluss aus der retrospektiven Studie führten Diagnosen wie Radikulopathien ohne Prolaps, Spinalstenosen oder spinale Engen, Dekompressionen ohne Bandscheibenentfernung, Spondylodesen, Implantationen einer Bandscheibenprothese, Tumoren. Die Auswahl erfolgte ansonsten retrospektiv. Im Rahmen des Behandlungsvertrages hatten die Patient*innen einer weitergehenden Auswertung ihrer Daten zu medizinischen und technischen Zwecken zugestimmt. Die Auswertungen erfolgten auf der Grundlage der revidierten Deklaration von Helsinki des Weltärztebundes (1983) und den entsprechenden gesetzlichen Grundlagen.

In den Statuten der Ethikkommission des Universitätsklinikums Bonn zu "Retrospektiven Studien" ist festgelegt: "Die ausschließlich retrospektiven epidemiologischen Forschungsvorhaben sind von der Beratungspflicht nach § 15 Abs. 1 BO NW ausgenommen. […] Ein retrospektives Forschungsvorhaben liegt vor, wenn zum Zeitpunkt der Fragestellung bzw. Antragstellung alle zu verwendeten Daten bereits vollständig erhoben sind und damit rein "zurückblickend" ausgewertet werden." Die Arbeiten wurden vor dem 23.07.2025 durchgeführt.

Bei der vorliegenden Arbeit erfolgte eine retrospektive Auswertung vollständig vorhandener Daten, die anonymisiert ausgewertet wurden, so dass keine Rückschlüsse auf individuelle personenbezogene Verhältnisse möglich waren.

Die MRT und Röntgenbilder waren alle schon von den betreuenden Radiologen klinisch befundet worden. Es erfolgte nochmals unter der neuen Fragestellung der Dissertation eine qualifizierte epidemiologische Nachauswertung der Daten und Bilder. Es wurden durch die Studie keine neuen Röntgenbilder oder MRT Bilder veranlasst. Es entstanden keinerlei Bestrahlungen oder sonstige Nachteile für Patient*innen. Es erfolgte keine

personenbezogene Datenweiterleitung an Dritte, da es sich nicht um eine multizentrische Studie handelt.

2.2 Erstellung der Datenbögen

Die Daten für die retrospektive Studie wurden zwischen 2018 und 2021 gesammelt. Dabei wurde eine Liste der Patient*innen erstellt, die mit der Diagnose lumbaler Bandscheibenvorfall in der Klinik für Orthopädie/ Wirbelsäulenchirurgie stationär aufgenommen wurden. Es erfolgte die Registrierung der Daten mit den Personalien, die anonymisiert wurden, die Aufnahmediagnose, das Aufnahmedatum sowie das OP-Datum mit Entlassungsdatum und dem Operationsteam. Anhand der orthopädischen und anästhesiologischen Anamnese wurden die Befunde gesichtet und radiologisch ausgewertet.

Der Body-Mass-Index (BMI) ist eine standardisierte Maßzahl für die Bewertung des Körpergewichts eines Menschen in Relation zu seiner Körpergröße. Es erfolgte die Berechnung des Körpergewichts in kg geteilt durch die Körpergröße in m^2. Es erfolgte weiterhin die Erfassung der Berufe sowie der klinischen und radiologischen Befunde und die Erstellung eines Datenbogens nach dem Schema im Anhang.

2.3 Bildgebende Diagnostik

2.3.1 Hurxthal-Klassifikation und Auswertungen

Zur Übersicht zur Höhenlokalisation erfolgt die radiologische Diagnostik mittels konventionellem Röntgen ggf. auch ergänzt durch Funktionsaufnahmen oder Schrägaufnahmen. Dabei erfolgte die Einordnung zur Höhenmessung nach der Hurxthal-Klassifikation und deren Auswertung entsprechend der Publikation von Hurxthal. Die Hurxthal-Methode ist eine Ermittlung der Chondrosegrade der Bandscheibe. Ein Beispielschema zeigt die Tab. 3. Dabei wird die absolute Bandscheibenhöhe ausgemessen und die Ergebnisse mit segmentspezifischen Korrekturfaktoren multipliziert (Bolm et al. 2005). Die korrigierten Bandscheibenhöhen werden dann durch die größenkorrigierte Höhe dividiert und mit 100 multipliziert. Daraus ergeben sich normierte relative Bandscheibenhöhen jeweils bezogen auf das höchste unbetroffene Segment.

Eine relative Höhe von Größe 80 entspricht keiner Chondrose, der Chondrose-Grad I umfasst eine relative Höhe von über 66 – 79%, der Grad II eine Höhe von >50 - unter 66%, der Grad III eine Höhe < 50%.

Ausschlüsse sind Wirbelsäulenbefunde, bei der alle Bandscheibenhöhen gemindert sind, hier kann die Hurxthal-Methode nicht angewendet werden. Weiterhin wird die Hurxthal-Methode als Vorgabe für die Konsensus Empfehlungen zur Begutachtung von bandscheibenbedingten Erkrankungen der Lendenwirbelsäule (Berufserkrankung 2108) empfohlen (Bolm et al. 2005).

Tab. 3: Normierte Bandscheibenhöhe nach Hurxthal mit Korrektur nach Robertson
Die Tabelle zeigt ein Beispielschema zur Berechnung der normierten Bandscheibenhöhe nach Hurxthal unter Berücksichtigung der Korrektur nach Robertson. In mehreren Schritten werden die gemessenen Bandscheibenhöhen korrigiert und anschließend auf die größte Bandscheibenhöhe normiert, um eine standardisierte Vergleichbarkeit zu ermöglichen (Beispiel nach Bolm et al., 2014).

Schritt	**Segment**	**L 1/2**	**L 2/3**	**L 3/4**	**L 4/5**	**L 5/ S1**
1	Höhenmessung / mm	14	16	18	20	8
2	Korrektur n Robertson	x 1,26	x 1,13	x 1,05	x 1,00	x 1,16
Zwischen-Ergebnis	**Korr. Band-scheibenhöhe**	**17,6**	**18,1**	**18,9**	**20 = 100 %**	**9,3**
3	Division d größte Bandscheiben-höhe	17,6 / 20,0 x 100	18,1 / 20,0 x 100	18,9 / 20,0 x 100	20,0 / 20,0 x 100	9,3 / 20,0 x 100
Ergebnis	**Bandscheiben-Höhe %**	**88**	**91**	**95**	**100**	**47**

Die MRT Diagnostik erfolgte jeweils als sagittal und axial geschichtete Darstellungen der LWS. Diese geschah in den Wichtungen T1 und T2 sowie bei Bedarf zusätzliche Sequenzen. Der T1 Kontrast entsprach einer TR [= Repetitionszeit] von 500 bis 700 ms und TE [= Echozeit] von 11 bis 14 ms für sagittale und TR von 450 bis 875 ms [MW: 542] und TE von 10 bis 15 ms [MW: 11 ms] für axiale Schichtungen. Fett und paramagnetische Substanzen kommen signalreich zur Darstellung. Muskeln, kortikaler Knochen, Verkalkungen und pathologische Veränderungen sind signalarm (Vahlensieck u. Reiser

2001). Die T2 Wichtung entsprach langen Repetitionszeiten und langen Echozeiten, dadurch kommen Fett und Muskeln signalärmer zur Geltung als T1- gewichtete Sequenzen. Flüssigkeiten und pathologische Veränderungen erscheinen signalreich. Die TR lag zwischen 1580 bis 5920 ms und TE von 100 bis 1250 ms für sagittale und TR von 2525 bis 7740 ms und TE von 12 bis 150 ms für axiale Schichtungen mit einer Schichtdicke von 3,0 für sagittale und von 3 mm für axiale Schichtungen.

2.3.2 Klassifikation von Bandscheibenvorfällen

Es erfolgt die Klassifikation in Protrusionen oder Bandscheibenvorwölbungen mit einer „bulging disk oder contained disk“. Diese werden in der Regel durch intradiskale Therapien behandelt und wurden nicht in diese Studie aufgenommen. Die offene Mikrodisketomie mit dem Mikroskop erfolgte bei Bandscheibenvorfällen (Prolaps), wobei gedeckte Prolapse sowie Prolapse mit Bandscheibenverbindungen und freie Sequester klassifiziert wurden. Die degenerativen Veränderungen in den Wirbelkörpern wurden mit der Modic-Klassifikation (Modic et al. 1988) erfasst. Hierbei wurden die entsprechenden Knochenmarksveränderungen im MRT, die sich im Bereich der Deck- und Bodenplatten der Wirbelkörper manifestieren, klassifiziert (vgl. Abb. 5).

Modic-I enthält Fissuren im Bereich der Endplatten, die hypointens in der T1-Gewichtung waren und hyperintens in der T2-Gewichtung. Modic-II zeigt eine Veränderung des blutbildenden Knochenmarks und einen Ersatz durch Fettmarkern. Hier zeigen sich eine Hyperintensität in der T1-Gewichtung sowie eine iso- und leicht hyperintense Gewichtung in der T2-Gewichtung. Modic-III zeigt subchondrale Sklerosierungen und Trabekelfrakturen an, die hypointens in der T1-und in der T2-Gewichtung sind.

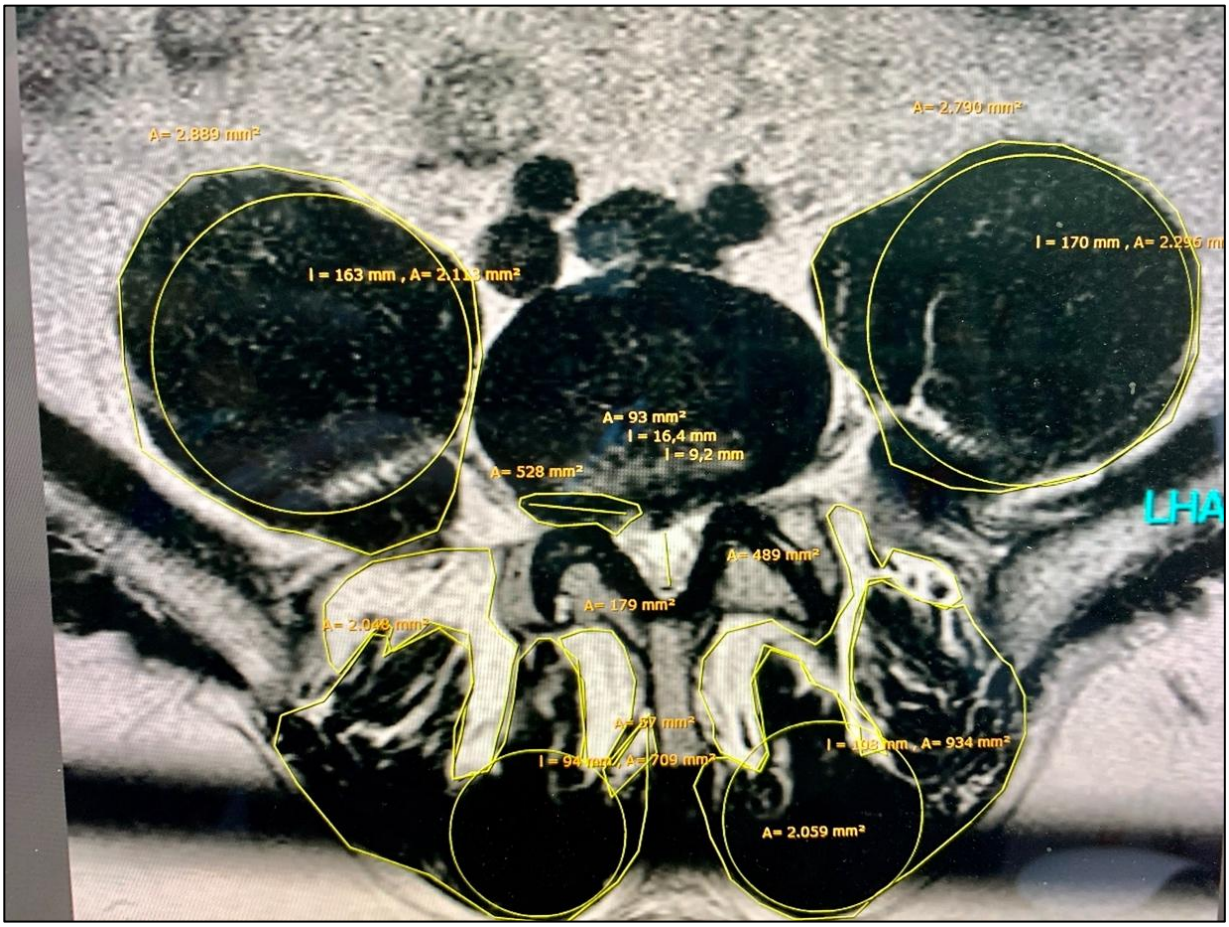


Abb. 6: MRT-Auswertung L5/S1 mit Bandscheibenvorfall
Das MRT-Bild zeigt einen horizontalen Schnitt auf Höhe L5/S1. Deutlich erkennbar ist ein Bandscheibenvorfall im Segment L5/S1 auf der rechten Seite. Zudem zeigt sich eine Minderung des Muskelumfangs der betroffenen Muskulatur sowie eine relative Vermehrung des Fettgewebes auf der rechten Seite, die mit dem Bandscheibenvorfall in Verbindung steht.

2.3.3 Evaluation des Spinalkanals, der kleinen Wirbelgelenke und Foramina

2.3.3.1 Die Fujiwara-Klassifikation

In der Fujiwara-Klassifikation (Fujiwara et al. 1999, 2000) wird die Einteilung der Facettengelenksarthrose im MRT vorgenommen. Die Facettengelenksarthrose korreliert mit bestimmten Parametern wie Alter, Bandscheibendegeneration und der Stabilität der Wirbelsäule. Der Typ I zeigt ein normales Gelenk, der Typ II eine geringe Arthrose, Typ III eine mäßige und Typ IV eine schwere Arthrose (Weishaupt und Zanetti sowie Suri et al. 2010). Die 4 Typen der Fujiwara Klassifikation werden in Abb. 7 dargestellt.

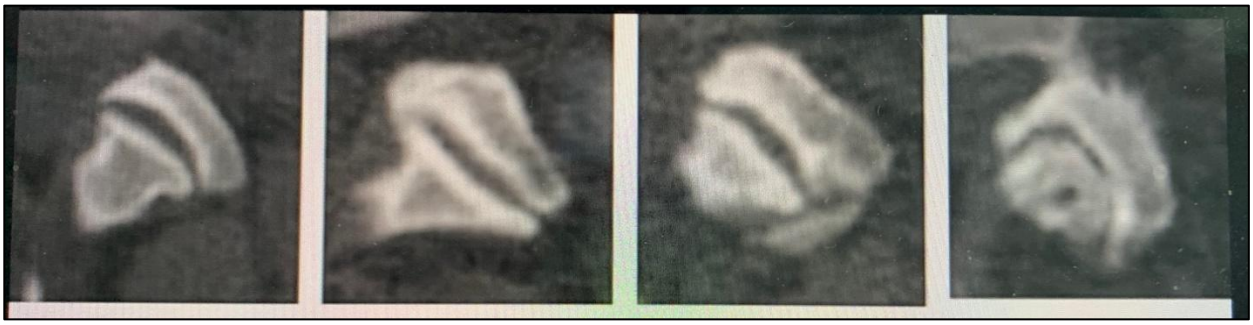


Abb. 7: Fujiwara-Klassifikation der Facettgelenkarthrose

Die vier Abbildungen zeigen die Klassifikation der Spinalkanalstenose nach Fujiwara, von Grad 1 (links) bis Grad 4 (rechts).

Abb. 8: Foramen intervertebrale im MRT und anatomischen Modell

Die kombinierte Abbildung zeigt links ein sagittales MRT-Schnittbild zur Berechnung der Foramina und rechts ein anatomisches Modell mit Blick auf das Foramen intervertebrale. Im MRT-Bild sind die foraminalen Strukturen vermessen, während das Modell den Einfluss eines Bandscheibenvorfalls (rot) auf das Foramen und die dort verlaufende Nervenwurzel verdeutlicht (eigenes Foto).

2.3.3.2 Berechnungen der Foramen

Die Foramenberechnungen wurden an den Sagittal- Schnitten der MRT´s vorgenommen (vgl. Abb. 8). Hierzu erfolgten an dem entsprechenden Wirbelgelenk die Berechnungen der Gesamtöffnung und die Berechnung des Bandscheibenvorfalles sowie der spinalen Nervenwurzel. Diese wurden miteinander verrechnet und in einer Subtraktion der restverfügbare Freiraum errechnet. Es handelt sich um die Berechnungs-Software des XERO-Viewers von der Firma Enterprise Imaging Copyright Agfa Healthcare 2019 des AMEOS Klinikverbundes. Die Berechnungen der Quotienten erfolgte nicht über eine App.

2.3.4 MRT Berechnungen der Muskelumfänge der spinalen Muskulatur

Mit dem Xero-Viewer-Auswertungsprogramm wurden die Flächen der Spinalmuskulatur berechnet. Dazu wurden die Umfänge der Muskulatur des Musculus multifidus, Musculus iliocostalis und Musculus longissimus dorsal jeweils der betroffenen Seite und der nicht betroffenen Seite genau umfahren und erfasst. Im ventralen Anteil wurde die Muskulatur des Psoas major beidseits bzw. vor allem auch des Iliopsoas, je nach lumbaler Höhe, als Muskelverbund berechnet (vgl. Abb. 9). Weiterhin erfolgte eine Quantifizierung des dorsal des Wirbelbogens gelegenen Fettgewebes beidseits als Zeichen für die Degeneration. Zuletzt erfolgte eine vereinfachte Erfassung des kombinierten Muskelanteiles des Musculus multifidus und des Musculus longissimus mit einer Kreismarkierung der breitesten Stelle zur orientierenden Vergleichbarkeit. Diese wurden in einzelnen Tabellen aufgeführt. Die Unterscheidung zwischen Muskelverfettung und Muskel ergab sich aus den Unterschieden in der Dichte im MRT. Die Verfettung zeigt ein deutlich erhöhtes Signal in der T1-Gewichtung. Die Berechnungen der Quotienten erfolgte nicht über eine App.

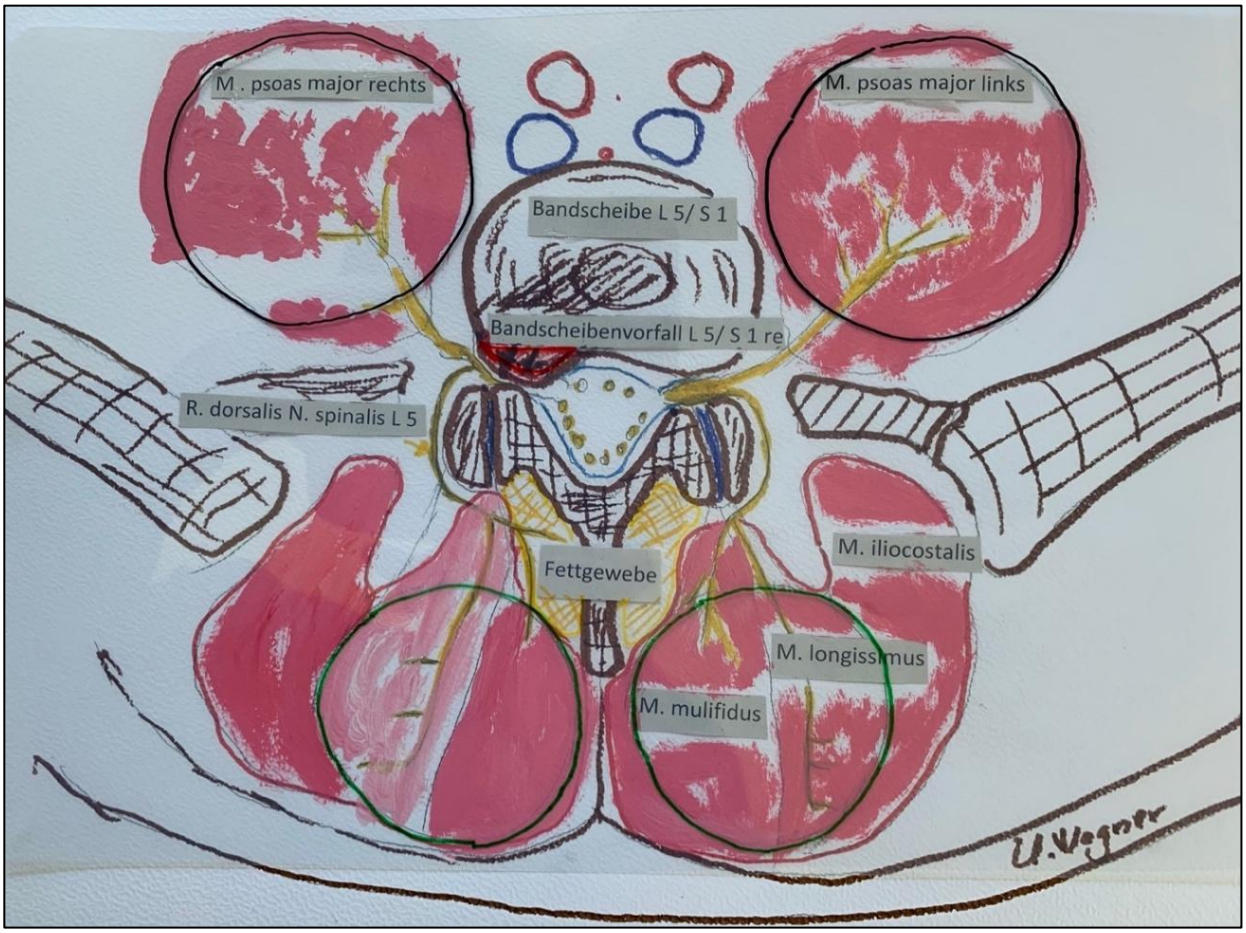


Abb. 9: Flächenerfassung der dorsalen Muskulatur auf Höhe L5/S1
Die Grafik zeigt die Flächenerfassung der Muskulatur des M. erector spinae auf Höhe L5/S1. Die vereinfachte Auswertung berücksichtigt die Muskelmassen des M. multifidus und M. longissimus durch die Berechnung der Kreisfläche, während der M. iliocostalis aufgrund seiner Irregularität ausgespart bleibt. Die vollständige Erfassung umfasst die gesamte dorsale Muskulatur (Grafik gezeichnet von Prof. Dr. U. Wagner).

2.4 Statistische Methoden

Die statistische Analyse der erhobenen Daten erfolgte mit Microsoft Excel (Microsoft Corp., USA) sowie der Statistiksoftware STATA (StataCorp, USA). Zur Beschreibung der Stichprobe wurden zunächst deskriptive Statistiken berechnet, darunter Mittelwerte, Standardabweichungen sowie relative und absolute Häufigkeiten für kategoriale Variablen. Für die statistische Auswertung der Forschungsfragen wurden unterschiedliche Verfahren eingesetzt, die je nach Art der untersuchten Zusammenhänge variieren.

Zur Untersuchung von Mittelwertunterschieden zwischen Gruppen wurde der t-Test für unabhängige Stichproben eingesetzt. Dieser prüft, ob die Mittelwerte zweier Gruppen signifikant voneinander abweichen. Dabei wurden zweiseitige t-Tests durchgeführt. Zur Modellierung von Abhängigkeiten wurde die lineare Regressionsanalyse (Ordinary Least Squares, OLS) genutzt. Dabei wurde geprüft, inwieweit eine unabhängige Variable (z. B. Schmerzmonate) die Variation einer abhängigen Variable (z. B. Muskelatrophie) erklärt. In den Regressionsmodellen wurden jeweils die Regressionskoeffizienten, die t-Werte sowie die dazugehörigen p-Werte angegeben. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) diente als Maß für die erklärte Varianz des Modells. Die Entwicklung eines digitalen Befundungssystems zur Bestimmung der muskulären Atrophie basierte auf einer methodischen Konzeption. Hierzu wurden bestehende Klassifikationssysteme analysiert und für die Implementierung einer digitalen Anwendung aufbereitet. Die Gestaltung der Benutzeroberfläche und Funktionsweise der App erfolgte mit der Software Canva (Canva Pty Ltd, Australien). Zur besseren Nachvollziehbarkeit der verwendeten Methoden gibt die folgende Tabelle eine Übersicht über die methodische Herangehensweise an die einzelnen Forschungsfragen
Alle Tests wurden zweiseitig auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ durchgeführt. p-Werte werden mit drei Nachkommastellen berichtet; bei $p < 0{,}001$ wird dies entsprechend gekennzeichnet. Vor jeder Hypothesenprüfung wurden die Verteilungen der stetigen Zielgrößen deskriptiv beschrieben (Mittelwert, Median, Standardabweichung, Interquartilsabstand) und visuell auf Verteilungs- sowie Ausreißer-Auffälligkeiten geprüft (Box-Plots, Q–Q-Plots). Auffällige Werte wurden plausibilisiert; ein Ausschluss erfolgte ausschließlich bei nachweislich fehlerhaften Erfassungen. Wo mehrere Tests zur gleichen Forschungsfrage herangezogen wurden, sind die p-Werte mit der Bonferroni-Holm-Methode korrigiert; nicht-korrigierte und korrigierte Werte werden in den jeweiligen Ergebnistabellen ausgewiesen. Für den Vergleich der LMA-Klassifikationen aus Standard- und vereinfachter Messung (vgl. Kap. 3.4) wurden zusätzlich Cohen's κ, der Bowker-Symmetrietest und exakte McNemar-Tests verwendet. Die statistische Beratung erfolgte am Institut für Medizinische Biometrie, Informatik und Epidemiologie (IMBIE) der Universität Bonn (Frau Charlotte Behning).

Tab. 4: Übersicht über verwendete statistische Methoden

Die Tabelle stellt die statistischen Methoden zur Untersuchung der einzelnen Forschungsfragen dar.

Forschungs-frage	Untersuchung	Methodik
1	Einfluss der beruflichen Tätigkeit auf die Vorfallsfläche	Mittelwertvergleich Paarweise t-Tests
2a	Zusammenhang zwischen Vorfallsfläche und verfügbarem Spinalraum	Lineare Regression (OLS)
2b	Zusammenhang zwischen Vorfallsfläche und Höhe des Lasègue-Zeichens	Lineare Regression (OLS)
3	Einfluss der Schmerzmonate auf Muskelatrophie und fettige Atrophie	Lineare Regression (OLS)
4	Vergleich der Muskelgrößen zwischen betroffener und unbetroffener Seite	Mittelwertvergleich Paarweise t-Tests
5	Vergleich der standardisierten und vereinfachten Messmethode	Mittelwertvergleich Paarweise t-Tests
6	Konzeption eines digitalen Befundungssystems	Methodenvergleich, Analyse bestehender Klassifikationen

3 Ergebnisse

3.1 Beschreibung der Stichprobe

Beschreibung des Patientengutes

Zunächst sollen in Tab. 5 Lage- und Streuungsmaße der Patientenvariablen dargestellt werden, um einen Überblick über die Stichprobe zu gewährleisten. Die Verteilung der Geschlechter zeigte eine weitgehend gleichmäßige Verteilung der beiden Geschlechter mit 47 % weiblich und 53 % männlich. Einstufungen divers lagen in der Studiengruppe nicht vor. Die Altersverteilung zeigt die größte Gruppe in der Altersstufe zwischen 50-59, die zweitgrößte Gruppe umfasst den Bereich 40 - 49. Operativ behandelte Bandscheibenvorfälle fanden sich in der Studiengruppe nicht unterhalb von 20 Jahren und oberhalb von 89 Jahren. Der BMI zeigte, dass der größte Anteil der Studiengruppe einen BMI zwischen 20-29 und damit ein mäßiges Übergewicht aufwies. Der zweitgrößte Anteil bestand in der Gruppe mit einem BMI von 30-39. In der Studiengruppe gaben fast die Hälfte der Patient*innen (49 %) an zu rauchen. 98 Patient*innen bezifferten den Konsum von leichten bis teilweise erhebliches Mengen an Zigaretten pro Tag. Die Hauptgruppe (22 %) konsumierte zwischen 20-30 Zigaretten pro Tag.

Tab. 5: Deskriptive Statistiken der Patientenvariablen

Die Tabelle stellt die Lage- und Streuungsmaße der in der Patientenstichprobe erhobenen Variablen dar. Neben Alter, BMI und Schmerzmonaten sind auch Angaben zum täglichen Zigarettenkonsum und zum Lasègue-Winkel enthalten. Für binäre Variablen wie Geschlecht, Raucherstatus und neurologische Ausfälle sind absolute und relative Häufigkeiten angegeben.

	Mittelwert	Median	Stan-dard-abw.	25%-Quantil	75%-Quantil
Alter	51.36	51.00	12.28	42.00	59.00
BMI	27.90	27.70	4.58	24.70	30.48
Anzahl tägl. Zigaretten	8.53	0.00	10.29	0.00	20.00
Lasègue (Grad)	44.06	45.00	14.47	30.00	50.00
Schmerzmonate	7.57	3.00	10.55	1.00	9.00

	Anzahl absolut	Anzahl relativ
Geschlecht (weiblich)	97	0,48
Raucher	98	0,49
Lasègue-Zeichen	150	0,75
Neurologische Ausfälle	150	0,75

Epidemiologische Auswertungen

Die Berufstätigkeiten und Tätigkeitsschwerpunkte wurden erfasst, um Zusammenhänge zwischen der Entstehung operativ behandelter Bandscheibenvorfälle und der dauerhaften Tätigkeit und Belastung zu erkennen (vgl. Abb. 10). Entsprechend dem Einzugsbereich der Klinik mit Bremerhaven und dem Landkreis Cuxhaven dominieren Handwerker und Arbeiter aus dem Hafengewerbe sowie Bürotätigkeiten. Es finden sich nur sehr wenige Akademiker in der Studiengruppe.

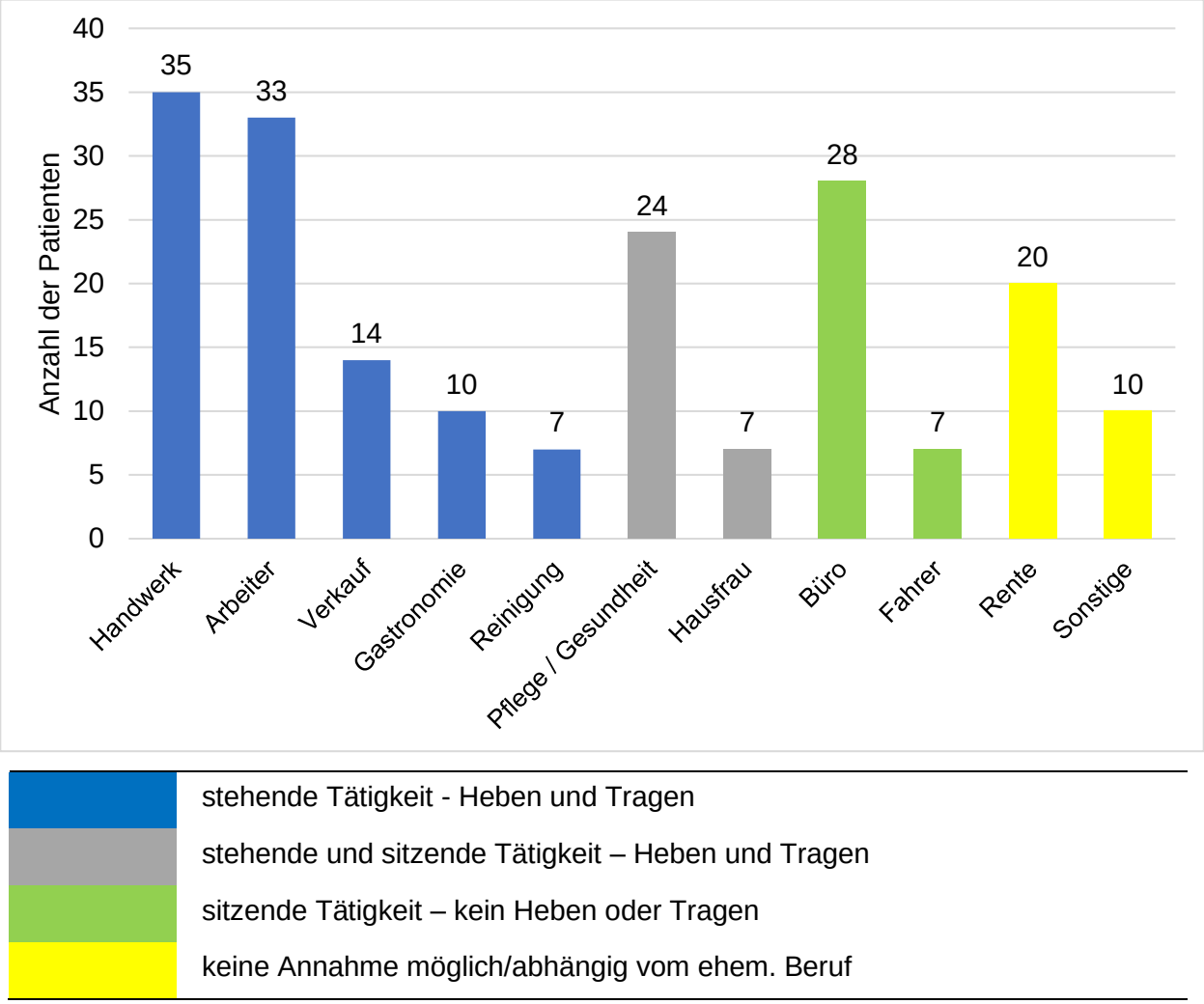


Abb. 10: Berufliche Tätigkeiten in der Studiengruppe

Das Balkendiagramm zeigt die Verteilung der beruflichen Tätigkeiten innerhalb der Studiengruppe. Die Farben der Balken entsprechen unterschiedlichen Belastungsniveaus, die sich aus der Kombination von stehender oder sitzender Tätigkeit sowie dem Heben und Tragen von Lasten ergeben. Die zugehörige Tabelle gibt eine detaillierte Einordnung der Tätigkeiten nach Belastungskategorien.

Aus den Anamnesebögen wurden die Nebendiagnosen erfasst, um Auffälligkeiten bei Zusatzerkrankungen zu beobachten. Die größte Gruppe zeigte keine gravierenden Nebendiagnosenn (vgl. Abb. 11). Die zweitgrößte Gruppe wies eine arterielle Hypertonie bzw. eine Adipositas auf. Es konnten auch mehrere Erkrankungen als Nebendiagnosen erfasst werden.

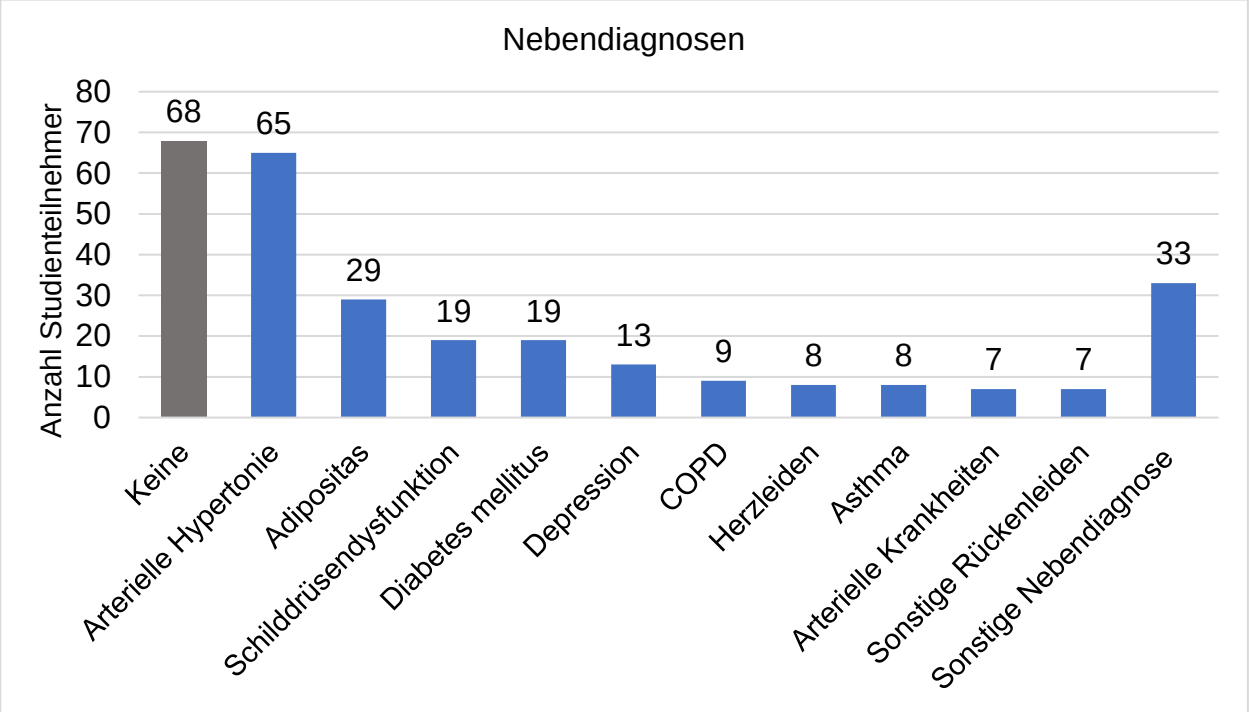


Abb. 11: Häufigkeit der Nebendiagnosen
Das Balkendiagramm zeigt die Verteilung der Nebendiagnosen innerhalb der Studiengruppe. Dargestellt sind die absoluten Häufigkeiten verschiedener Diagnosen.

Klinische Erhebungen

Die Schmerzanamnese wurde in Monaten seit dem Beginn der Schmerzen bis zum Zeitpunkt der stationären Aufnahme für die Operation angegeben. Die größte Gruppe berichtete von einer Beschwerdezeit zwischen 1-2 Monaten bis zur operativen Behandlung. Die zweitgrößte Gruppe wies sogar Leidenszeiten von über einem Jahr auf. Bezüglich der Lokalisierung des Vorfalls zeigte der Großteil der Stichprobe einen Bandscheibenvorfall in den unteren Segmenten der LWS primär in dem Segment L 4/5 gefolgt von dem Segment L 5/ S1 (vgl. Abb. 12). Dabei fand sich die häufigere Lokalisation im Segment L 4/5 rechts und im Segment L5/ S1 links. Die größte Gruppe der Studienpopulation operativ behandelter Patient*innen zeigte motorische Ausfälle (49 %). Bei der Subdifferenzierung der sensiblen Beeinträchtigungen fanden sich in erster Linie Parästhesien gefolgt von Hypästhesien. Die Bereiche der motorischen Ausfälle umfasste im Wesentlichen Fuß- und Großzehenheberparesen mit einer leichteren Abschwächung

des Kraftgrades (vgl. Abb. 12). Die Reduzierung des Kraftgrades lag in der größten Gruppe bei Großzehen- und Fußheberparesen bei einem Kraftgrad von 4/5.

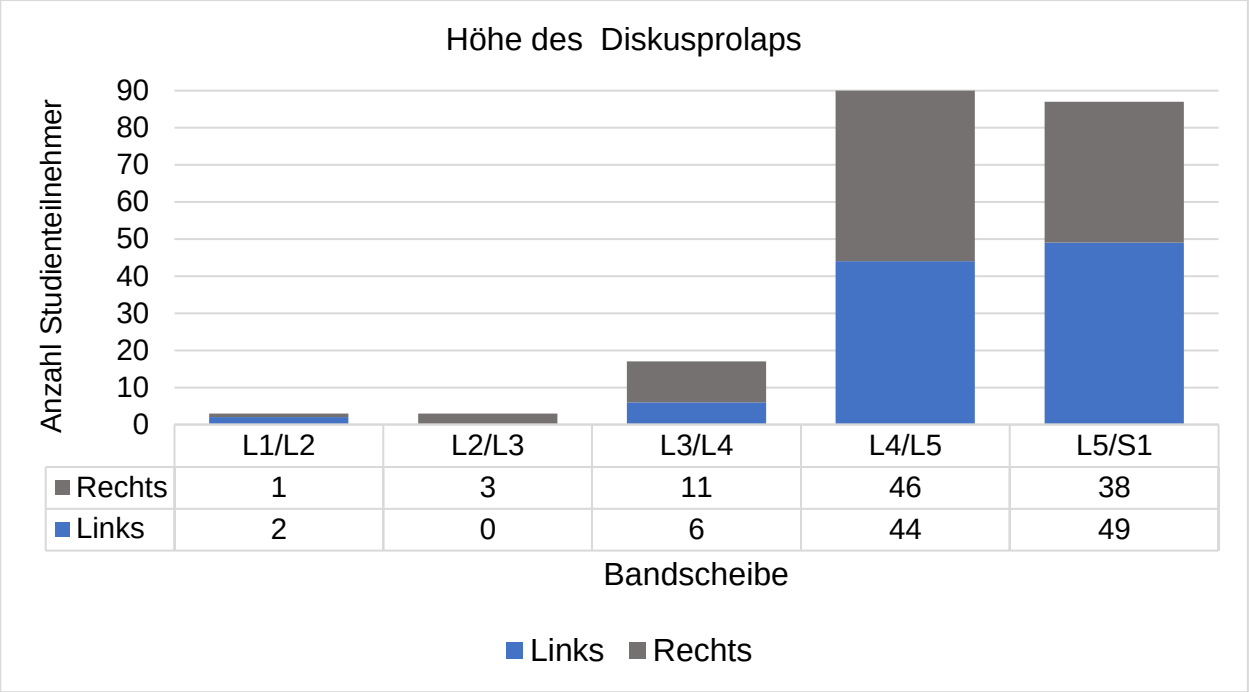


Abb. 12: Lokalisation des Diskusprolaps nach Segmenthöhe und Seite
Das Diagramm zeigt die Anzahl der Diskusprolapse pro Bandscheibensegment und Seite. Dargestellt sind die absoluten Häufigkeiten für links- und rechtsseitige Prolapse in den Segmenten L1/L2 bis L5/S1.

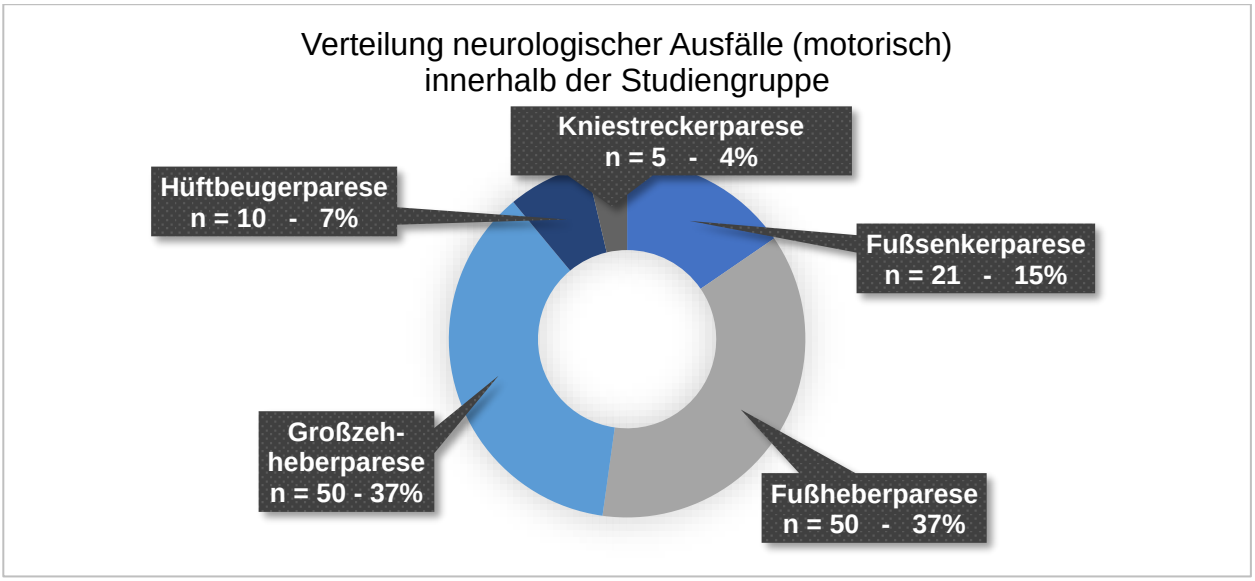
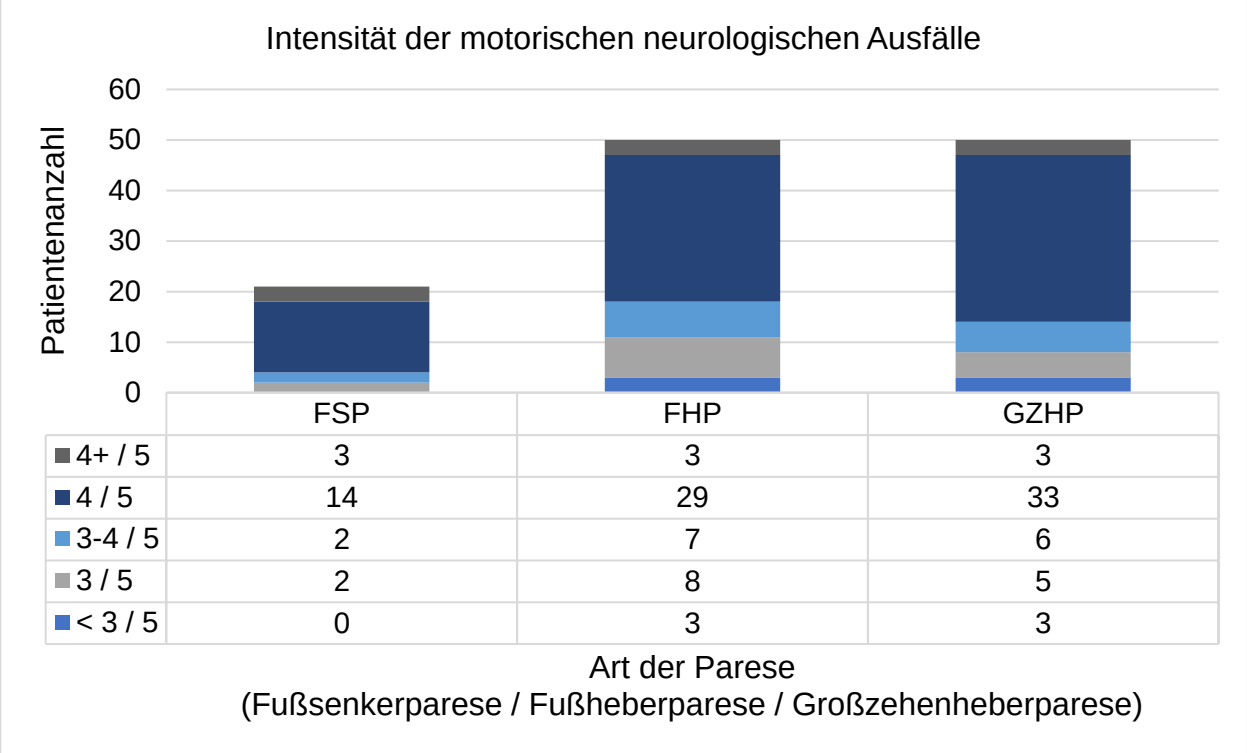


Abb. 13: Differenzierung der motorischen Ausfälle

Das Kreisdiagramm zeigt die Verteilung motorischer neurologischer Ausfälle innerhalb der Studiengruppe. Dargestellt sind die absoluten und relativen Häufigkeiten verschiedener Paresen, darunter Hüftbeuger-, Kniestrecker-, Fußsenker-, Fußheber- und Großzehenheberparesen.



	FSP	FHP	GZHP
4+ / 5	3	3	3
4 / 5	14	29	33
3-4 / 5	2	7	6
3 / 5	2	8	5
< 3 / 5	0	3	3

Abb. 14: Intensität der motorischen Ausfälle

Das Balkendiagramm zeigt die Verteilung der motorischen neurologischen Ausfälle nach Intensität. Dargestellt sind die Häufigkeiten der Fußsenker-, Fußheber- und Großzehenheberparesen, differenziert nach Muskelkraftgraden. Die zugehörige Tabelle ergänzt die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Paresestärken.

3.2 Radiologische Auswertung

Hurxthalmaße

Zur Beurteilung der Chondrosegrade innerhalb der Studiengruppe wurde die Klassifikation nach Hurxthal herangezogen. Die Analyse zeigt, dass Grad II mit 30 % am häufigsten auftrat, gefolgt vom schwersten Chondrosegrad III mit 20 %. Ein geringer Anteil der Studienteilnehmer (16 %) wies keine Chondrose auf, während 34 % der Fälle Grad I zeigten. Die durchschnittliche relative Bandscheibenhöhe nach Hurxthal betrug für die untersten beiden Segmente L 4/5 (71 %) bzw. für L 5/ S1 (65 %) (vgl. Tab. 6). Dies zeigt erwartungsgemäß die Lokalisationen der am meisten betroffenen Segmente der LWS.

Tab. 6: Deskriptive Statistiken der radiologischen Erhebung

Die Tabelle stellt die Lage- und Streuungsmaße der in der radiologischen Auswertung erhobenen Variablen dar. Neben den durchschnittlichen relativen Bandscheibenhöhen nach Hurxthal sind ebenfalls Informationen bezüglich des Spinalkanals enthalten. Für binäre Variablen sind lediglich die absolute und relative Häufigkeit angegeben.

	Mittelwert	Median	Standard-abw.	25%-Quantil	75%-Quantil
Hurxthalhöhe L 1/2	92.50	97.50	10.26	88.00	100.00
Hurxthalhöhe L 2/3	90.19	93.50	10.86	84.00	100.00
Hurxthalhöhe L 3/4	86.36	88.00	12.83	79.25	98.00
Hurxthalhöhe L 4/5	71.18	71.00	15.75	60.00	81.00
Hurxthalhöhe L 5/ S1	65.55	64.00	17.00	52.00	76.75
Spinalkanalbreite in mm	9.68	9.65	2.82	7.83	11.30
	Anzahl absolut	Anzahl relativ			
Spinalstenose	29	0,15			

Die Berechnung der Spinalkanalweite sollte die Begleitpathologie die äußeren anatomischen Gegebenheiten quantifizieren. Innerhalb eines engen Spinalkanals wirkt sich das Auftreten einer noch zusätzlichen Beengung durch einen Bandscheibenvorfall natürlich noch gravierender aus als ohne eine Spinalkanalenge. Die mittlere Weite des Spinalkanals betrug zwischen 9 - 11 mm. In nur einem geringen Prozentsatz lag eine absolute Spinalstenose (7 mm) bzw. eine relative Spinalstenose vor (7 %).

Im Folgenden werden Maße der Bandscheibenvorfälle innerhalb der Stichprobe dargestellt (vgl. Tab. 7). Der größte Teil der Patient*innen wies bei dem Vorfall eine Bandscheibenoberfläche von 80-95 mm2 auf, gefolgt von den Umfangsgrößen 65-80 bzw. 95-110 mm2. Die häufigste Länge des Bandscheibenvorfalls an der Basis beim Austritt durch das Ligamentum anulare lag zwischen 6-7 mm gefolgt von der Länge 7-8 mm. Bei der Klassifikation fand sich in der größten Gruppe (37 %) ein direkter Kontakt der Nervenwurzel zum Bandscheibenvorfall allerdings ohne Anhebung der Nervenwurzel

Tab. 7: Deskriptive Statistiken der Vorfallsgröße
Die Tabelle stellt Lage- und Streuungsmaße für Oberflächengrößen (in mm^2) und Längen (in mm) des Bandscheibenvorfalls (NPP), der Foramina, der Nervenwurzel, des Defektes sowie dem residualen freien Raum dar.

	Mittelwert	Median	Standard-abw.	25%-Quan-til	75%-Quan-til
Fläche NPP	104.11	98.00	43.27	74.00	128.75
Länge NPP	7.89	7.50	2.27	6.20	9.30
Fläche Foramina	114.48	114.00	24.98	98.00	129.00
Fläche Nervenurzel	30.55	30.00	10.62	23.00	37.75
Fläche Defekt	32.71	28.00	15.87	22.00	40.75
Fläche Freiraum	50.65	49.00	19.65	37.00	63.00

Zur Beurteilung der neuroforaminalen Beteiligung wurde die Klassifikation der Neuroforamina aus Schema 1 des Anhangs vorgenommen. Die Analyse zeigt, dass in 37 % der Fälle ein direkter Kontakt zur Nervenwurzel bestand, jedoch ohne Anhebung oder Kompression. In 30 % der Fälle wurde eine Anhebung der Nervenwurzel festgestellt, während in 26 % kein Kontakt zur Nervenwurzel nachgewiesen werden konnte. Eine tatsächliche Kompression der Nervenwurzel lag in lediglich 7 % der untersuchten Fälle vor.

Die Modic-Klassifikation dient der Einteilung von degenerativen Veränderungen an den Wirbelkörperendplatten und spiegelt das Ausmaß struktureller Veränderungen wider. In der vorliegenden Studiengruppe zeigten 15 % der Patient*innen entzündliche Veränderungen vom Typ I, die durch ein erhöhtes Flüssigkeitsgehalt im Knochenmark gekennzeichnet sind. Der überwiegende Anteil (82 %) der Patient*innen wies degenerative Veränderungen des Typs II auf, die eine Fettumwandlung des Knochenmarks anzeigen. Nur ein kleiner Anteil von 3 % der untersuchten Patient*innen

zeigte eine fortgeschrittene Degeneration mit sklerotischen Veränderungen entsprechend Modic Typ III.

Die Facettengelenksarthrose wurde gemäß der Fujiwara-Klassifikation in drei Schweregrade eingeteilt. In der vorliegenden Kohorte zeigte sich bei 21 % der Patient*innen eine geringe Arthrose der Facettengelenke. Eine mäßige Arthrose wurde bei 50 % der untersuchten Fälle festgestellt, während 29 % der Patient*innen eine ausgeprägte Facettengelenksarthrose aufwiesen. Diese Verteilung unterstreicht die hohe Prävalenz degenerativer Veränderungen der Facettengelenke bei Patient*innen mit lumbalen Beschwerden.

Tab. 8: Deskriptive Statistiken der Muskel- und Fettgrößen
Die Tabelle zeigt Lage- und Streuungsmaße für die Oberflächengrößen (in mm^2) der Muskeln und des segmentalen Fettanteils. Es wird nach betroffener Seite (betr. Seite), Gegenseite und ventraler Muskulatur unterschieden. Zudem sind die Messergebnisse anhand vereinfachter Messung dargestellt.

	Mittelwert	Median	Standard -abw.	25%-Quantil	75%-Quantil
Muskel A (betr. Seite)	1467.49	1371.00	710.84	882.75	1962.25
Fett A 1 (betr. Seite)	303.64	234.00	238.27	137.25	386.75
Muskel B (Gegenseite)	1469.11	1366.50	741.76	867.50	1962.75
Fett B 1 (Gegenseite)	278.20	221.50	190.70	145.25	378.00
Muskel ventral C	1320.88	1248.50	502.32	947.00	1691.00
Muskel ventral D	1318.90	1234.50	503.52	935.75	1688.50
Muskel A (Vereinfacht)	799.36	695.50	422.53	497.00	971.75
Muskel B (Vereinfacht)	810.09	720.50	435.32	502.75	988.75
Muskel C (Vereinfacht)	924.27	887.00	414.41	580.75	1239.25
Muskel D (Vereinfacht)	921.02	812.00	426.83	602.75	1191.50

Der größte Anteil der Rückenmuskeln im Bereich der Muskulatur dorsal auf der vom Bandscheibenvorfall betroffenen Seite beträgt zwischen 700- 1100 $mm^{2.}$ Im Folgenden werden die Umfänge des segmentalen Fettanteils sowie die gleichartigen Umfänge der Muskeln jeweils auf der betroffenen und nicht vom Bandscheibenvorfall betroffenen Seite in Abbildungen aufgeführt. Danach werden die Umfänge bei vereinfachter Messung aufgeführt.

Verhältnisse von Muskel zu Fett auf der Seite des Bandscheibenvorfalls und der Gegenseite

Die Bildung eines Quotienten aus Muskel/Fett jeweils auf der betroffenen Seite und der Gegenseite zeigt einen Median von 5,074 im Vergleich zu 5,799 auf der unbetroffenen Seite. Damit zeigt sich eine Minderung des Muskelumfangs der dorsalen segmentalen

autochthonen Rückenmuskulatur bzw. damit einhergehend eine Vermehrung des Fettgewebes als Ausdruck der gestörten segmentalen Innervation. Bildet man einen Quotienten aus den berechneten Flächen von Muskel und Fett, so zeigt ein Wert unterhalb von 5 eine muskuläre Atrophie der segmentalen Muskulatur an (Schwellenwert nach der in dieser Arbeit empirisch entwickelten LMA-Klassifikation; vgl. Kap. 3.4 sowie Tab. 16).

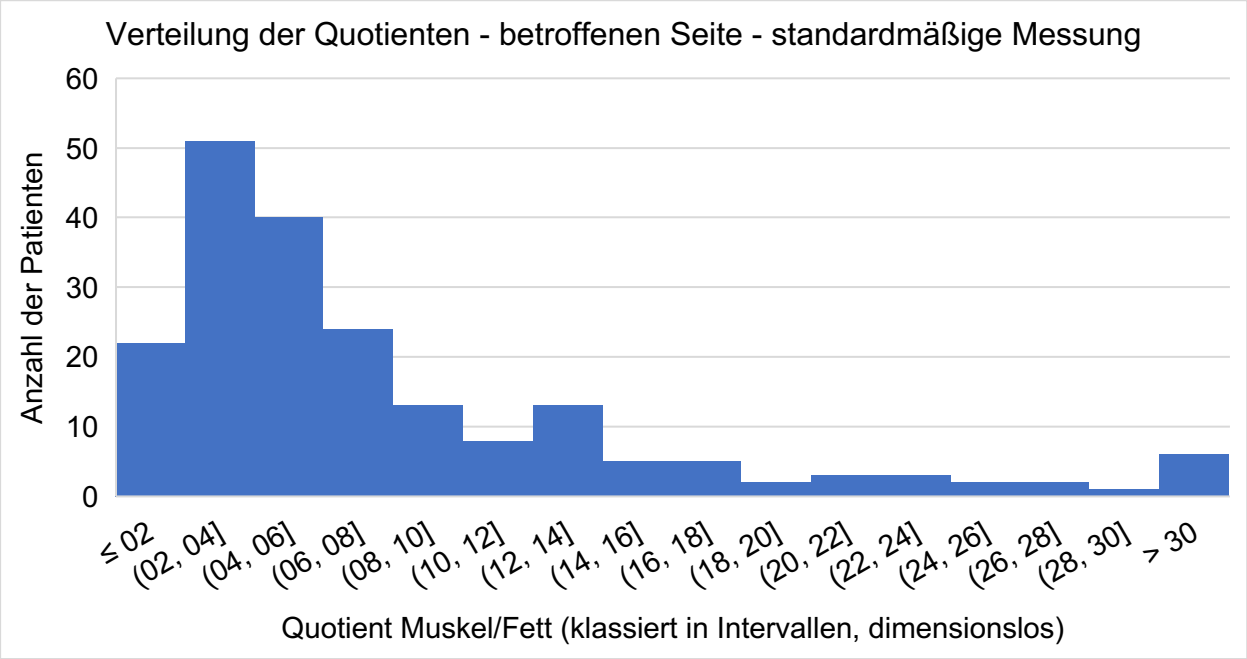


Abb. 15: Verhältnisse von Muskel zu Fett auf der Seite des Bandscheibenvorfalls und der Gegenseite

Das Histogramm zeigt die Verteilung der Quotienten aus Muskel und Fett für die Stichprobe.

Die Verteilung der Quotienten zeigt eine rechtsschiefe Verteilung, die in der Einzelanalyse durch männliche Patient*innen zustande kommt, die einen hohen BMI größer als 30 aufweisen. Bei diesen Patient*innen zeigt sich im Bereich der Wirbelsäule eine große Muskelmasse mit teilweise sehr geringen Anteilen von Fett. Die große Muskelmasse resultiert eventuell aus der Vergrößerung der dorsalen Muskelmasse als Belastungshypertrophie beim Abfangen der Last aus dem abdominalen Fettkörper.

3.3 Beantwortung der empirischen Forschungsfragen

Frage 1: *Liegen Zusammenhänge zwischen der Berufstätigkeit mit häufigem schwerem Heben und Tragen und dem Ausmaß des im MRT flächenmäßig berechneten Bandscheibenvorfalles vor?*

Es soll untersucht werden, ob die Art der körperlichen Belastung im Berufsalltag mit der Fläche des Bandscheibenvorfalls (NPP) in Zusammenhang steht. Dazu wurden die Vorfallsflächen in mm^2 zwischen den verschiedenen Berufsgruppen verglichen. Die beruflichen Tätigkeiten wurden in drei Kategorien eingeteilt: (1) stehende Tätigkeiten mit Heben und Tragen, (2) stehende und sitzende Tätigkeiten mit Heben und Tragen sowie (3) sitzende Tätigkeiten ohne Heben und Tragen. Ein Überblick über die Ergebnisse ist in Tab. 9 dargestellt.

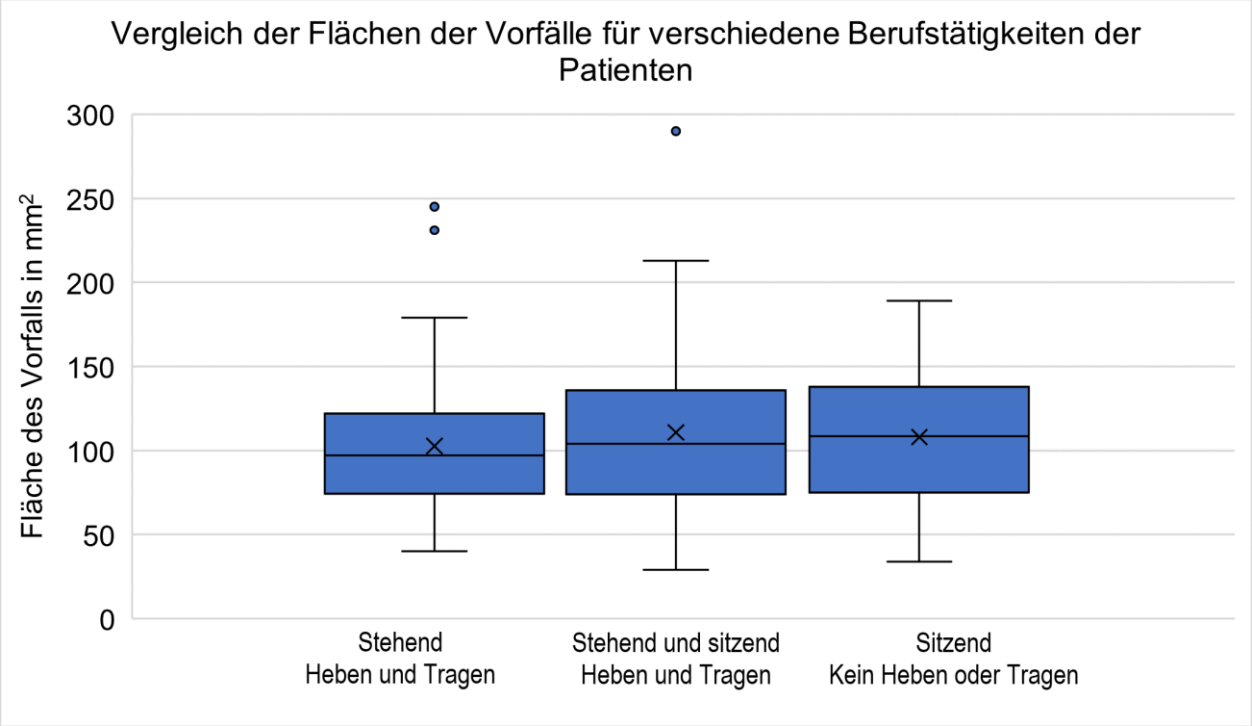


Abb. 16: Vergleich der Fläche des Bandscheibenvorfalls mit der Berufstätigkeit
Die Boxplot-Darstellung zeigt den Vergleich der Bandscheibenvorfall-Flächen in Abhängigkeit von der beruflichen Tätigkeit der Patient*innen. Die Kategorien umfassen stehende Tätigkeiten mit Heben und Tragen, gemischte stehende und sitzende Tätigkeiten mit Heben und Tragen sowie rein sitzende Tätigkeiten ohne körperliche Belastung. Studienteilnehmer mit unklarer Berufstätigkeit wurden ausgeschlossen.

Die Boxplot-Darstellung in Abb. 16 veranschaulicht die Verteilung der Vorfallsflächen innerhalb der jeweiligen Gruppen. Die Mittelwerte der Vorfallsflächen unterscheiden sich zwischen den Gruppen nur geringfügig, wobei eine tendenzielle Zunahme der Vorfallgröße mit abnehmender körperlicher Belastung zu erkennen ist.

Tab. 9: Fläche der Vorfälle für verschiedene Berufstätigkeiten
In der Tabelle sind die Mittelwerte der Flächen der Vorfälle (NPP) in mm2 getrennt für Patient*innen verschiedener Berufsgruppen dargestellt. Diese umfassen (1) stehende Tätigkeiten mit Heben und Tragen, (2) stehende und sitzende Tätigkeiten ebenfalls mit Heben und Tragen sowie (3) sitzende Tätigkeiten ohne Heben und Tragen. Zudem ist der Standardfehler und der Stichprobenumfang der jeweiligen Subgruppe ausgewiesen. Darunter ist die Differenz der Mittelwerte und in Klammern dessen t-Werte von zweiseitigen Tests auf hypothetische Differenz in Höhe von null dargestellt.

	Mittelwert	Standardfehler	N
(1) *Stehend*	103.92	4.38	85
(2) *Stehend & Sitzend*	106.13	7.12	45
(3) *Sitzend*	108.66	7.38	35
	(1) vs. (2)	(2) vs. (3)	(1) vs. (3)
Differenz der Mittelwerte	2.22	2.53	4.74
	(0.27)	(0.25)	(0.56)
p-Wert	0.79	0.58	0.81

Um zu prüfen, ob sich die geringfügigen deskriptiven Unterschiede zwischen den Gruppen auch inferenzstatistisch messen lassen, wurden t-Tests durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls in Tab. 9 aufgeführt sind. Die berechneten p-Werte liegen durchweg über 0,50, sodass die Unterschiede zwischen den Mittelwerten nicht als statistisch signifikant betrachtet werden können. Somit kann kein belastbarer Zusammenhang zwischen der körperlichen Tätigkeit im Berufsleben und der Intensität des Bandscheibenvorfalls festgestellt werden.

Frage 2 a: Gibt es Zusammenhänge zwischen dem Ausmaß des Bandscheibenvorfalles (bzw. der Fläche des Vorfalles) und der Querschnittsfläche des restverfügbaren freien Raumes im Recessus spinalis (in mm²)?

Es soll untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Fläche des Bandscheibenvorfalls (NPP, in mm²) und dem restverfügbaren freien Raum im Recessus spinalis (FREIRAUM, in mm²) besteht. Dazu wurde eine OLS-Regression durchgeführt, wobei die Vorfallsfläche als unabhängige Variable und der freie Raum als abhängige Variable betrachtet wurde. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tab. 10 dargestellt.

Tab. 10: Regressionsergebnisse hinsichtlich Fläche des Vorfalls und freiem Raum im Spinalkanal

Die Tabelle stellt die Ergebnisse einer Regression mittels der Kleinst-Quadrat-Methode (OLS) dar. Gemessen wird der Zusammenhang zwischen Fläche des Vorfalls (NPP) und des restverfügbaren freien Raumes in Recessus spinalis (FREIRAUM) in mm^2. Unter den Ergebnissen der Koeffizienten sind die t-Werte eines zweiseitigen Tests auf hypothetische Differenz in Höhe von null dargestellt. Zudem sind die Stichprobengröße (N) und die Anpassungsgüte des Modells anhand des einfachen Bestimmtheitsmaßes (R^2) angegeben.

Regressionsergebnisse anhand OLS-Regression		
	FREIRAUM	*p-Wert*
NPP	-0.0335	0.30
	(-1.04)	
Konstante	54.1310	0.00
	(14.92)	
N	200	
R^2	0.01	

Zwischen der Fläche des Vorfalls (NPP) und dem restverfügbaren freien Raum im Recessus spinalis (FREIRAUM) zeigt das Modell zwar einen leichten, negativ gerichteten Effekt (–0,0335 mm² pro zusätzlichem mm² Vorfallfläche), jedoch ist dieser statistisch nicht signifikant (p = 0,30). Damit kann kein belastbarer Zusammenhang zwischen beiden Variablen festgestellt werden. Auch das Bestimmtheitsmaß (R^2 = 0,01) weist darauf hin, dass nur ein sehr geringer Teil der Varianz des freien Raums im Spinalkanal durch die Vorfallsfläche erklärt wird.

Frage 2 b: *Gibt es Zusammenhänge zwischen dem Ausmaß des Bandscheibenvorfalles (bzw. der Fläche des Vorfalles) und der Höhe des klinischen Lasègue-Zeichens?*

Es soll untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Fläche des Bandscheibenvorfalls (NPP, in mm²) und der Höhe des klinischen Lasègue-Zeichens (in Grad) besteht. Zur Analyse wurde eine OLS-Regression durchgeführt, in der die Fläche

des Vorfalls als abhängige Variable und das Lasègue-Zeichen als unabhängige Variable betrachtet wurde. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tab. 11 dargestellt.

Tab. 11: Regressionsergebnisse hinsichtlich Lasègue und Fläche des Vorfalls
Die Tabelle stellt die Ergebnisse einer Regression mittels der Kleinst-Quadrat-Methode (OLS) dar. Gemessen wird der Zusammenhang zwischen Fläche des Vorfalls (NPP) in mm^2 und der Höhe des klinischen Lasègue-Zeichens (LASÈGUE) in Grad. Unter den Ergebnissen der Koeffizienten sind die t-Werte eines zweiseitigen Tests auf hypothetische Differenz in Höhe von null dargestellt. Zudem sind die Stichprobengröße (N) und die Anpassungsgüte des Modells anhand des einfachen Bestimmtheitsmaßes (R^2) angegeben.

Regressionsergebnisse anhand OLS-Regression		
	NPP	*p*-Wert
LASÈGUE	0.2876	0.25
	(1.17)	
Konstante	111.4566	0.00
	(19.67)	
N	149	
R^2	0.01	

Das Modell schätzt, dass pro zusätzlichem Grad des Lasègue-Zeichens die Vorfallsfläche um 0,2876 mm² zunimmt. Dieser Koeffizient ist statistisch nicht signifikant (p = 0,25) und das Bestimmtheitsmaß (R^2 = 0,01) zeigt, dass lediglich 1 % der Varianz der Vorfallsfläche durch das Lasègue-Zeichen erklärt wird. Somit lässt sich kein belastbarer Zusammenhang zwischen diesen Variablen feststellen.

Bei der vorliegenden Analyse wurden Patient*innen mit negativem Lasègue-Zeichen aus der Untersuchung entfernt. Für diese schlug das Zeichen nicht an, sodass keine Gradzahl gemessen wurde. Da diese in Bezug auf die Vorfallsfläche trotzdem Informationsgehalt aufweisen könnten, soll zudem eine Analyse unter Einbeziehung aller Patient*innen der Stichprobe durchgeführt werden. Hierzu wird ein Vergleich der Flächen der Vorfälle (NPP) zwischen Patient*innen mit positiven und negativen Lasègue-Zeichen durchgeführt [Frage 3B) (Teil2)]. Zunächst wurde die Höhe des Lasègue-Zeichens als Determinante für die Fläche des Vorfalls (NPP) herangezogen. Nun wird das Vorhandensein des

Lasègue-Zeichens (positiv oder negativ) untersucht. Dazu werden die Mittelwerte der Vorfallsfläche für beide Gruppen getrennt betrachtet und mit einem t-Test auf Unterschiede getestet. Die Ergebnisse sind in Tab. 12 sowie Abb. 17 dargestellt.

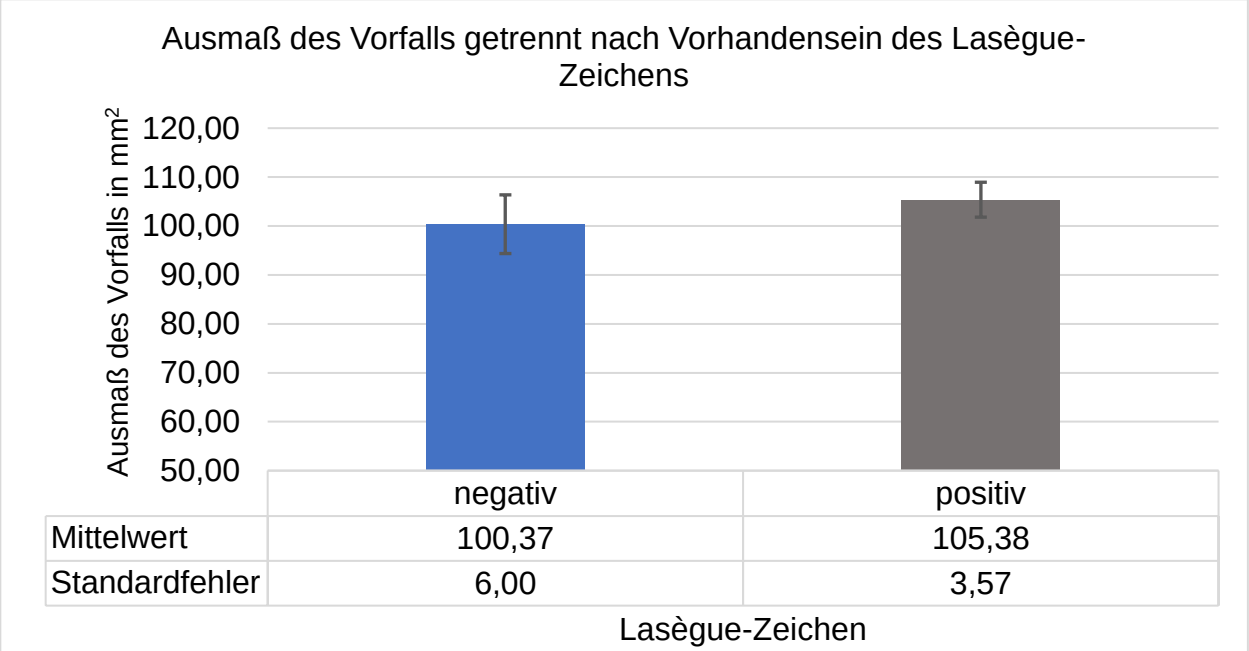


Abb. 17: Fläche des Bandscheibenvorfalls in Abhängigkeit vom Lasègue-Zeichen

Das Balkendiagramm zeigt das durchschnittliche Ausmaß des Bandscheibenvorfalls getrennt nach positivem und negativem Lasègue-Zeichen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar. Eine zugehörige Tabelle zeigt die Mittelwerte und Standardfehler für beide Gruppen.

Tab. 12: Mittelwertvergleich der Vorfallsflächen nach Lasègue
In der Tabelle sind die Mittelwerte der Flächen der Vorfälle (NPP) in mm2 getrennt für Fälle mit positivem und negativem Lasègue-Zeichen dargestellt. Zudem ist die Standardabweichung und der Stichprobenumfang der jeweiligen Subgruppe ausgewiesen. Darunter ist die Differenz der Mittelwerte und in Klammern dessen t-Werte eines zweiseitigen Tests auf hypothetische Differenz in Höhe von null dargestellt.

t-Test auf Differenz der Mittelwerte			
	Mittelwert	Standardfehler	N
*Lasègue **negativ***	100.37	6.00	51
*Lasègue **positiv***	105.38	3.57	149
Differenz der Mittelwerte	5.01 (0.72)	*p*-Wert = 0.48	

Die Analyse zeigt, dass die durchschnittliche Vorfallsfläche bei Patient*innen mit positivem Lasègue-Zeichen bei 105,38 mm² liegt, während sie bei Patient*innen mit negativem Lasègue-Zeichen 100,37 mm² beträgt. Die Differenz der Mittelwerte beträgt 5,01 mm², jedoch ist dieser Unterschied statistisch nicht signifikant (p = 0,48). Somit kann kein belastbarer Zusammenhang zwischen der Vorfallsfläche und dem Vorhandensein eines positiven oder negativen Lasègue-Zeichens festgestellt werden.

Frage 3: *Besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zeitraum der präoperativ angegebenen Schmerzen und dem Ausmaß der Atrophie der Rückenstreckmuskeln im betroffenen Bereich sowie dem Ausmaß der fettigen Atrophie im betroffenen Segment?*

Es soll untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Dauer der präoperativ angegebenen Schmerzen (Schmerzmonate) und (1) der größten messbaren Fläche der Rückenstreckmuskulatur in mm² (im Segment der jeweiligen Atrophie) sowie (2) dem Ausmaß der fettigen Atrophie in der betroffenen Region besteht. Hierzu werden zwei separate OLS-Regressionen durchgeführt, wobei die Muskelgröße und die fettige Atrophie jeweils als abhängige Variablen verwendet werden. Die Ergebnisse dieser Regressionen sind in Tab. 13 dargestellt.

Tab. 13: Regressionsergebnisse der Muskel- und Fettgrößen nach Schmerzmonaten
Die Tabelle stellt die Ergebnisse zweier Regressionen mittels der Kleinst-Quadrat-Methode (OLS) dar. Gemessen wird der Zusammenhang zwischen der Höhe der Schmerzmonate und der größten messbaren Fläche des Rückenstreckmuskels in mm² (A) sowie dessen fettiger Atrophie (A1) in mm2. Bei letzterer Regression werden aufgrund von Problemen der Heteroskedastizität White-Standardfehler verwendet. Unter den Ergebnissen der Koeffizienten sind die t-Werte eines zweiseitigen Tests auf hypothetische Differenz in Höhe von null dargestellt. Zudem sind die Stichprobengröße (N) und die Anpassungsgüte des Modells anhand des einfachen Bestimmtheitsmaßes (R2) angegeben.

Regressionsergebnisse anhand OLS-Regression

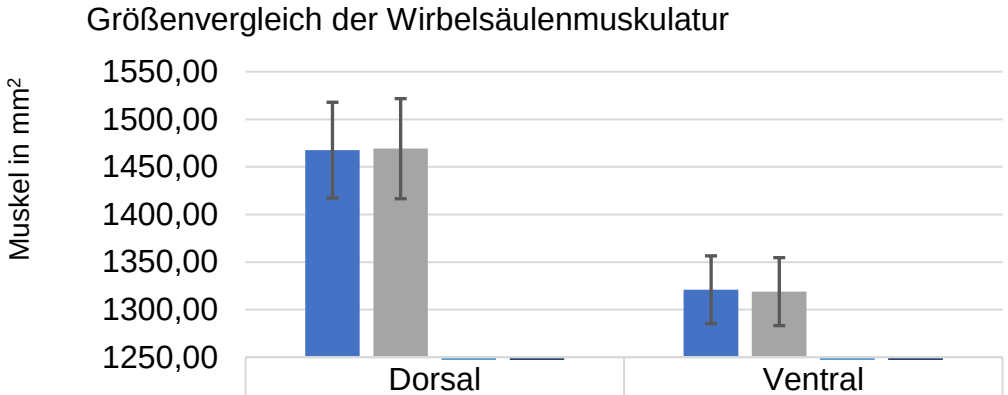
	MUSKEL	*p*-Wert	*FETT*	*p*-Wert
SCHMERZMONATE	0.2770	0.95	6.6354	0.00
	(4.79)		(2.55)	
Konstante	1465.39	0.00	253.38	0.01
	(62.18)		(19.91)	
N	200		200	
R^2	0.00		0.09	

Die Ergebnisse zeigen, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schmerzmonate und der größten messbaren Fläche der Rückenstreckmuskulatur in mm² besteht (p = 0,95). Der entsprechende Regressionskoeffizient ist statistisch insignifikant, und das Bestimmtheitsmaß (R^2 = 0,00) zeigt, dass die Schmerzmonate keinerlei Varianz in der Muskelgröße erklären können. Hingegen besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schmerzmonate und dem Ausmaß der fettigen Atrophie (p < 0,01). Die Regression zeigt, dass mit jedem zusätzlichen Schmerzmonat die fettige Atrophie um durchschnittlich 6,64 mm² zunimmt. Das Bestimmtheitsmaß (R^2 = 0,09) weist darauf hin, dass 9 % der Varianz in der fettigen Atrophie durch die Schmerzmonate erklärt werden können.

Frage 4: *Zeigt sich eine Seitendifferenz zwischen der dorsalen und ventralen Wirbelsäulenmuskulatur auf der von einem Bandscheibenvorfall betroffenen Seite und der unbetroffenen Gegenseite?*

Es soll untersucht werden, ob die dorsale und ventrale Wirbelsäulenmuskulatur auf der von einem Bandscheibenvorfall betroffenen Seite in ihrer größten messbaren Querschnittsfläche in mm² von der unbetroffenen Gegenseite abweicht. Dabei wird sowohl die dorsale als auch die ventrale Muskelgruppe getrennt betrachtet.

Zur Beantwortung der Fragestellung werden die Muskelquerschnittsflächen in mm² ermittelt und für die betroffene sowie die unbetroffene Seite verglichen. Die Mittelwerte beider Gruppen werden mittels eines t-Tests auf Unterschiede geprüft. stellt die durchschnittlichen Flächen der dorsalen und ventralen Wirbelsäulenmuskulatur auf der betroffenen und unbetroffenen Seite grafisch dar. Die zugehörigen Mittelwerte und Standardfehler sind in Tab. 14 aufgeführt. Die Mittelwerte für die dorsale Muskulatur zeigen, dass die vom Bandscheibenvorfall betroffene Seite im Durchschnitt 1,625 mm² kleiner ist als die unbetroffene Seite. Bei der ventralen Muskulatur zeigt sich hingegen das umgekehrte Muster: Die betroffene Seite weist eine im Mittel 1,980 mm² größere Fläche auf als die unbetroffene Seite.



	Dorsal	Ventral
Betroffen - Mittelwert	1467,49	1320,88
Unbetroffen - Mittelwert	1469,11	1318,90
Betroffen - Standardfehler	50,39	35,61
Unbetroffen - Standardfehler	52,58	35,69

Abb. 18: Vergleich der größten messbaren Querschnittsflächen der Wirbelsäulenmuskulatur dorsal und ventral

Das Balkendiagramm zeigt den Vergleich der Muskelquerschnittsfläche der dorsalen und ventralen Wirbelsäulenmuskulatur auf der betroffenen und unbetroffenen Seite. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar. Eine zugehörige Tabelle gibt die Mittelwerte und Standardfehler für beide Muskelgruppen an.

Tab. 14: Fläche der Vorfälle für verschiedene Berufstätigkeiten

In der Tabelle sind die Mittelwerte der Flächen der Wirbelsäulenmuskulatur in mm^2 getrennt nach dorsalen und ventralen sowie vom Bandscheibenvorfall betroffenen und unbetroffenen Seiten dargestellt. Zudem ist die Standardabweichung und der Stichprobenumfang (N) der jeweiligen Subgruppe ausgewiesen. Darunter ist die Differenz der Mittelwerte und in Klammern dessen t-Werte von zweiseitigen Tests auf hypothetische Differenz in Höhe von null dargestellt.

	Mittelwert	Standard-fehler	N
(A) Dorsal betroffen	1467.49	50.39	200
(B) Dorsal Gegenseite	1469.11	52.58	200
(C) Ventral betroffen	1320.88	35.61	200
(D) Ventral Gegenseite	1318.90	35.69	200

t-test auf Differenz der Mittelwerte

	Dorsal (A vs. B)		Ventral (C vs. D)	
Differenz der Mittelwerte	-1.625 (0.12)	*p*-Wert = 0.89	1.980 (0.14)	*p*-Wert = 0.97

Diese Unterschiede sind jedoch statistisch nicht signifikant (p = 0,89 für die dorsale und p = 0,97 für die ventrale Muskulatur). Somit kann kein belastbarer Zusammenhang zwischen dem Bandscheibenvorfall und einer Veränderung der Muskelgröße in den betrachteten Bereichen festgestellt werden. Die beobachteten Differenzen lassen sich lediglich deskriptiv als Tendenzen interpretieren, sind aber statistisch nicht von Zufallseffekten zu unterscheiden.

Frage 5: *Kann durch ein vereinfachtes Verfahren zur Umfangmessung der dorsalen autochthonen Rückenmuskulatur eine Annäherung an die tatsächlichen Umfänge der autochthonen Rückenmuskulatur in den betroffenen Segmenten erzielt werden und wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung?*

Es soll untersucht werden, ob eine vereinfachte Methode zur Umfangmessung der dorsalen autochthonen Rückenmuskulatur eine zuverlässige Annäherung an die standardmäßige Messung ermöglicht. Die vereinfachte Methode besteht darin, einen Kreis um die Muskelmasse des M. multifidus und des M. longissimus zu legen, während der M. iliocostalis aufgrund seiner variablen Form ausgespart wird.

Zur Beantwortung dieser Frage werden die Mittelwerte der Muskelgrößen für beide Messmethoden berechnet und die Differenzen mittels t-Tests auf Signifikanz geprüft. Zusätzlich werden die mittlere, minimale und maximale Abweichung zwischen beiden Methoden sowie der Anteil der vereinfachten Messungen, die innerhalb eines 25%-Intervalls der standardmäßigen Messung liegen, analysiert. Abb. 19 zeigt die Mittelwerte der Muskelgrößen in mm² für beide Methoden getrennt nach dorsaler und ventraler Muskulatur auf der betroffenen und unbetroffenen Seite. Die zugehörigen statistischen Werte sind in Tab. 15 dargestellt.

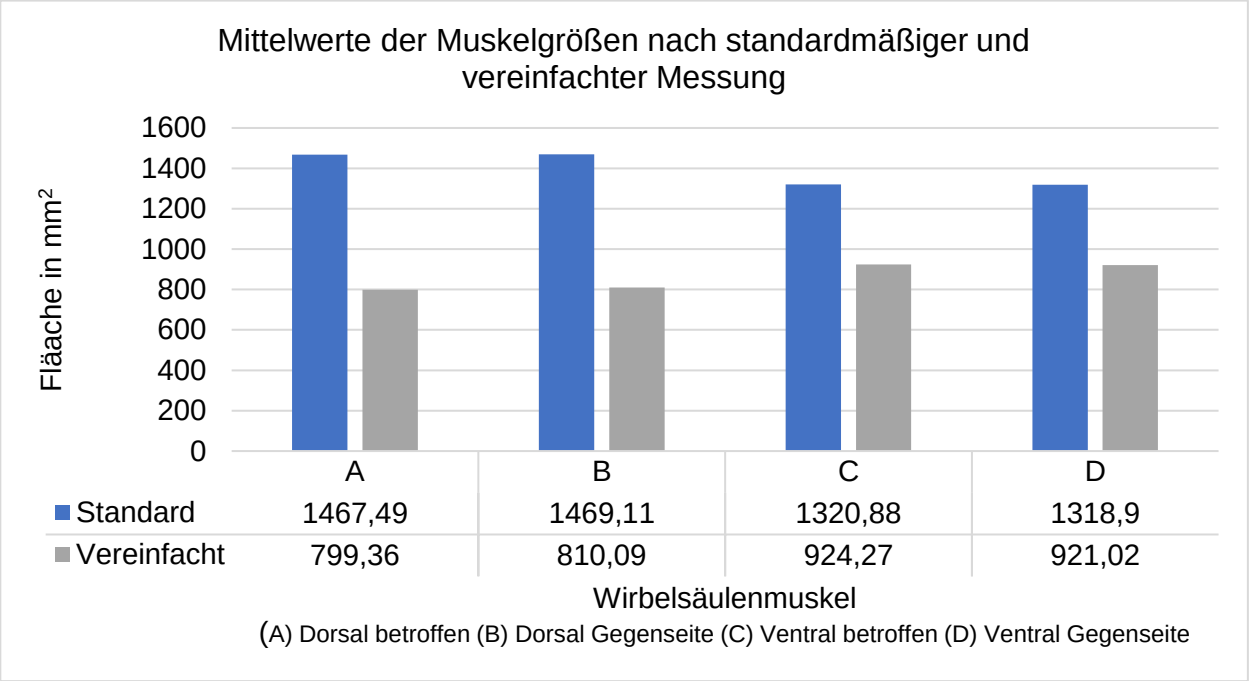


Abb. 19: Darstellung der Mittelwerte der Muskelgrößen nach standardmäßiger und vereinfachter Messung
Das Balkendiagramm zeigt die Mittelwerte der Muskelgrößen der dorsalen und ventralen Wirbelsäulenmuskulatur auf der betroffenen und unbetroffenen Seite. Die Werte werden sowohl für die standardmäßige als auch für die vereinfachte Messmethode dargestellt.

Die Analyse zeigt, dass die Mittelwerte der vereinfachten Messungen systematisch niedriger sind als die Mittelwerte der standardmäßigen Messung. Die Differenzen sind in allen Fällen statistisch hochsignifikant (p = 0,00). Die größte Abweichung zeigt sich bei der dorsalen Muskulatur, wo die vereinfachte Messung im Mittel um 43-44 % niedriger

liegt als die standardmäßige Methode. Die ventrale Muskulatur weist eine geringere, aber dennoch deutliche Abweichung von 32 % auf. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass die individuelle Abweichung zwischen beiden Methoden stark schwanken kann. Während die geringste Abweichung nur 6 % beträgt, liegt die maximale Abweichung bei 88 %. Lediglich 17 % bis 40 % der vereinfachten Messungen fallen in ein 25%-Intervall um die Werte der standardmäßigen Messung. Diese Ergebnisse zeigen, dass die vereinfachte Methode keine präzise Annäherung an die standardmäßige Muskelmessung ermöglicht. Insbesondere die große Variabilität in der Abweichung weist darauf hin, dass die Methode in klinischen oder wissenschaftlichen Anwendungen mit Vorsicht interpretiert werden sollte.

Tab. 15: Vergleich der standardmäßigen und vereinfachten Messung
In der Tabelle sind die Mittelwerte der Rückenstreckmuskeln in mm^2 für die standardmäßige und vereinfachte Messung gegenübergestellt. Darunter ist die Differenz der Mittelwerte und in Klammern deren t-Werte eines zweiseitigen Tests auf hypothetische Differenz in Höhe von null dargestellt. Zudem ist die mittlere, minimale und maximale Abweichung der Ergebnisse zwischen den Messverfahren sowie der Anteil der vereinfachten Messungen, der im 25 %-Intervall um die standardmäßige Messung liegt, angegeben. Dies ist für die Seite des Bandscheibenvorfalls (Spalte 1 und 2) und die Gegenseite (Spalte 3 und 4) jeweils für den dorsalen und ventralen Wirbelsäulenmuskel dargestellt.

	Dorsal betroffen	Dorsal Gegen-seite	Ventral betroffen	Ventral Gegen-seite
Mittelwert **standardmäßig**	1459.08	1460.66	1327.51	1325.52
Mittelwert **vereinfacht**	794.96	805.32	928.91	925.65
Differenz der Mittelwerte	-664.12	-655.34	-398.60	-399.87
	(22.45)	(21.51)	(20.51)	(19.51)
p-Wert	0.00	0.00	0.00	0.00
Mittlere relative Abw.	44%	43%	32%	32%
Minimale relative Abw.	6%	8%	11%	9%
Maximale relative Abw.	78%	79%	88%	87%
Anteil in 25 %-Intervall	17%	17%	38%	40%

3.4 Vorschlag für eine Klassifikation der lumbalen muskulären Atrophie (LMA)

Im Folgenden wird ein Vorschlag für eine Klassifikation der spinalen muskulären Atrophie erstellt (vgl. Tab. 16 und). Dieser beruht auf der Gruppierung der Quotienten Muskel/ Fett im Rahmen der Standardmessung und bei vereinfachter Messung.

Die Klassifikation unterteilt in 4 Atrophiegrade wobei die Bereiche nach der Standardmessung als auch für eine vereinfachte Messung angegeben werden.

Die Einteilungen erfolgten aufgrund der erhobenen Quotienten in der Studiengruppe von 200 Proband*innen. Der Abstand zwischen den Atrophiegraden beträgt jeweils einen Quotientenpunkt sowohl in der Standardmessung als auch in der vereinfachten Bestimmungsmethode.

Tab. 16: Klassifikation der lumbalen muskulären Atrophie (LMA)
Die Tabelle zeigt die Einteilung der lumbalen muskulären Atrophie (LMA) anhand von Quotienten aus der Standardmessung und der vereinfachten Messung. Die Atrophiegrade reichen von Grad 0 (keine Atrophie) bis Grad 3 (schwere Atrophie), wobei für jede Messmethode spezifische Schwellenwerte angegeben sind.

Grad	*Atrophie*	*Quotient in Standardmessung*	*Quotient in vereinfachter Messung*
Grad 0	Keine Atrophie	>= 5,0	>= 3,0
Grad 1	Leichte Atrophie	< 5,0	< 3,0
Grad 2	Mittlere Atrophie	< 4,0	< 2,0
Grad 3	Schwere Atrophie	< 3,0	< 1,0

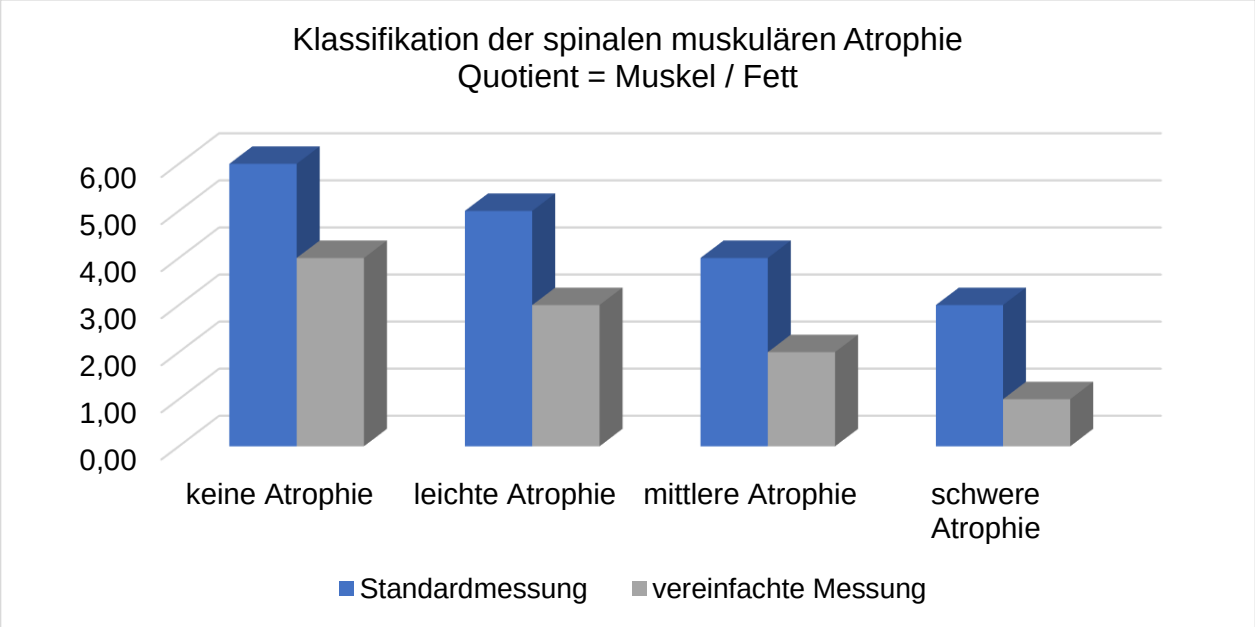
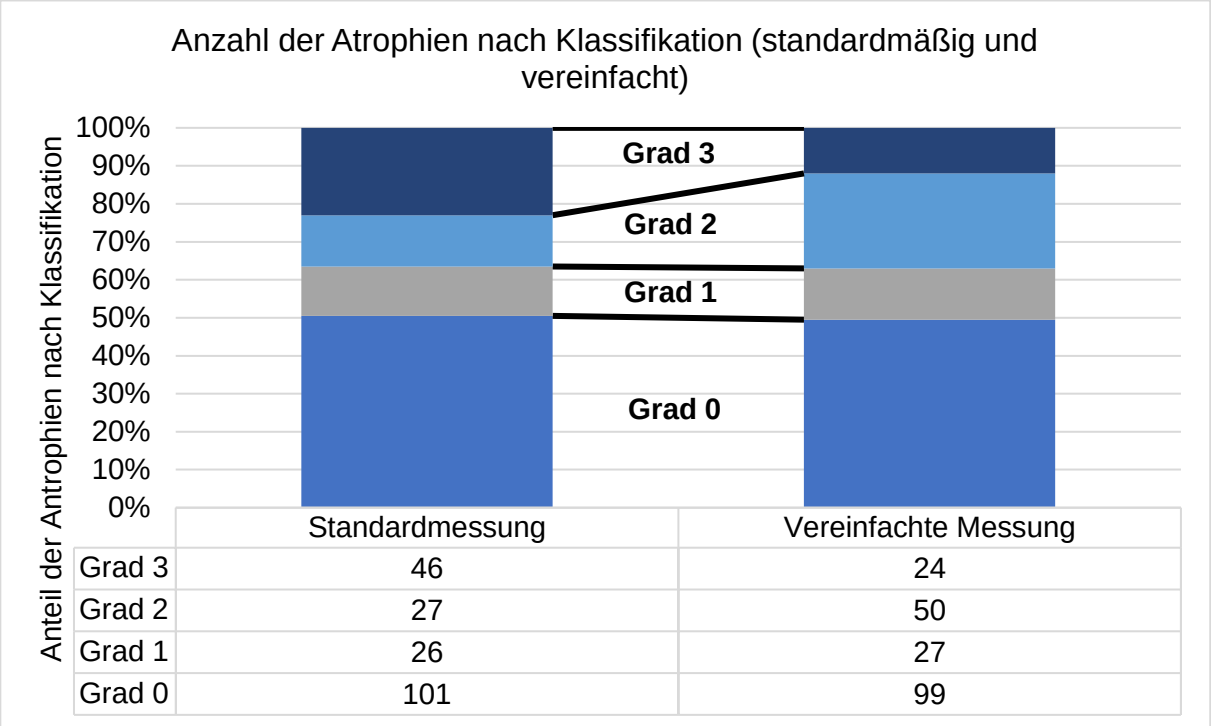


Abb. 20: Vorschlag für eine Klassifikation für die lumbale muskuläre Atrophie
Das Balkendiagramm zeigt eine Klassifikation der lumbalen muskulären Atrophie basierend auf dem Verhältnis von Muskel- zu Fettgewebe. Die Werte werden sowohl für die Standardmessung als auch für die vereinfachte Messmethode dargestellt und in die Kategorien keine, leichte, mittlere und schwere Atrophie unterteilt.

In der Abb. 21 wird die Verteilung der Atrophiegrade in der Studienpopulation dargestellt. Dabei findet sich bei ca. der Hälfte der Studienteilnehmer keine Atrophie. In der Gruppe der Standardmessung sind dies 101 und in der Gruppe der vereinfachten Messung 99 Proband*innen. Die Gruppe Grad 1 (leichte Atrophien) sind dies 26 versus 27 Proband*innen in den beiden unterschiedlichen Messverfahren. Die Gruppen Grad 2 (mittlere Atrophien) zeigen mit 27 und 50 Proband*innen (Differenz 23 Proband*innen) deutliche Unterschiede zwischen den beiden Messverfahren genau wie die Gruppen des Atrophiegrades 3 (schwere Atrophien) welche mit 46 versus 24 Proband*innen (Differenz 22 Proband*innen) den analogen Unterschied aufweisen.
Die Übereinstimmung der LMA-Klassifikation zwischen Standard- und vereinfachter Messung wurde an n = 200 Proband*innen geprüft (betroffene Seite). Insgesamt wurden 142 von 200 Proband*innen (71,0 %) identisch klassifiziert (Cohen's κ = 0,568, mittlere Übereinstimmung). Während die Klassen Grad 0 (keine Atrophie) und Grad 1 (leichte Atrophie) weitgehend übereinstimmend eingestuft werden, treten im Grenzbereich der

mittleren bis schweren Atrophie systematische Verschiebungen auf: 22 von 46 Proband*innen mit Grad 3 (Standardmessung) werden in der vereinfachten Messung als Grad 2 herabgestuft. In der Folge enthält Grad 2 in der vereinfachten Messung 23 zusätzliche Proband*innen (50 statt 27); Grad 3 verliert 22 Proband*innen (24 statt 46). Der Bowker-Test der 4 × 4-Klassifikations-Symmetrie verwirft die Annahme einer symmetrischen Reklassifikation hoch signifikant ($\chi^2 = 21{,}17$; $df = 5$; $p < 0{,}001$); die McNemar-Tests für Grad 2 ($b = 8$, $c = 31$; $p < 0{,}001$) und Grad 3 ($b = 23$, $c = 1$; $p < 0{,}0001$) bestätigen die Diskrepanz statistisch.

Die vereinfachte Messung liefert demnach im Bereich der schweren Atrophie systematisch falsch-negative Resultate. Insofern sollte eine App aufgrund der unterschiedlichen Validität der eingesetzten Messmethoden auf exakte Konturmessungen unter Einbeziehung des M. iliocostalis (zusätzlich zu M. multifidus und M. longissimus) zurückgreifen, auch wenn dies einen wesentlich höheren Erfassungsaufwand bedeutet.



	Standardmessung	Vereinfachte Messung
Grad 3	46	24
Grad 2	27	50
Grad 1	26	27
Grad 0	101	99

Abb. 21: Anzahl der Atrophien nach Klassifikation (standardmäßig und vereinfacht)

Die Abbildung stellt die Anzahl der Atrophien unterschiedlicher Klassifikationen nach standardmäßiger und vereinfachter Messung gegenüber. Anhand des Quotienten aus Muskelfläche und Fläche des Fettgewebes in mm2 wird eine Klassifikation des Atrophiegrades vorgenommen. Die Schwellenwerte für die Klassifikation sind in Tabelle 15 dargestellt. Die Abbildung zeigt als gestapelte Balken den Anteil der Atrophien nach Klassifikationen nach der standardmäßigen (links) und vereinfachten Messung (rechts). Unten werden die absoluten Anzahlen der Atrophiegrade tabellarisch dargestellt.

3.5 Kasuistiken

Kasuistik 1 (vgl. Abb.22) Casus 195, Männlich, Alter: 52 J, Schmerzen seit 2 Jahren. Beruf: Hafenarbeiter, BMI: 31,7, Raucher: Nein, Diagnose: Subligamentärer Bandscheibenvorfall L4/5 rechts. ND: Adipositas, Asthma bronchiale, klinisch Lasègue-Zeichen: Rechts bei 70° positiv. Neurologisch: Großzehenheberschwäche rechts KG 4+/5.radiologisch Chondrosegrad 1 in den Segmenten L4/5 sowie L 2/3 und L 5/ S1 Fläche der autochthonen Rückenmuskulatur auf der betroffenen Seite A - 1991, A1-707, Fläche der autochthonen Rückenmuskulatur auf der unbetroffenen Seite B-2059, B1-489, ventral, links - C-2889, ventral rechts D-2790 (jeweils in mm `2). Vereinfachtes Verfahren: A- 709, B-934, C-2113, D-2296 *Interpretation:* Es zeigt sich eine mittlere Atrophie (Grad 2) der segmentalen autochthonen Muskulatur auf der vom Bandscheibenvorfall betroffenen Seite mit einer relativen Vermehrung der Fläche des Fettgewebes.

Berechnung der Quotienten aus den Flächen:

Der Quotient Muskel/ Fett beträgt auf der betroffene Seite 2,8 (Grad 2= mittlere Atrophie), auf der unbetroffenen Seite 4,2 (Grad 1= leichte Atrophie). In der vereinfachten Version (verkleinerter Kreis – Muskel / Fett) betroffene Seite beträgt der Quotient 1,0 (Grad 2 = mittlere Atrophie), auf der unbetroffenen Seite beträgt der Quotient 1,9 (Grad 2= mittlere Atrophie)

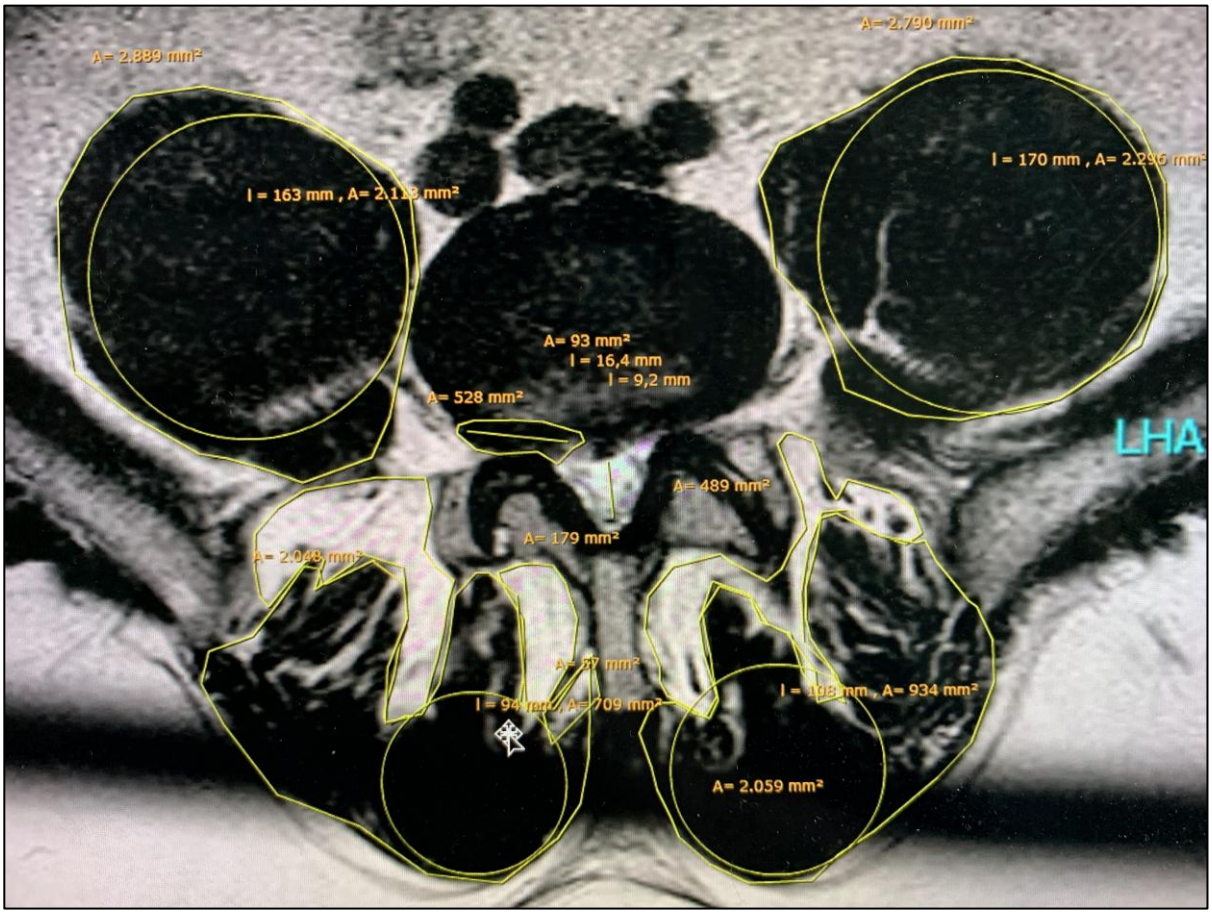


Abb. 22: MRT Horizontalschnitt im Segment L 4/5 für die Kasuistik 195
Das MRT-Bild zeigt einen horizontalen Schnitt auf Höhe des Segments L4/5. Verschiedene anatomische Strukturen sind mit Messwerten zu Fläche und Durchmesser markiert, um die morphologische Beurteilung im Rahmen der Kasuistik 195 zu ermöglichen.

Kasuistik 2 (vgl. Abb. 23): Casus156. Alter: 80 J Beruf: Rentner, BMI: 30,0 Raucher: Ja, 10 Zig/die, Schmerzen seit über 3 Jahren D: subligamentärer Bandscheibenvorfall L5/S1 rechts. ND: Benigne essentielle Hypertonie I10.00 Atherosklerose der Extremitätenarterien: Becken-Bein-Typ Lasègue: negativ, Neurologie: Lumboischialgie rechts bis in die Zehen gemäß Dermatom S1 mit Taubheitsgefühl., Grobe Kraft untere Extremitäten KG 5/5. Radiologisch: Chondrosegrad III in den Etagen L 3/4/5 und Chondrosegrad 1 L 5/ S1 Fläche der autochthonen Rückenmuskulatur auf der betroffenen Seite A - 995, A1-605, Fläche der autochthonen Rückenmuskulatur auf der unbetroffenen

Seite B-1194, B1-298, ventral, links - C-1001, ventral rechts D-1139 (jeweils in mm `2) vereinfachtes Verfahren: A- 311, B-613, C-613, D-802

Interpretation: Es zeigt sich eine deutliche Atrophie der segmentalen autochthonen Muskulatur auf der vom Bandscheibenvorfall betroffenen Seite L5/ S1 rechts mit einer relativen Vermehrung der Fläche des Fettgewebes bei einer langen Schmerzanamnese von 3 Jahren. Zusätzlich altersbedingte Atrophie der Muskulatur. Berechnung der Quotienten aus den Flächen: Der Quotient Muskel/ Fett beträgt auf der betroffene Seite 1,6 (Grad 3= schwere Atrophie), auf der unbetroffenen Seite 4,0 (Grad 1= leichte Atrophie). In der vereinfachten Version (verkleinerte Kreise – Muskel / Fett) betroffene Seite beträgt der Quotient 0,5 (Grad 3= schwere Atrophie), auf der unbetroffenen Seite 1,01 (Grad 2 = mittlere Atrophie)

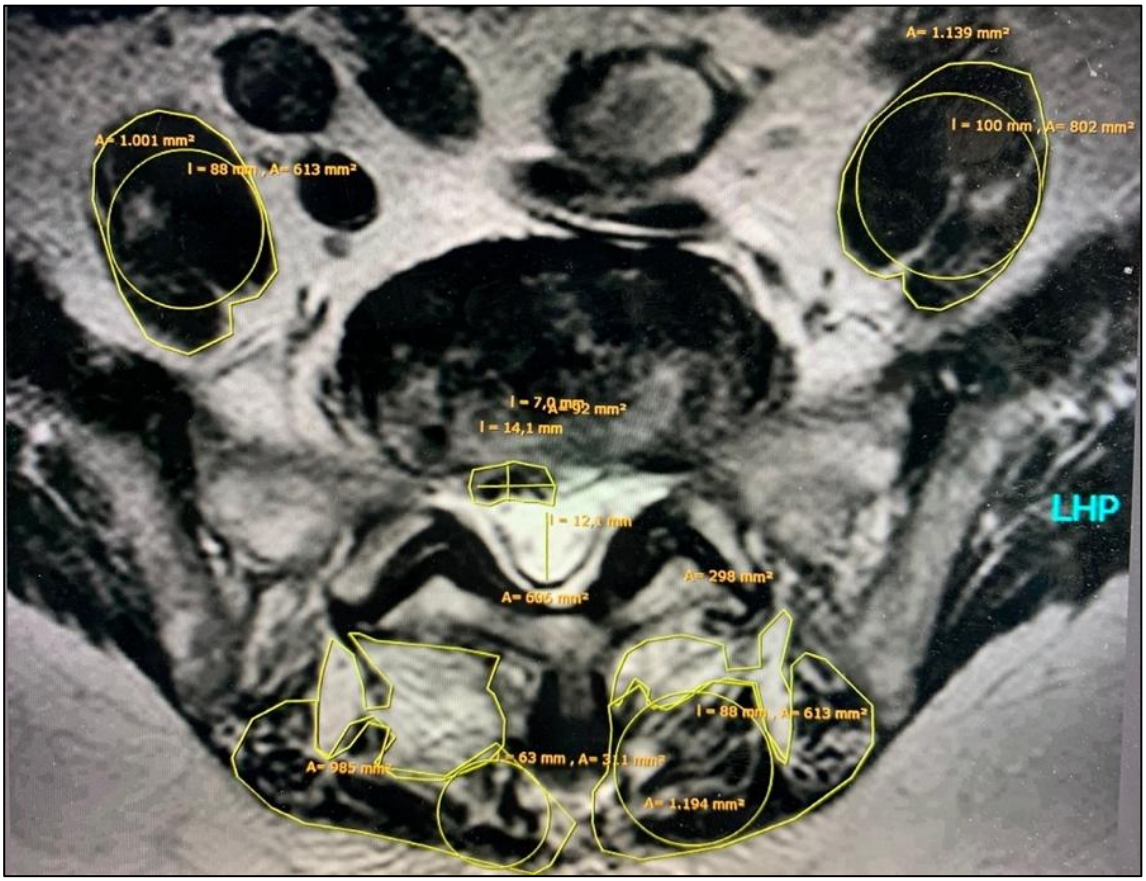


Abb. 23: MRT Horizontalschnitt im Segment L 5/ S1 für die Kasuistik 156

Das MRT-Bild zeigt einen horizontalen Schnitt auf Höhe des Segments L5/S1. Verschiedene anatomische Strukturen sind mit Messwerten zu Fläche und Durchmesser markiert, um die morphologische Beurteilung im Rahmen der Kasuistik 156 zu ermöglichen.

3.6 Beantwortung der informationssystembezogenen Forschungsfrage

3.6.1 Vorschlag für ein digitales Informationssystem

Frage 6: *Wie lässt sich ein digitales Informationssystem zur Befundung muskulärer Atrophie der lumbalen Wirbelsäule konzipieren?*

In der vorliegenden Arbeit wurden bisher zunächst radiologische Merkmale und klinische Variablen untersucht; auf dieser Basis wurde eine vereinfachte Messmethode konzipiert, die den Aufwand reduziert und die Anschlussfähigkeit im klinischen Alltag erhöht. Aus der Kombination von Bedarfslage (hohe Prävalenz, begrenzte Zeitbudgets, Variabilität manueller Messungen) und methodischem Ansatz (vereinfachte, kreisförmige ROI-Platzierung mit Kennwertbildung) ergibt sich folgerichtig die Frage, wie ein digitales Informationssystem gestaltet werden kann, das diese Messlogik verlässlich, reproduzierbar und datenschutzkonform unterstützt. Parallel dazu wird in der Versorgungspraxis eine zunehmende Verlagerung hin zu digitalen, mobil nutzbaren Anwendungen beobachtet, die diagnostische Prozesse strukturieren, Interaktionsschritte anleiten und Ergebnisse standardisiert dokumentieren. Diese Entwicklungen begünstigen eine systematische Überführung der hier vorgeschlagenen Messmethode in eine softwaregestützte Lösung, die den Befundprozess vereinheitlicht, Transparenz über Annahmen schafft und Ergebnisberichte in eine klinisch nutzbare Form bringt.

Um eine solche Anwendung tragfähig zu entwerfen, genügt es nicht, ein Bedienkonzept zu skizzieren. Erforderlich ist vielmehr eine wohlbegründete Ableitung von Zielen, Anforderungen, Interaktionsprinzipien und Qualitätsmerkmalen – einschließlich Sicherheits- und Datenschutzaspekten – sowie eine explizite Positionierung im Entwicklungsprozess von eHealth-Technologien. Die CeHRes-Roadmap (Centre for eHealth Research) bietet hierfür einen etablierten Rahmen: Sie strukturiert den Weg von der Kontextanalyse über die Wert- und Zielableitung bis hin zu Design, Operationalisierung und Evaluation und adressiert dabei explizit die Notwendigkeit partizipativer, nutzerzentrierter Entwicklungsschritte (van Gemert-Pijnen et al. 2011).

Damit eignet sie sich als methodisches Rückgrat, um die Myo-Check-Konzeption textbasiert und ohne Feldstudie wissenschaftlich zu fundieren.

3.6.2 CeHRes-Roadmap und Literaturüberblick

Die CeHRes-Roadmap wurde als holistisches Rahmenwerk zur Entwicklung, Implementierung und Evaluation von eHealth-Technologien konzipiert. Kernanliegen ist die frühzeitige und kontinuierliche Einbindung von Stakeholdern, die Ableitung expliziter Werte und Ziele („value specification“) sowie die formative, zyklische Evaluation entlang des gesamten Entwicklungsverlaufs. Dieser Ansatz reagiert auf wiederkehrende Gründe für das Scheitern digitaler Gesundheitsanwendungen und operationalisiert nutzerzentrierte Gestaltung als durchgängiges Prinzip. Die ursprüngliche Roadmap wurde 2011 vorgestellt und hat sich seitdem in Forschung und Praxis etabliert (van Gemert-Pijnen et al. 2011).

Eine aktualisierte Fassung („CeHRes Roadmap 2.0“) präzisiert die zugrunde liegenden Pfeiler und Ziele der einzelnen Phasen und integriert neuere Entwicklungen in eHealth-Forschung und -Praxis. Inhaltlich bleiben die fünf Phasen – Contextual Inquiry, Value Specification, Design, Operationalization und Summative Evaluation – erhalten; die Aktualisierung schärft jedoch Zielsetzungen, Artefaktbezug und Evaluationslogik und betont die Notwendigkeit iterativer, formativer Bewertungszyklen. Für die vorliegende Arbeit ist dies insofern relevant, als die App-Konzeption strukturiert, evidenznah und zugleich ohne unmittelbare Nutzerstudie textuell ausgearbeitet werden kann (Kip et al. 2025).

Die CeHRes-Roadmap lässt sich konsistent mit einschlägigen Normen und Qualitätsmodellen verzahnen. Für Interaktion und Usability bieten die Prinzipien der ISO 9241-210 (Human-Centered Design) eine referenzfähige Grundlage, um Nutzerbedarfe, Aufgaben, Nutzungskontexte und iteratives Prototyping systematisch zu berücksichtigen. Für Software-Qualität lassen sich die Charakteristika des ISO/IEC 25010-Modells heranziehen (u. a. funktionale Eignung, Zuverlässigkeit, Effizienz, Gebrauchstauglichkeit, Sicherheit, Kompatibilität, Wartbarkeit, Portabilität). Beide Normen ermöglichen eine

transparente Ableitung nicht-funktionaler Anforderungen, die im CeHRes-Schritt „Value Specification“ priorisiert und im „Design“ konkretisiert werden können.

Die praktische Anwendbarkeit der Roadmap ist in verschiedenen eHealth-Kontexten dokumentiert. So wurde etwa ein webbasiertes Assessment sozialer Netzwerke für Betreuungspersonen in der Neuro-Onkologie entlang der fünf CeHRes-Phasen entwickelt; die Roadmap strukturierte Stakeholderarbeit, Interaktionen und formative Evaluation (Reblin et al. 2017). In einem weiteren Beispiel wurde ein integrierter, CeHRes-geleiteter Entwicklungsprozess („Diabetes Box“) zur patientennahen Schulung und Versorgung bei Diabetes umgesetzt; die ersten drei Phasen der Roadmap wurden genutzt, um Prototypen, Inhalte und Prozesse zu spezifizieren (de Frel et al. 2024). Darüber hinaus wurde der CeHRes-Bezug im Kontext immersiver Angebote – etwa einer VR-Anwendung in der forensischen Psychiatrie – als methodischer Rahmen für kontextgeleitete, nutzerzentrierte Gestaltung und systematisches Reporting hergestellt (Kip et al. 2019).

Für die vorliegende Dissertation ist insbesondere die Möglichkeit einer ex-ante-Prüfung relevant: Auch ohne Feld- oder Laborevaluation lassen sich Ziel-Frage-Metrik-Bezüge definieren, heuristische Usability-Reviews entlang ISO-Prinzipien durchführen und Qualitätsabdeckung gegen ISO/IEC 25010 argumentativ spiegeln. Diese Vorgehensweise ist mit der CeHRes-Roadmap kompatibel, da formative Evaluationen in frühen Phasen auch analytisch und expertenbasiert angelegt werden können (Kip et al. 2022).

3.6.3 Prototyp einer mobilen Applikation

Die Myo-Check-App wird in dieser Arbeit als digitales Informationssystem konzipiert, das die vereinfachte Befundung der paraspinalen Muskulatur an der Lendenwirbelsäule unterstützt. Im Zielzustand würde die Anwendung Magnetresonanztomographie (MRT)-Querschnittsbilder entweder aus einem Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)-basierten Kliniksystem importieren oder als fotografierte Bildschirmansicht

verarbeiten, anschließend mittels einer KI-gestützten Auswertungssoftware exakte Konturen der drei autochthonen Muskelgruppen (M. multifidus, M. longissimus, M. iliocostalis) jeweils beidseits vorschlagen, die durch die Anwenderin oder den Anwender bestätigt und bei Bedarf feinjustiert würden. Auf dieser Basis würden Muskel- und Fettareale berechnet, ein Seitenvergleich erstellt, ein Muskel/Fett-Quotient abgeleitet und die Befundlage in eine vierstufige, in der Studie hergeleitete LMA-Klassifikation eingeordnet. Die Ergebnisse würden in einem strukturierten Kurzbericht zusammengeführt und auf Wunsch exportiert; eine On-Device-Verarbeitung mit datenschutzkonformer Speicherung und klaren Löschkonzepten würde angestrebt. Die Interaktionslogik, die Ergebnisdarstellung und die Reduktion manueller Schritte sind in Abbildung 24 prototypisch illustriert; die App würde damit keine ärztliche Diagnose ersetzen, sondern eine standardisierte, reproduzierbare Messunterstützung bereitstellen (vgl. Abb. 24). Tab. 17 fasst die fünf Phasen der CeHRes-Roadmap (Contextual Inquiry, Value Specification, Design, Operationalization, Summative Evaluation) als Leitfaden zusammen, benennt Kernfragen, erwartete Deliverables, die Anwendung auf Myo-Check sowie beispielhafte Metriken. Diese Übersicht soll eine „auf einen Blick“-Orientierung geben; im Anschluss werden die Phasen im Fließtext ausgearbeitet.

Abb. 24: Prototyp-Layout der „Myo Check App Lumbale Wirbelsäule“

Die Abbildung zeigt ein Beispiel für das Layout eines Prototyps der „Myo Check App“ zur Analyse der lumbalen Wirbelsäule. Dargestellt ist die englische Version der Benutzeroberfläche. Die grafische Gestaltung wurde mit PowerPoint (Microsoft Office 2023) und CANVA (2023) erstellt.

Zusammenhangsfragestellung (Contextual Inquiry)

Die App würde in klinischen Szenarien eingesetzt, in denen die paraspinale Muskulatur nachvollziehbar quantifiziert werden soll. Primär in der radiologischen Befundung, ergänzend in orthopädisch-neurochirurgischen Indikationssituationen und in physiotherapeutischen Verlaufsbeurteilungen. Stakeholder wären Radiologinnen und Radiologen (Messdurchführung), behandelnde Ärztinnen und Ärzte (Entscheidungsunterstützung), Therapeutinnen und Therapeuten (Trainingssteuerung) sowie IT- und Datenschutzverantwortliche (Betrieb, Compliance). Typische Pain-Points bestünden in Zeitdruck, Inter-/Intra-Rater-Varianz bei der ROI-Platzierung, heterogenen Dokumentationswegen und uneinheitlichen Berichtsformaten. Der in Abbildung 24 illustrierte Interaktionsentwurf würde diese Punkte adressieren, indem eine geführte ROI-Platzierung, eine kompakte Ergebnisansicht (Seitenvergleich, Quotient, LMA) und ein standardisierter Export bereitgestellt würden (vgl. Abb. 24).

Tab. 17: Übersicht des App-Prototyps nach CeHRes-Roadmap

Die Tabelle stellt den entwickelten Prototyp nach der CeHRes Roadmap dar. Die entsprechenden Phasen, Designanforderungen und Metriken werden im laufenden Kapitel ausformuliert.

Phase	Zweck/Zielfrage	Anwendung auf Myo-Check	Beispiel-Metriken
Zusammen-hangsfrage-stellung Contextual Inquiry	In welchem Setting, mit welchen Stakeholdern und Pain-Points würde die App genutzt?	Radiologie-Befund, Sprechstunde, Therapiekontrolle; Rollen und Verantwortlichkeiten	Fälle/Tag, Dokumentationszeit, Medienbrüche
Wertbeitrag Value Specification	Welchen Nutzen würde die App stiften, und welche Anforderungen folgen daraus?	ROI-Vorschlag, Seitenvergleich, Quotient, LMA; Usability, Datenschutz, Performance	Messzeit/Segment, Abdeckungsgrad Bericht, Eingabefehlerquote
Design	Wie würden Interaktion, Prinzipien und Datenflüsse aussehen?	Guided-ROI, erklärbare Schwellen, On-Device-First, Exportpfade	ICC/Wiederholgenauigkeit, Abbruchrate, Exportzeit
Operationali-zation	Wie würde der Betrieb sicher, datenschutzkonform und wartbar organisiert?	Geräteverwaltung (MDM), Löschkonzepte, Support/Onboarding	Uptime, Zeit bis Export/Löschung, Support-Tickets
Zielerreich-ung Summative Evaluation	Wie würde ex-ante geprüft und was wäre für empirische Studien vorgesehen?	Zielgrößen, Reliabilitätsziele, methodischer Vergleichsplan	Ziel-ICC/LoA, SUS-Score (geplant), Protokollkonformität

Wertbeitrag (Value Specification)

Der primäre Wertbeitrag bestünde in einer reproduzierbaren, zeiteffizienten Messung, die den manuellen Aufwand senkt und die Befundkommunikation vereinheitlicht. Daraus würden funktionale Anforderungen folgen: automatischer Kontur-Vorschlag aller drei autochthonen Muskelgruppen (M. multifidus, M. longissimus, M. iliocostalis) mit Bestätigung/Korrektur, automatische Flächen- und Quotientenberechnung, Seitenvergleich sowie Klassifikation nach LMA in vier Stufen mit kurzer textlicher Einordnung. Nicht-funktionale Anforderungen umfassten eine klare, fehlerrobuste Interaktion (geringe Klickzahl, verständliche Rückmeldungen), Datenschutz und IT-Sicherheit (Datenminimierung, On-Device-Verarbeitung, Verschlüsselung), Zuverlässigkeit und Performance (flüssige Interaktion, kurze Berechnungszeiten), Kompatibilität (iOS/Android) sowie Wartbarkeit. Der Nutzen ließe sich u. a. an Messzeit pro Segment, Abdeckungsgrad des strukturierten Befunds und Eingabefehlerquote messen; in späteren Studien würden die Wiederholgenauigkeit (Intraklassen-Korrelationskoeffizient, ICC) und die Anwenderakzeptanz ergänzt.

Design

Das Interaktionskonzept würde auf „guided contour“ basieren: Nach Bildaufnahme oder Import würde ein KI-basierter Vorschlagsalgorithmus exakte Konturen der drei autochthonen Muskelgruppen (M. multifidus, M. longissimus, M. iliocostalis) jeweils beidseits platzieren; die Nutzerin oder der Nutzer könnte die Konturen per Drag/Pinch feinjustieren, fehlerhafte Vorschläge verwerfen und jederzeit zum vorherigen Schritt zurückkehren. Aus den Schnittflächen ließen sich, unter Berücksichtigung der typischen MRT-Schichtdicke von 4 mm, zusätzlich Muskelvolumina ableiten. Erklärbare Schwellen (transparente Darstellung der LMA-Cut-offs) würden die Interpretierbarkeit erhöhen. Das Ergebnis-Panel (vgl. Abb. 24) würde Seitenvergleich, Flächenwerte, Quotient und LMA-Stufe kompakt anzeigen und einen strukturierten Kurzbericht generieren. Algorithmisch wäre eine modulare Kette vorgesehen (Qualitätsprüfung der Aufnahme, ROI-Vorschlag, Flächen-/Quotientenberechnung, Klassifikation), mit robustem Fallback auf manuelle Platzierung. Architektonisch würde ein On-Device-First-Ansatz bevorzugt; Interoperabilität könnte konzeptionell über DICOM-Importpfade und optional FHIR-

Exportschnittstellen vorgesehen werden, um Integration in Klinik-Workflows zu erleichtern. Fehlermeldungen und Undo-Optionen würden sicherheitsorientierte Standardwerte („safe defaults“) unterstützen.

Berechtigungskonzepte (Operationalization)

Für den Betrieb würde ein Rollen- und Berechtigungskonzept festgelegt, das Mess-, Lese- und Exportrechte unterscheidet. Auditierbares, datenschutzkonformes Logging (ohne Inhaltsdaten, mit technischen Ereignissen) würde Transparenz schaffen. Updates und Support würden planbar versioniert, ein kurzes In-App-Onboarding sowie Hilfeseiten würden die Einführung erleichtern. Datenschutz wäre „by design“ umgesetzt: Datenminimierung, temporäre lokale Speicherung, verschlüsselte Übertragung, klare Löschfristen und eine eindeutige Zweckbindung der Verarbeitung. In Klinikumgebungen würden Mobile-Device-Management (MDM), Offline-Strategien für den Betrieb ohne Netzwerk und Kompatibilitätsanforderungen berücksichtigt. Prozesskennzahlen wie Systemverfügbarkeit, Zeit bis zum Berichtsexport und Zeit bis zur endgültigen Löschung temporärer Daten würden das Betriebs- und Compliance-Monitoring unterstützen.

Zielerreichung (Summative Evaluation)

Ex-ante würde die Zielerreichung argumentativ geprüft. Eine Goal-Question-Metric-Matrix würde je Ziel (z. B. Zeiteffizienz, Reproduzierbarkeit, Vollständigkeit der Berichte) geeignete Fragen und Messgrößen definieren (z. B. Median-Messzeit pro Segment, Intra- und Interrater-Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC), Anteil vollständig strukturierter Berichte). Für spätere empirische Arbeiten würden Reliabilitätsziele (Intraklassen-Korrelationskoeffizient, ICC; Bland–Altman-Grenzen der Übereinstimmung, Limits of Agreement, LoA), methodische Vergleichsstudien zwischen vereinfachter und Standard-ROI-Messung sowie Nutzerstudien mit standardisierten Usability-Skalen, etwa der System Usability Scale (SUS), sowie Protokolle für Ethik- und Datenschutzfreigaben vorgesehen. Auf diese Weise bliebe der Entwurf wissenschaftlich nachvollziehbar und prüfbar, obwohl in dieser Phase noch kein Feld- oder Labortest vorläge.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Myo-Check-App entlang der CeHRes-Roadmap schlüssig konzipiert werden könnte. Der Nutzungskontext würde systematisch erhoben, Werte und Anforderungen priorisiert, ein geführtes Interaktionsdesign mit erklärbaren Schwellen (vgl. Abb. 24) abgeleitet und ein betriebsfähiges, datenschutzkonformes Betriebsmodell operationalisiert. Die Effizienz und Effektivität ließen sich ex-ante über GQM-Metriken (z. B. Messzeit, Vollständigkeit, Fehlerquote) und ex-post über Reliabilitäts- und Usability-Kennzahlen (ICC, LoA, SUS) bewerten. Damit läge ein prüfbarer, kliniknaher Artefaktentwurf vor.

4 Diskussion

4.1 Diskussion epidemiologischer Parameter

Muskuloskeletale Schmerzen sind weltweit die führende Ursache von chronischen Schmerzen und bedeuten einen erheblichen Verlust von Lebensqualität (Fuchs, et al. 2013). Insbesondere Rückenschmerzen sind in den Industrienationen die häufigste Erkrankung des Bewegungsapparates und der zweithäufigste Grund für einen Arztbesuch in Deutschland (RKI 2012). Diese Erkrankungshäufigkeit führt zu Belastungen im mehrstelligen Milliardenbereich für das Gesundheitssystem (Ossendorf 2020). Die demographische Entwicklung mit einer Verschiebung der Alterspyramide nach oben in Deutschland lässt erwarten, dass die Anzahl der Patient*innen mit chronischen Rückenschmerzen noch weiter ansteigen wird. Daher sind präventive Forschungsansätze zur genauen Klärung der Ursache, Risikofaktoren und Verbreitung von Rückenschmerzen ökonomisch und medizinisch sinnvoll. Nach Almasri (2015) gelten sowohl Alter als auch Übergewicht und Nikotin zu den Risikofaktoren für die Entwicklung von degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen.

Nach dem Tabakatlas der BRD aus dem Jahre 2015 liegen in bestimmten Berufsgruppen hohe Raucheranteile vor. Bei Männern sind dies Möbelpacker mit 83,3 % sowie Personenschutzfachkräfte und Mitarbeiter aus Reinigungsberufen. Bei Frauen sind dies auch Werk- und Personenschutzfachkräfte sowie Berufskraftfahrerinnen (DKFZ Tabakatlas Deutschland). Auch gibt es deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern, insbesondere im Norden rauchen die Einwohner häufiger als der

Durchschnitt. An der Spitze liegt Mecklenburg-Vorpommern mit 27,7 % und das Bundesland Bremen mit 27,4 (DKFZ, Tabakatlas BRD). Die geringste Raucherdichte liegt im Bundesland Bayern vor mit 20,5 %. Im europäischen Vergleich liegt Deutschland im Jahre 2019 in der Tabakkontrollskala auf dem letzten Platz und hat damit den größten Handlungsbedarf in der Tabakkontrolle. Die Nähe unserer Klinik zum Bundesland Bremen erklärt allerdings nicht den hohen Anteil von Rauchern in der Studiengruppe von 49 %

Raucher haben ein um 20 bis 80 Prozent erhöhtes Risiko von Rückenschmerzen im Vergleich zu Nichtrauchern. Das geht aus mehreren internationalen Studien hervor. Die Unterschiede beruhen darauf, ob es sich um Frauen oder Männer und um jüngere oder ältere Raucher handelt (Spiegel, 2000).

In der vorliegenden Studiengruppe liegt die Raucherquote mit 49 Prozent weit über dem Bundesdurchschnitt von 23 Prozent (Stand 2018). Jedoch ist ein direkter Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungseinheiten nicht möglich.

Frage 1: Beim Vergleich verschiedener Berufsgruppen wurde beobachtet, dass die Fläche des Bandscheibenvorfalls (NPP), gemessen in mm², entgegen der Erwartung mit steigender körperlicher Tätigkeit abnimmt. Dieser Zusammenhang zeigt sich deskriptiv, ist in den t-Tests jedoch nicht signifikant. Es wurden somit deskriptiv geringere Vorfallsflächen bei erhöhter körperlicher Betätigung im Beruf festgestellt; bei überwiegend sitzender Tätigkeit wurden deskriptiv höhere Mittelwerte der Vorfallsfläche ausgewiesen. Nach Auswertung der t-Tests sind die Differenzen zwischen den Gruppen statistisch nicht signifikant.

Die Einbettung in die Literatur stützt die deskriptiv beobachtete Richtung: In sitzender Position wird die Lendenlordose typischerweise vermindert. Alamin et al. (2018) berichteten für 20 Proband*innen L5/S1-Lordosewinkel mit einem höchsten Mittelwert im Stehen (48,8°) und niedrigeren Mittelwerten in Sitzhaltungen (Kniestuhl: 34,0°; harter Stuhl: 28,6°; normaler Stuhl: 16,6°). Eine Abweichung von der natürlichen Lendenlordose beim Sitzen in Kombination mit statischer oder dynamischer axialer Belastung wurde zudem in experimentellen Studien als Risikofaktor für die Entwicklung eines

Bandscheibenvorfalls beschrieben (Zielinska et al., 2021; Paul et al., 2013). Diese Befundlage spricht für die biomechanische Plausibilität der beobachteten deskriptiven Unterschiede, ohne dass mit den vorliegenden Daten ein inferenzstatistischer Nachweis eines Gruppenunterschieds geführt werden kann.

4.2 Diskussion der Resultate aus den Fragen 2-5

Frage 2 a: Zwischen der Fläche des Vorfalls (NPP) und dem restverfügbaren freien Raum im Recessus spinalis (FREIRAUM) ließ sich nur ein geringer Zusammenhang erkennen. Klinisch würde es naheliegen, einen positiven Zusammenhang zwischen einer zunehmenden NPP-Fläche und dem abnehmenden Freiraum im spinalen Recessus zu erwarten. Den Berechnungen zufolge verringert sich jedoch für jeden zusätzlichen mm^2 NPP die restverfügbare Fläche nur um 0,0335 mm^2; entsprechend sinkt der FREIRAUM um 3,35 mm^2, wenn der NPP um 1 cm^2 (100 mm^2) zunimmt. Dieser Zusammenhang war in der OLS-Regression nicht statistisch signifikant ($p = 0,30$; $R^2 = 0,01$).

Die Querschnittsflächen des Recessus spinalis und der Foramina (in mm^2) ist anatomisch variabel. Hierdurch kann erklärt werden, dass teilweise große NPPs bei manchen Patient*innen nur geringe klinische Symptome zeigen und umgekehrt. Nach Benson et al. (2010), die den natürlichen Verlauf von Bandscheibenvorfällen bei 37 Patientinnen und Patienten über zwei Jahre klinisch und mittels MRT untersuchten, wurde eine volumetrische Schrumpfung des Vorfalls um 64 % berichtet; auch größere Vorfälle reduzierten sich bei konservativem Vorgehen signifikant.

Frage 2 b: Es ließ sich erkennen, dass im Mittel Fälle mit positivem Lasègue-Zeichen größere Flächen der Vorfälle (NPP) aufweisen als Fälle mit negativem Lasègue-Zeichen. Die Differenz liegt im Mittel bei 5,01 mm^2; dieser Unterschied ist in den t-Tests nicht signifikant ($p = 0,48$). Der diagnostische Wert eines positiven Lasègue-Zeichens als Wurzeldehnungszeichen bei Ischialgien wird von mehreren Einflussfaktoren bestimmt. Unter anderem werden die Ausprägung des Zeichens von der Länge der Nerven, deren Elastizität sowie der anatomischen Beschaffenheit des neuronalen Lagers beeinflusst.

Zudem wurde berichtet, dass sich Bandscheibenvorfälle im Verlauf spontan verkleinern können. Bush et al. (1992) untersuchten den natürlichen Verlauf bei 165 Patientinnen und Patienten mit Ischialgien, die seriell epidural infiltriert wurden, und fanden im CT bei 64 von 84 Fällen eine partielle oder vollständige Reduktion des prolabierten Gewebes mit klinischer Besserung nach einem Jahr. Cribb et al. (2007) beobachteten in kontinuierlichen klinischen und MRT-Kontrollen bei 15 konservativ behandelten Patientinnen und Patienten mit massiven Vorfällen einen deutlichen Rückgang der lumbalen Hernien bei 14 Fällen mit einer durchschnittlichen Größenabnahme von 80 % (Bereich 68–100 %) nach zwei Jahren.

Frage 3: Zwischen der Anzahl der Schmerzmonate und der Atrophie des Rückenstreckmuskels ließ sich kein Zusammenhang erkennen. Hingegen wurde zwischen der Anzahl der Schmerzmonate und der Fläche der fettigen Atrophie (in mm²) ein positiver Zusammenhang geschätzt. Dem Modell zufolge nimmt die fettige Atrophie mit jedem zusätzlichen Schmerzmonat um 6,64 mm² zu; bei null Schmerzmonaten beträgt sie 253,38 mm².

Nach Woodham et al. (2014) wurden Atrophien im Bereich des M. multifidus und des M. erector spinae kombiniert mit einer Zunahme des lokalen Fettgewebes bei einer kleinen Studiengruppe von drei Patientinnen/Patient*innen im MRT im Verlauf von mehr als einem Jahr nachgewiesen. Eine Verbesserung des Muskelstatus ging mit einer klinischen Verbesserung einher. Diese Erkenntnisse stimmen mit Untersuchungen von Danneels et al. (2002) überein, die den klinischen Effekt von drei verschiedenen Trainingsmethoden auf den Querschnitt des M. multifidus untersuchten. Die Programme umfassten zehn Wochen Stabilisierungstraining ohne, mit dynamischem sowie mit dynamisch-statischem Widerstand. Die Behandlung mit einem intensiven dynamisch-statischen Stärkungsprogramm der Rückenmuskulatur verbesserte die Umfänge des M. multifidus ausgeprägter als in den Vergleichsgruppen.

Frage 4: In Tab. 14 wurden kleine mittlere Seitenunterschiede der Muskulatur dokumentiert (dorsal: betroffene Seite −1,625 mm²; ventral: betroffene Seite +1,980 mm²), die in den inferenzstatistischen Tests nicht signifikant waren. Auf Basis dieser Analysen

lässt sich kein Zusammenhang zwischen der vom Bandscheibenvorfall betroffenen Seite und den gemessenen Muskelumfängen der dorsalen bzw. ventralen lumbalen Muskulatur ableiten.

Anatomisch unterscheiden sich ventrale und dorsale Muskelgruppen hinsichtlich Funktion und Innervation (u. a. M. psoas major ventral; M. multifidus und M. longissimus dorsal), sodass differenzielle Muster grundsätzlich plausibel erscheinen. In den vorliegenden Daten wurde jedoch kein statistisch belastbarer Seitenunterschied nachgewiesen. Diese Befundlage steht im Einklang mit Übersichtsarbeiten, die vor allem für den M. multifidus pathologische Veränderungen (Zunahme der Fettinfiltration, abnehmender Umfang) im Kontext degenerativer lumbaler Pathologien beschreiben, ohne eine entsprechende Evidenz für andere untersuchte Muskeln wie den M. psoas bzw. den M. quadratus lumborum zu zeigen (Ranger et al., 2017; Park et al., 2018).

Darüber hinaus ist die Vergleichbarkeit mit Arbeiten zu spinaler Stenose begrenzt. So berichteten Hou et al. (2023) segment- und geschlechtsabhängige Unterschiede (Messhöhe L3/4) sowie geringere psoas-Umfänge bei schweren Stenosen. Chua et al. (2022) fanden kleinere Querschnitte des M. multifidus und der unteren Psoasmuskulatur bei Frauen mit schlechteren klinischen Funktionen. Die vorliegende Stichprobe betrifft überwiegend Bandscheibenvorfälle der kaudaleren Etagen (L4/5, L5/S1), wodurch sich Unterschiede in Patientenkollektiv, Segmenthöhe und Krankheitsbild ergeben.

Schließlich untersuchten Haffer et al. (2023) in einem heterogenen Kollektiv (u. a. Stenosen, Vorfälle, Spondylolisthesen) die Querschnitte und Fettinfiltration vor und ein Jahr nach lumbaler Fusion (Messhöhe L3). Die dort beschriebenen Zusammenhänge zwischen Sarkopenie bzw. Fettinfiltration und klinischen Parametern unterstreichen die klinische Relevanz der paraspinalen Muskelzusammensetzung, sind jedoch aufgrund des anderen Settings und der Segmenthöhe nicht direkt auf die hier untersuchte Fragestellung übertragbar.

Zusammenfassend wurde kein Zusammenhang zwischen betroffener Seite und Muskelumfang der dorsalen bzw. ventralen lumbalen Muskulatur nachgewiesen. Die Literatur stützt die Einordnung, dass vor allem der M. multifidus bei lumbalen Pathologien

betroffen sein kann, während für den M. psoas konsistente Seitenunterschiede nicht belegt sind (Ranger et al., 2017; Park et al., 2018). Unterschiede hinsichtlich Patientenkollektiv, Segmenthöhe und Diagnose (z. B. Stenose vs. Vorfall) begrenzen die unmittelbare Vergleichbarkeit (Hou et al., 2023; Chua et al., 2022; Haffer et al., 2023).

Frage 5: In Tab. 15 wurden durchgängig geringere Mittelwerte für die vereinfachte Messung im Vergleich zur standardmäßigen Messung ausgewiesen. Dieses Ergebnis ist methodisch bedingt, da der M. iliocostalis aufgrund seiner Variabilität bei der kreisförmigen Messung nicht berücksichtigt wurde. Im Mittel unterschätzt die vereinfachte Messung die Gesamtfläche der Muskulatur um 32–44 %. Die Übereinstimmung zwischen beiden Verfahren ist dadurch begrenzt, da beidseits (bds.) ein Muskelanteil systematisch ausgeschlossen wird.

Zur Klassifikation (keine, leichte, mittlere, schwere Atrophie) wurden daher verfahrensspezifische Grenzwerte definiert, sodass trotz des methodischen Niveauversatzes die gleiche vierstufige Klassifikationsstruktur abgebildet werden kann. Bei der Interpretation der absoluten Flächenwerte ist folglich zu berücksichtigen, dass Bewertungen immer relativ zu den jeweils verwendeten Grenzwerten vorzunehmen sind und eine direkte numerische Vergleichbarkeit der Flächen zwischen den Verfahren nur eingeschränkt gegeben ist.

Die vereinfachte Messung bietet den praktischen Vorteil, rasch einen Überblick über die muskuläre Situation zu ermöglichen und ist potenziell workflow-tauglich. Jedoch ist die Einordnung in den Grad 2 (mittlere Atrophie) und den Grad 3 (schwere Atrophie) im Grenzbereich unterschiedlich zu der exakten Konturmessung unter Einbeziehung des M. iliocostalis. Eine softwaregestützte Erfassung der anatomischen Landmarken, ggf. mit KI-Unterstützung, kann die intra- und interobserver-Variabilität verringern. Die endgültige Festlegung der Landmarken und Befundungsparameter obliegt jedoch dem befundenden Arzt bzw. der befundenden Ärztin. Weiterführende Aspekte zur App-Unterstützung werden in Kapitel 4.6 erläutert.

4.3 Diskussion der Röntgenauswertungen

In der Studiengruppe wiesen die beiden unteren (kaudalen) Segmente der LWS die ausgeprägtesten degenerativen Veränderungen auf. Es wurde eine durchschnittliche normierte Höhenminderung nach Hurxthal unter Anwendung des Korrekturfaktors nach Robertson von 71,1 % im Segment L4/5 und 65,0 % im Segment L5/S1 gemessen. Die unteren LWS-Segmente zeigen aufgrund der Nähe zum Os sacrum als benachbarter, weitgehend statischer Ebene die größten Flexions-/Extensionsbewegungen der Lendenwirbelsäule und sind zugleich den höchsten axialen Gewichtsbelastungen der gesamten Wirbelsäule ausgesetzt.

Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit der Darstellung bei Donnally et al. (2023) zur Pathophysiologie lumbaler degenerativer Veränderungen, den bildgebenden Befunden und den aktuellen Behandlungsstrategien einschließlich des interdisziplinären Ansatzes. Zudem wurde dort als geschlechtsspezifische Besonderheit eine frühere Degeneration bei Männern sowie die Bedeutung genetischer Faktoren beschrieben. Die vorliegenden Röntgenbefunde fügen sich in dieses Gesamtbild ein und stehen im Einklang mit der bekannten erhöhten mechanischen Beanspruchung der kaudalen Segmente L4/5 und L5/S1; ein über die Studienpopulation hinausgehender kausaler Schluss ist auf Basis der vorliegenden retrospektiven Daten nicht zulässig.

4.4 Diskussion der MRT Auswertungen

Muskelvermesssungen des Erektor spinae erfolgten schon in früheren Arbeiten (Zeitler 2018, Haffer et al. 2023). Jedoch erfolgte dort keine Differenzierung der einzelnen Muskeln und keine Abgrenzung zu den segmentalen Fettkörpern. Weiterhin erfolgte in den vorgenannten Studien keine direkte Zuordnung der Muskeln zur Etage der Hauptpathologie. In weiteren Studien wurde der M. psoas ebenfalls auf der gleichen Ebene von Hand vermessen und dient als relative Bezugsgröße (Hu et al. 2020, Battie et al. 2012, Yacizi et al. 2022, Wan et al. 2015, Zeitler 2018). Ein Großteil der Bevölkerung (22- 51 %) ohne klinische Beschwerdesymptomatik wiesen in einer MRT Studie schon degenerative Veränderungen der Lendenwirbelsäule insbesondere in Abhängigkeit vom Alter auf (Jensen 1994). Billy et al. (2014) untersuchten bei 12 Freiwilligen die lumbalen Bandscheibenhöhen und Durchmesser mittels MRT nach prolongiertem 4-stündigem

Sitzen und nach wechselnden Positionen und "stretching". Die Bandscheibenhöhe L 4/5 zeigte nach längerem Sitzen die größte Verminderung. Schon 15-minütige Unterbrechungen des Sitzens erbrachte eine Verbesserung der Bandscheibenhöhe. Diese Diskussion bezüglich der Problematik des langen Sitzens und deren Einfluss auf die Entwicklung einer Bandscheibenpathologie wurden auch in der vorliegenden Studie untersucht. Es fand sich eine Tendenz für die größten gemessenen Bandscheibenvorfälle bei den sitzenden Berufen und nicht bei Berufen mit schwerem Heben und Tragen. Letztendlich waren die statistischen Ergebnisse jedoch nicht signifikant. Die Tendenz ist deshalb deskriptiv zu bewerten und stellt keinen statistisch belegten Effekt dar.

Veränderungen im Bereich des M. multifidus und anderen muskulären Stabilisatoren der LWS wurden von Wan et al. (2015) mittels MRT bei 178 Patient*innen untersucht. Dabei wurden die mittleren Signale der paraspinalen Muskelquerschnitte der LWS - Muskulatur und die prozentuale Fettinfiltration verglichen. Dabei fanden Wan et al. (2015) eine Reduktion der Muskelquerschnitte und eine verstärkte Fettinfiltration in den MRT-Querschnitten bei akuten und chronischen Rückenschmerzpatienten jeweils auf der symptomatischen Seite. Es erfolgte eine Subtraktion der fettunterdrückten Sequenzen von den normalen MRT-Sequenzen. Hu et al. (2020) verglichen 35 mit Bandscheibenvorfall im Segment L 4/5 symptomatische Patient*innen mit gesunden Freiwilligen bzgl. der Degeneration des M. multifidus. Sie fanden eine signifikant höhere Fettinfiltration des M. multifidus bei den symptomatischen Patient*innen. Analoge Erkenntnisse hatten auch Lee et al. (2008) bei einer quantitativen Analyse bei 21 weiblichen Proband*innen davon 11 degenerativ veränderten und 10 gesunden Proband*innen mit T 2 gewichteten Sequenzen auf der Etage L 4/5.

Bislang wurden die Fettareale allerdings nicht eigenständig ausgemessen, sondern nur durch Subtraktion der Sequenzen voneinander ermittelt. Die lumbale Muskelatrophie muss von der infantilen spinalen Muskelatrophie (SMA- M. Werdnig-Hoffmann) als auch anderen eigenständigen Krankheitsbildern abgegrenzt werden. Eine direkte Übertragung dieser Literaturbefunde auf die eigene Stichprobe ist nur eingeschränkt möglich; statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen MRT-basierten Atrophiemaßen und

beruflicher Belastung bzw. NPP-Fläche ließen sich in der vorliegenden Untersuchung nicht nachweisen (vgl. Kap. 3.3, Frage 2 a und Frage 4).

4.5 Neues Klassifikationssystem der lumbalen muskulären Atrophie (LMA)

Bisher findet sich in der einschlägigen Literatur noch kein validiertes Klassifikationssystem für die lumbale muskuläre Atrophie (LMA). Insofern wurde in der vorliegenden Studie eine einfache "praxistaugliche" Klassifikation vorgeschlagen mit vier Graden anhand des Werts des Quotienten Muskel/Fett.

Diese wurde unterteilt nach der Standardmessung:
Keine Atrophie >= 5, leichte < 5, mittlere <4, schwere <3
In der vereinfachten Messung fanden sich:
Keine Atrophie >= 3, leichte < 3, mittlere <2, schwere <2

Die Werte orientierten sich an den Querschnittserhebungen der Studiengruppe in der Medianbetrachtung. Wie oben ausgeführt stellt eine Limitation der Anwendung das Vorhandensein von starkem Übergewicht oberhalb eines BMI von 30 dar, da in diesen Fällen eine ungewöhnlich starke Ausprägung der spinalen Muskeln und ein geringeres lokales Fettdepot vorhanden ist.

Die Abb. 21 zeigt, dass sich bei der Anwendung des vereinfachten Klassifikationssystems auf die Studiengruppen eine weitgehende Übereinstimmung bei der Einstufung in die Grade 1 (keine Atrophie) und 2 (leichte Atrophie) finden. Keine vollständige Übereinstimmung findet sich bei den Graden 3 (mittlere) und 4 (schwere Atrophie). Die kann bedingt sein durch die Verwendung gerader Zahlen zur Diskriminierung der einzelnen Grade, die aus Gründen der Praxistauglichkeit verwendet wurden. Eine Verwendung von Standardabweichungen hätte zu nicht-geraden Zahlen bei der Quotientenberechnung geführt und damit hätte die Praxistauglichkeit der vorgeschlagenen Einstufung in die einzelnen Atrophiegrade nicht mehr bestanden. Insofern ist eine unterschiedliche Einstufung bei den Graden 3 und 4 in den beiden unterschiedlichen Messmethoden vorhanden, welche Unterschiede in der Validität

anzeigt. Weiterhin macht sich bei den höheren Gradeinteilungen 3 und 4 der Ausschluss des M. iliocostalis aufgrund seiner Irregularität statisch deutlicher bemerkbar.

Die vereinfachte Messung kann in wenigen Minuten vorgenommen werden und spart das genaue Umfahren und Ausmessen der lumbalen Muskeln. Nur die Fettkörper müssen mit der Oberflächenmessung genau umfahren und berechnet werden. Dies geschieht im Unterschied zu den bislang durchgeführten Studien.

Aufgrund unterschiedlicher Validitäten in dem vereinfachten und exakten Meßverfahren wird für die Verwendung in einer App die Verwendung exakter Konturmessungen empfohlen, auch wenn dies deutlich aufwändiger in der KI- gestützten Erfassung der anatomischen Strukturen ist.

Nach Angaben von Lee et al. (2008) haben Rückenschmerzpatienten einen kleineren Durchmesser als gesunde Personen. Weiterhin nimmt mit zunehmendem Alter der Umfang der Rückenmuskeln ab. Im vorliegenden Fall wurde die unbetroffene Gegenseite als Vergleichsgruppe verwendet und vermessen. Nach einer Studie an 51 Patient*innen und einer Kontrollgruppe von 50 Proband*innen schlugen Yazici et al. (2022) eine semiquantitative Klassifikation mit 4 Graden für die Fettinfiltration der lumbalen Muskulatur bei lumbalen Bandscheibenleiden vor. Stevens et al. (2020) analysierten im Rahmen einer Meta-Analyse die aktuelle Literatur mit 3176 Artikeln und fanden 18 Artikel, welche die Ansprüche einer prospektiven vergleichenden Studie erfüllten, bezüglich der Morphologie des M. multifidus bei Bandscheibenvorfällen. Die Resultate waren sehr heterogen. Vergleichende Analysen zeigten eine Muskelatrophie des M. multifidus und eine vergrößerte Fettinfiltration in 10 von 18 Studien bei einem Vergleich von Seit- zu Seit Kontrollen. Es zeigte sich eine Abnahme der Typ II Muskelfasergrößen und eine Zunahme der Muskelfaser Typen I. Bezüglich der Muskelgrößen wurden aber keine signifikanten Unterschiede gefunden.

Die Arbeitsgruppe von Mattie (2012) fand bei 43 Patient*innen mit einer einseitigen Lumboischialgie mit einer Krankheitsdauer weniger als 6 Wochen keine signifikanten Muskelatrophien im Bereich des M. multifidus ipsilateral aber eine höhere Fettinfiltration

auf der vom Bandscheibenvorfall betroffenen Seite. Diese Befunde werden auch durch die vorliegende Studie bestätigt, welche eine Zunahme der Fettinfiltration auf der von einem Bandscheibenvorfall betroffenen Seite feststellen konnte.

Goubert et al. (2016) fanden im Rahmen einer Metaanalyse von 15 Studien eine Atrophie des M. multifidus nur bei Patient*innen mit chronischem Rückenschmerz aber nicht bei akuten bzw. intermittierenden Rückenschmerzen. Auch hier findet sich eine Übereinstimmung mit der vorliegenden Studie, dass sich die Atrophie der lumbalen Muskulatur erst nach einer längeren Dauer des Bandscheibenleidens einstellt. Dallaway et al. (2020) fanden in einer Metaanalyse von 34 Artikeln eine altersabhängige Degeneration mit Fettinfiltration der lumbalen paravertebralen Muskulatur. Männer zeigten dabei eine signifikant größere Muskelatrophie als Frauen.

In weiteren Studien mit 77 Patient*innen (subakut 24, chronisch 51 Patient*innen) konnten Danneels et al. (2002) zeigen, dass die Ermüdbarkeit des M. multifidus bei Rückenschmerzpatienten schneller stattfindet als bei gesunden Proband*innen ohne Rückenschmerzen. Zusätzlich war die Aktivität der Muskeln insgesamt geringer als bei gesunden Proband*innen, was sich in einer erniedrigten EMG-Aktivität während der Kraftübungen zeigte. Movahed et al. (2011) untersuchten die Muskelermüdung bei 11 Freiwilligen mit Infrarot Spektroskopie und Oberflächen EMG nach wiederholter statischer Kontraktion. Muskelermüdung führt verstärkt zu lumbalen Rückenschmerzen, da die überbeanspruchten Muskeln ihre statischen Leistungen nicht erbringen. Die Ursachen für ihre Ermüdbarkeit hängen mit ihrer Durchblutung bzw. der daraus folgenden mangelnden Oxygenierung zusammen. Eine Abnahme des Oxy-Hämoglobins nach statischen Kontraktionen und ein Anstieg des Deoxy-Hämoglobin während der Muskelarbeit spielen eine Rolle bei der Muskelermüdung (Movahed et al. 2011).

Durch die o.a. Erkenntnisse der Studie werden signifikante Zusammenhänge zwischen dem lumbalen Bandscheibenleiden und der Größe und Struktur der stabilisierenden Wirbelsäulenmuskulatur sichtbar. Hier liegt auch der Ansatz der Physiotherapie mit einer Restitution der betroffenen Segmente durch geeignete Übungen oder elektrischer Stimulation die Funktionsfähigkeit wiederherzustellen. Dabei ist es unerheblich wie man

Ursache und Wirkung definiert. War zuerst der Bandscheibenvorfall und kam es in dessen Folge zu einer Beeinträchtigung der segmentalen spinalen Versorgung und damit der Innervation der lumbalen Muskulatur oder lag zuerst die Fehlfunktion der Muskulatur vor und in dessen Folge prolabierte die Bandscheibe? Für den Bereich des M. multifidus kann eine muskuläre Dysfunktion verantwortlich sein für die Symptomerzeugung, die Wiederkehr und den Verbleib von lumbalen Rückenschmerzen (Danneels et al. 2002).

Vor diesem Hintergrund erscheint die vorgeschlagene vierstufige LMA-Klassifikation plausibel und alltagsnah, wobei die methodenbedingte Niveauverschiebung zwischen Standard- und vereinfachter Messung (u. a. durch den Ausschluss des M. iliocostalis) bei der Interpretation berücksichtigt werden muss und der exakten Messung der Vorzug gegeben werden sollte. Eine formale Validierung der Grenzwerte (z. B. gegen eine Referenzmessung und mit Reliabilitätskennzahlen) wäre ein naheliegender nächster Schritt, um die Übertragbarkeit zu prüfen.

4.6 Diskussion der App Entwicklung

In Ergänzung zu den empirischen Fragestellungen wurde ein digitales Informationssystem konzipiert, das die vereinfachte Befundung der paraspinalen Muskulatur der Lendenwirbelsäule unterstützen würde: Magnetresonanztomographie (MRT)-Querschnittsbilder könnten aus einem Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)-basierten Kliniksystem importiert oder als Bildschirmaufnahme verarbeitet werden; die Anwendung würde mittels einer KI-gestützten Auswertungssoftware exakte Konturen der drei autochthonen Muskelgruppen (M. multifidus, M. longissimus, M. iliocostalis) jeweils beidseits vorschlagen, die anschließend durch die Nutzerin oder den Nutzer validiert und feinjustiert werden könnten; darauf basierend würden Muskel- und Fettareale, ein Seitenvergleich sowie ein Muskel/Fett-Quotient berechnet und die Befundlage einer vierstufigen lumbalen Muskelatrophie (LMA)-Klassifikation zugeordnet (vgl. Abb. 20). Die CeHRes-Roadmap dient dabei als methodischer Leitfaden, da sie eine nutzungsnahe, iterative und partizipative Entwicklung von eHealth-Artefakten strukturiert (van Gemert-Pijnen et al., 2011; Kip et al., 2025). Aus

den Schnittflächen ließen sich unter Berücksichtigung der typischen MRT-Schichtdicke von 4 mm zusätzlich die jeweiligen Muskelvolumina ableiten; die in Kap. 3.4 nachgewiesene Klassifikations-Diskrepanz zwischen Standard- und vereinfachter Messung im Grenzbereich der mittleren bis schweren Atrophie (Cohen's $\kappa = 0{,}568$; Bowker $\chi^2 = 21{,}17$, $df = 5$, $p < 0{,}001$) untermauert die Notwendigkeit, die App auf der exakten Konturmessung aufzubauen.

Die CeHRes-Roadmap adressiert typische Gründe für das Scheitern digitaler Gesundheitsanwendungen—mangelnde Kontextpassung, unklare Nutzenargumente und fehlende Einbettung in Workflows—durch fünf aufeinander bezogene Phasen: Contextual Inquiry, Value Specification, Design, Operationalization und Summative Evaluation; die aktualisierte „CeHRes 2.0“ präzisiert Ziele und Pfeiler dieser Phasen und betont formative, iterative Bewertungen bereits vor Feldstudien (van Gemert-Pijnen et al., 2011; Kip et al., 2025).

Dass diese Vorgehensweise in der medizinischen Informationssystem-Praxis tragfähig ist, zeigen mehrere Anwendungen: Das webbasierte eSNAP-Tool zur Erfassung sozialer Unterstützungsnetze in der Onkologie wurde entlang CeHRes entwickelt und in Usability-Schritten formativ geprüft (Reblin et al., 2017). Ein integrierter, eHealth-gestützter Versorgungspfad („Diabetes Box“) für Menschen mit Typ-2-Diabetes wurde partizipativ nach CeHRes erstellt und berichtet Entwicklungsphasen, Artefakte und Lessons Learned (de Frel et al., 2024). Ein jugendpsychiatrisches Feedback-Tool („I Need to Know“) nutzte CeHRes-geleitetes Co-Design für patientenrelevante Ergebnisrückmeldungen (Bongers et al., 2022). Diese Beispiele illustrieren einen klaren Handlungsweg: kontextgeleitet konzipieren, Stakeholder früh einbinden, Artefakte sichtbar machen und formativ evaluieren—genau die Linie, die hier verfolgt wurde (Reblin et al., 2017; de Frel et al., 2024; Bongers et al., 2022).

Die Ableitung von Zielen und Anforderungen lässt sich über internationale Normen absichern: ISO 9241-210 beschreibt Prinzipien des menschzentrierten Gestaltens über den gesamten Lebenszyklus und gibt Anhaltspunkte für Aufgabenanalyse, Prototyping und formative Evaluation (ISO 9241-210, 2019). ISO/IEC 25010 liefert ein Qualitätsmodell

für Softwareprodukte (u. a. funktionale Eignung, Effizienz, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit), das als Soll-Katalog für eine ex-ante-Prüfung dient (ISO/IEC 25010, 2023). Auf dieser Basis können nicht-funktionale Anforderungen transparent formuliert und später systematisch geprüft werden (ISO 9241-210, 2019; ISO/IEC 25010, 2023).

Das resultierende Design priorisiert einen modularen Pipeline-Ansatz (Bildaufnahme/Import → Qualitätsprüfung → KI-gestützter Kontur-Vorschlag → Feinjustage → Flächen-, Quotienten- und (über die MRT-Schichtdicke) Volumenberechnung → LMA-Klassifikation → Bericht/Export) mit „on-device first“ zur Datensparsamkeit; Fehlerszenarien (unzureichende Bildqualität, fehlgeschlagener Vorschlag) würden über sichere Voreinstellungen und manuelle Fallbacks abgefangen. Interoperabilität kann über DICOM-Importpfade und optionale FHIR-Exportschnittstellen konzeptionell vorgesehen werden; die in Abbildung 24 skizzierten Interaktionsmuster (geführte Konturvalidierung, erklärbare Schwellen, kompakte Ergebnisansicht) adressieren Zeitdruck, Variabilität und Medienbrüche in klinischen Workflows (van Gemert-Pijnen et al., 2011).

Regulatorisch fällt Software mit medizinischem Zweck grundsätzlich unter die Verordnung (EU) 2017/745; für ein späteres Inverkehrbringen wären Zweckbestimmung, Klassifikation nach Regel 11, Qualitäts-/Risikomanagement (z. B. IEC 62304, ISO 14971, IEC 62366-1) sowie Ethik-/Datenschutzfreigaben erforderlich (EU-MDR, 2017; MDCG 2019-11, rev. 1). In dieser Dissertation wird kein Inverkehrbringen angestrebt; der Entwurf verbleibt auf konzeptioneller Ebene (EU-MDR, 2017; MDCG 2019-11, rev. 1).

Für die Evaluation empfiehlt sich ein zweistufiges Vorgehen. Ex-ante können Ziele-Fragen-Metriken (z. B. Messzeit pro Segment, Vollständigkeit des strukturierten Berichts, Eingabefehlerquote) analytisch geprüft werden; ex-post würden Reliabilität und Übereinstimmung empirisch untersucht. Der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) ist ein gebräuchlicher Index zur Bewertung von Intra-/Interrater-Reliabilität; häufig werden ICC-Werte < 0,50 als schwach, 0,50–0,75 als moderat, 0,75–0,90 als gut und > 0,90 als exzellent interpretiert (Koo & Li, 2016). Für die Übereinstimmung zwischen zwei Messweisen eignet sich die Bland-Altman-Analyse, die systematische Abweichung (Bias)

und 95 %-Grenzen der Übereinstimmung („Limits of Agreement“) grafisch und rechnerisch darstellt (Bland & Altman, 1986). Für spätere Studienberichte geben CONSORT-EHEALTH und die WHO-mERA-Checkliste strukturierte Berichtsraster (Eysenbach, 2011; Agarwal et al., 2016).

Die ökonomische Einbettung bleibt ein Implementationsfaktor: Die Gebührenordnung für Ärzte (GOÄ) in der Fassung von 1996 bildet app-spezifische Befundunterstützungen naturgemäß nicht ab; kurz- bis mittelfristig sind daher individuelle Gesundheitsleistungen (IGeL) bzw. selektive Vereinbarungen realistischer, bis zukünftige Regelungen digitale Leistungen sachgerecht integrieren (BGBl. I, 1996; BMG, 2022). Orientierung zu IGeL bieten zudem öffentliche Informationsquellen und Verbraucherportale (BMG, 2022; Verbraucherzentrale, 2024).

Stärken des Beitrags sind die problemnahe Ableitung des Artefaktdesigns aus der empirischen Vorarbeit (vereinfachte Messmethode), die explizite Orientierung an einem anerkannten eHealth-Rahmen (CeHRes) und die Anschlussfähigkeit an Normen und Regulatorik. Grenzen sind transparent benannt: Es liegen noch keine Intra-/Interrater-Reliabilitäten für die App-Interaktion, keine diagnostischen Genauigkeitsdaten und keine Usability-Ergebnisse aus realen Nutzungssituationen vor. Der skizzierte Evaluationspfad—analytische GQM-Prüfungen, Reliabilitätsstudien mit ICC, Übereinstimmungsanalysen nach Bland-Altman sowie standardisierte Usability-Erhebungen—bietet jedoch eine umsetzbare Agenda für Folgeschritte (Koo & Li, 2016; Bland & Altman, 1986; Eysenbach, 2011; Agarwal et al., 2016).

4.7 Limitationen

Die vorliegende Arbeit hat im vorangegangenen Diskussionskapitel zentrale Befunde dargestellt und in den aktuellen Forschungsstand eingeordnet, einschließlich der nüchternen Einordnung statistisch nicht signifikanter Ergebnisse. Trotz der dargelegten Beiträge weist die Untersuchung mehrere Limitationen auf, die im Folgenden systematisch benannt und kurz eingeordnet werden.

Zunächst ist das Studiendesign retrospektiv und auf einen einzelnen Standort beschränkt. Hierdurch können Selektions- und Übertragbarkeitsfragen entstehen, etwa weil ausschließlich Patientinnen und Patienten mit einer spezifischen Behandlungsindikation eingeschlossen wurden. Gleichwohl entspricht ein retrospektives, monozentrisches Vorgehen dem etablierten Vorgehen vieler klinischer Beobachtungsstudien, erlaubt eine hohe Datenkonsistenz innerhalb eines Versorgungskontextes und bildet eine pragmatische Grundlage für Hypothesengenerierung, die in nachfolgenden multizentrischen und prospektiven Studien überprüft werden kann. Zudem wurde die Untersuchung ohne externe Vergleichsgruppe durchgeführt. Vergleiche stützen sich überwiegend auf intraindividuelle oder gruppenweise Gegenüberstellungen innerhalb der Kohorte. Damit sind Aussagen zur Differenz gegenüber gesunden oder konservativ behandelten Kollektiven eingeschränkt. Zugleich ist diese Anlage im klinischen Alltag häufig unvermeidbar, da randomisierte oder streng parallelisierte Vergleichsgruppen bei bildgebungsbasierten Fragestellungen mit erheblichem Aufwand verbunden sind. Die gewählte Binnenvergleichslogik steigert dafür die interne Konsistenz und reduziert Verzerrungen durch zwischenindividuelle Heterogenität. Ein Vergleich mit etablierten Verfahren wird in Tab. 18 aufgeführt.

Die Messmethodik mit dem Xerox-Viewer (AGFA) beruht auf manuellen Segmentierungen und Flächenmessungen in definierten Regionen von paraspinaler Muskulatur und Fettgewebe. Manuelle Verfahren sind anfällig für Beobachtervariabilität, und es wurden keine formalen Inter- oder Intra-Rater-Reliabilitäten berichtet. Zudem können Unterschiede in Sequenzparametern und Bildqualität die Vergleichbarkeit begrenzen. Gleichzeitig orientiert sich die Messstrategie an gängigen klinischen Workflows, ist mit Standardsoftware umsetzbar und erhöht damit die praktische Anschlussfähigkeit. Die klare Dokumentation der Vorgehensweise ermöglicht es, in Folgestudien mit reliabilitätsgesicherten oder automatisierten Verfahren (z. B. halbautomatischer Segmentierung) anzusetzen. Die vereinfachte Messung mittels reduzierter ROI-Definition unterschätzt systematisch die Zielgröße im Vergleich zur Standardmessung und führt zu einem Niveauversatz zwischen beiden Ansätzen. Es liegt eine signifikante Diskrepanz von 22 (Grad 2) bzw. 23 Patient*innen (Grad 2) bei der

Einstufung der mittleren und schweren Atrophien zwischen der exakten Konturmessung und der vereinfachten Technik vor. Dadurch ist die direkte Vergleichbarkeit eingeschränkt. Bei breiterer Anwendung sollte deshalb der exakten Konturmessung der Vorzug gegeben werden.

Die statistischen Auswertungen erfolgten überwiegend univariat mit klassischen Testverfahren und einfachen Regressionsmodellen. Eine umfassende multivariable Adjustierung potenzieller Confounder (etwa Alter, Geschlecht, BMI, Rauchstatus, Segmentniveau, Stenosegrad) wurde nicht systematisch vorgenommen; eine formale Korrektur für multiples Testen sowie durchgängig berichtete Konfidenzintervalle fehlen. Dadurch sind Effektschätzer potenziell verzerrt und die Irrtumswahrscheinlichkeit schwerer einzuordnen. Gleichzeitig entspricht ein gestuftes, zunächst univariates Vorgehen dem üblichen klinischen Erkenntnispfad, schafft Transparenz über Rohzusammenhänge und liefert robuste Anknüpfungspunkte für vertiefte, adjustierte Modelle in Folgearbeiten.

Tab. 18: Methodenvergleich der Messmethode mit etablierten Verfahren

	Vorliegende Arbeit	**Haffer et al. (2023)**	**Prasetyo et al. (2016)**	**Hu et al. (2020)**
N	200	135	20 + 20	35 + 35
Diagnostik	MRT	MRT	CT	MRT
Diagnosen Indikationen	Bandscheiben-vorfälle	Spinalstenose NPP, Recessus-stenosen	Rückenschmerzen	Bandscheiben-vorfall L 4/5 unilateral
Studie	retrospektiv	prospektiv	prospektiv	prospektiv
Kontroll-gruppe	Gegenseite	Vorher/ Nachher Gegenseite	Freiwillige/ Gegenseite	Freiwillige/ Gegenseite
Mess-methode	quantitativ-händisch, Indexbildung	quantitativ-Dichtevorgabe, Indexbildung	quantitativ-Dichtevorgabe, Indexbildung	Fett unterdrückte Sequenzen, Indexbildung
Messungs-region	ventral und dorsal	ventral und dorsal	dorsal	dorsal
gemessene LWS Etagen	L 1- L 5; betroffene Etagen	L 3	L4 und L5	L 4 und L5
Stärken	Messung in betroffenen Etagen; große Beobachtungseinheit; homogene Studiengruppe.	PC-gesteuertes Ausmessen; Interobserver-Variation erfasst; Prospektiv; Vorher-/Nachher-Vergleich.	Prospektiv; automatisierte Kalkulation der Fettinfiltration (Hounsfield-Einheiten); einfache Durchführbarkeit.	Prospektiv; Vergleich von fettunter-drückter und normaler MRT-Sequenzen.

	Vorliegende Arbeit	Haffer et al. (2023)	Prasetyo et al. (2016)	Hu et al. (2020)
Schwächen	Potenzieller „human factor“; händisches Ausmessen (Freihandtechnik); lange Auswertungszeit; keine Intra-/Interobserver-Variation; retrospektives Design.	Messung auch in nicht betroffenen Etagen; heterogene Studiengruppe; Artefakte nach OP.	CT-Strahlen-belastung; kleine Studiengruppe; Bedarf an spezialisierter Software; Freihandtechnik.	Kleine Studien-gruppen; keine Intra-/ Inter-observer-Variation.

Die Wahl und Granularität einzelner Expositions- und Kovariatenmaße ist begrenzt. Berufsbezogene Belastungen wurden nur grob kategorisiert, und retrospektiv erhobene Symptomdauern unterliegen potenziellem Recall-Bias. Auch segment- und seitenbezogene Messungen können, je nach Bildlage und Degenerationsmustern, zu Heterogenität führen. Demgegenüber steht, dass die gewählten Variablen dem klinischen Dokumentationsstandard entsprechen und die Datenerhebung so realistisch und praktikabel bleibt. Damit bildet die Studie typische Versorgungssituationen ab und erhöht die Relevanz der Befunde für den Alltag.

Die vorgeschlagenen Grenzwerte und Klassifikationen für muskuloskelettale Atrophie wurden datensatzintern abgeleitet und bislang nicht extern validiert. Hieraus ergibt sich eine eingeschränkte Generalisierbarkeit der vorgeschlagenen Cut-offs auf andere Populationen, Scanner, Sequenzen oder Auswerteprotokolle. Zugleich stellt die transparente Ableitung innerhalb eines klar beschriebenen Kollektivs einen notwendigen ersten Schritt dar, auf dessen Basis externe Validierungen effizient konzipiert und durchgeführt werden können. Zudem liegen in der Studie keine longitudinalen Daten mit klinischen Endpunkten, wie funktionellen Scores, Schmerzverlauf oder Re-Interventionsraten vor. Damit können prognostische Aussagen zur Verknüpfung von Bildparametern mit längerfristigen Outcomes derzeit nicht getroffen werden. Dieser Verzicht ist für eine erste, bildgebungszentrierte Querschnittsanalyse jedoch vertretbar; er begrenzt den Anspruch bewusst auf Assoziationen und schafft eine solide Ausgangslage für prospektive Verlaufsstudien.

Schließlich wurde ein translationaler Ansatz für eine vereinfachte, potenziell app-gestützte Umsetzung skizziert, ohne dass hierfür Usability-, Reliabilitäts- oder diagnostische Leistungsstudien vorliegen oder eine regulatorische Einordnung erfolgt ist. Der konzeptionelle Charakter mindert zwar die unmittelbare Implementierbarkeit, macht die technischen und datenschutzrechtlichen Erfordernisse jedoch konkret und bietet ein klar umrissenes Pflichtenheft für nachgelagerte Validierungs- und Implementierungsstudien.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die genannten Limitationen die Interpretation der Ergebnisse vorsichtig machen, den zentralen Erkenntnisgewinn jedoch nicht grundsätzlich in Frage stellen. Das retrospektive, monozentrische Design, die manuelle Messmethodik und die unvollständige Adjustierung bilden den Rahmen einer methodisch soliden explorativen Studie, die klinisch anschlussfähige Messprotokolle nutzt und relevante Assoziationen offenlegt. Die bewusste Beschränkung auf praktikable Variablen und Workflows erhöht die Übertragbarkeit in den klinischen Alltag und ermöglicht eine fokussierte Weiterentwicklung. Aus den Limitationen leiten sich klare Perspektiven für künftige Forschung ab. Prioritär erscheinen multizentrische, prospektive Studien mit standardisierten Sequenzprotokollen, reliabilitätsgesicherten (halb-)automatischen Segmentierungen und umfassender Confounder-Adjustierung einschließlich Sensitivitätsanalysen und Korrekturen für multiples Testen. Externe Validierungen der abgeleiteten Grenzwerte in unabhängigen Kohorten sowie longitudinal angelegte Untersuchungen mit klinischen Endpunkten sollten die prognostische Relevanz der bildgebenden Maße prüfen. Für die translationalen Aspekte sind schrittweise Evaluationsstudien der vorgeschlagenen vereinfachten Messung – von technischer Validierung über Usability bis zur diagnostischen Leistungsbewertung – sinnvoll, einschließlich einer frühzeitigen Klärung regulatorischer Anforderungen. Auf diese Weise können die hier gewonnenen Befunde systematisch konsolidiert und in Richtung einer belastbaren klinischen Anwendung weiterentwickelt werden.

5 Zusammenfassung

Lumbale Bandscheibenvorfälle gehören zu den häufigen und sozioökonomisch bedeutsamen Erkrankungen der Wirbelsäule. Klinische Symptomatik, berufliche Belastungsfaktoren und bildgebende Befunde lassen sich dabei oft nicht eindeutig miteinander verknüpfen. Ein besonderer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Rolle der paraspinalen Muskulatur und ihrer Atrophie sowie hinsichtlich der Frage, wie sich diese Veränderungen in der klinischen Routine effizient und reproduzierbar quantifizieren lassen. Ziel der vorliegenden Arbeit war eine retrospektive Analyse klinischer und bildgebender Parameter, die Entwicklung und Validierung eines vereinfachten Messverfahrens für die paraspinale Muskulatur sowie die Ableitung eines digitalen Befundungssystems.

Ausgewertet wurden retrospektiv MRT-Aufnahmen von 200 Patient*innen mit operativ behandeltem lumbalem Bandscheibenvorfall. Neben epidemiologischen und klinischen Parametern wurden die Fläche des Bandscheibenvorfalls, der restverfügbare freie Raum im Recessus spinalis, die Querschnittsflächen der dorsalen autochthonen und der ventralen lumbalen Muskulatur sowie der segmentale Fettanteil erfasst. Zur Quantifizierung der muskulären Atrophie wurde ein Quotient aus Muskel- und Fettfläche im betroffenen Segment gebildet und mit der unbetroffenen Gegenseite verglichen. Parallel wurde ein vereinfachtes Messverfahren auf Basis kreisförmiger Regions of Interest eingeführt und mit der Standardmessung verglichen.

Zwischen der beruflichen Tätigkeit mit häufigem schwerem Heben und Tragen und der Fläche des Bandscheibenvorfalls fanden sich keine statistisch signifikanten Unterschiede; gleiches gilt für den Zusammenhang zwischen Vorfallsfläche und restverfügbarem freien Raum im Recessus spinalis, der ebenfalls nicht signifikant war. Zwischen der Dauer der präoperativ angegebenen Schmerzen und dem reinen Muskelquerschnitt der dorsalen Rückenmuskulatur bestand kein signifikanter Zusammenhang, wohingegen die fettige Atrophie mit der Schmerzdauer positiv korrelierte. Die Querschnittsflächen der dorsalen und ventralen lumbalen Muskulatur unterschieden sich zwischen betroffener und unbetroffener Seite im Mittel nur gering und nicht signifikant.

Aufbauend auf den gewonnenen Messgrößen wurde ein neues vierstufiges Klassifikationssystem der lumbalen muskulären Atrophie vorgeschlagen, das den Quotienten Muskel zu Fett zur Einordnung in vier Atrophiegrade nutzt. Die vereinfachte Messmethode erlaubt eine schnelle Annäherung an die Standardmessung, weicht jedoch im Grenzbereich der mittleren bis schweren Atrophie systematisch von der exakten Konturmessung ab (Cohen's $\kappa = 0{,}568$; Bowker $\chi^2 = 21{,}17$, $df = 5$, $p < 0{,}001$). Ergänzend wurde ein konzeptionelles Design für eine digitale, app-gestützte Anwendung zur Befundung der lumbalen Muskelatrophie entwickelt. Aufgrund der nachgewiesenen Diskrepanz zwischen vereinfachter und exakter Messung wird für die App-Architektur die exakte Konturmessung aller drei autochthonen Muskelgruppen empfohlen.

Die vorliegende Dissertation liefert einen Beitrag zur systematischen Erfassung lumbaler muskulärer Atrophie bei Bandscheibenvorfällen und verbindet klinische, radiologische und digitale Perspektiven in einer praxisnahen Form. Die Ergebnisse sind angesichts des retrospektiven und monozentrischen Studiendesigns sowie der manuellen Segmentierung mit der gebotenen Zurückhaltung zu interpretieren; eine externe Validierung der vorgeschlagenen Klassifikation und der App-Architektur in prospektiven Studien bleibt notwendig.

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bandscheibenvorfall – Präparat und CT-Bild 11
Abb. 2: Anatomisches Modell eines Bandscheibenvorfalls 13
Abb. 3: Schematischer Muskelquerschnitt L5/S1 mit Bandscheibenvorfall 14
Abb. 4: Bandscheibenhöhen nach Hurxthal (1968) 20
Abb. 5: Modic-Klassifikation der Bandscheibendegeneration 21
Abb. 6: MRT-Auswertung L5/S1 mit Bandscheibenvorfall 30
Abb. 7: Fujiwara-Klassifikation der Facettgelenkarthrose 31
Abb. 8: Foramen intervertebrale im MRT und anatomischen Modell 31
Abb. 9: Flächenerfassung der dorsalen Muskulatur auf Höhe L5/S1 33
Abb. 10: Berufliche Tätigkeiten in der Studiengruppe 38
Abb. 11: Häufigkeit der Nebendiagnosen 39
Abb. 12: Lokalisation des Diskusprolaps nach Segmenthöhe und Seite 40
Abb. 13: Differenzierung der motorischen Ausfälle 40
Abb. 14: Intensität der motorischen Ausfälle 41
Abb. 15: Verhältnisse von Muskel zu Fett auf der Seite des Bandscheibenvorfalls und der Gegenseite 46
Abb. 16: Vergleich der Fläche des Bandscheibenvorfalls mit der Berufstätigkeit 49
Abb. 17: Fläche des Bandscheibenvorfalls in Abhängigkeit vom Lasègue-Zeichen 53
Abb. 18: Vergleich der größten messbaren Querschnittsflächen der Wirbelsäulenmuskulatur dorsal und ventral 57
Abb. 19: Darstellung der Mittelwerte der Muskelgrößen nach standardmäßiger und vereinfachter Messung 59
Abb. 20: Vorschlag für eine Klassifikation für die lumbale muskuläre Atrophie 62
Abb. 21: Anzahl der Atrophien nach Klassifikation (standardmäßig und vereinfacht) 63
Abb. 22: MRT Horizontalschnitt im Segment L 4/5 für die Kasuistik 195 65
Abb. 23: MRT Horizontalschnitt im Segment L 5/ S1 für die Kasuistik 156 67
Abb. 24: Prototyp-Layout der „Myo Check App Lumbale Wirbelsäule“ 72

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Grade der Muskelkraft nach Janda 16
Tab. 2: Schädigungshöhen der unteren LWS mit Kennmuskeln und Reflexausfällen ... 17
Tab. 3: Normierte Bandscheibenhöhe nach Hurxthal mit Korrektur nach Robertson 28
Tab. 4: Übersicht über verwendete statistische Methoden 35
Tab. 5: Deskriptive Statistiken der Patientenvariablen 37
Tab. 6: Deskriptive Statistiken der radiologischen Erhebung 42
Tab. 7: Deskriptive Statistiken der Vorfallsgröße 43
Tab. 8: Deskriptive Statistiken der Muskel- und Fettgrößen 44
Tab. 9: Fläche der Vorfälle für verschiedene Berufstätigkeiten 49
Tab. 10: Regressionsergebnisse hinsichtlich Fläche des Vorfalls und freiem Raum im Spinalkanal 51
Tab. 11: Regressionsergebnisse hinsichtlich Lasègue und Fläche des Vorfalls 52
Tab. 12: Mittelwertvergleich der Vorfallsflächen nach Lasègue 54
Tab. 13: Regressionsergebnisse der Muskel- und Fettgrößen nach Schmerzmonaten. 55
Tab. 14: Fläche der Vorfälle für verschiedene Berufstätigkeiten 57
Tab. 15: Vergleich der standardmäßigen und vereinfachten Messung 60
Tab. 16: Klassifikation der lumbalen muskulären Atrophie (LMA) 61
Tab. 17: Übersicht des App-Prototyps nach CeHRes-Roadmap 73
Tab. 18: Methodenvergleich der Messmethode mit etablierten Verfahren 93

8 Literaturverzeichnis

Agarwal S, LeFevre AE, Lee J, L'Engle K, Mehl G, Sinha C, Labrique A; WHO mHealth Technical Evidence Review Group. Guidelines for reporting of health interventions using mobile phones: mobile health (mHealth) evidence reporting and assessment (mERA) checklist. BMJ. 2016 Mar 17;352:i1174. doi:10.1136/bmj.i1174

Alamin T, Agarwal V, Zagel A, Qeli A. The effect of standing vs. variants of the seated position on lumbar intersegmental angulation and spacing: a radiographic study of 20 asymptomatic subjects, J Spine Surg. 2018; Sept 4(3) :509 – 515

AOK Rheinland. Rückenschmerzen — Jeder Rheinländer im Schnitt zwei Tage arbeitsunfähig. Pressemeldung vom 11.03.2020. Verfügbar unter https://rheinland.aok.de/. Abgerufen 02.06.2022

Battié MC, Niemelainen R, Gibbons LE, Dhillon S. Is level- and side-specific multifidus asymmetry a marker for lumbar disc pathology? Spine J. 2012;12(10):932–9. doi:10.1016/j.spinee.2012.08.020

Benson RT, Tavares SP, Robertson SC, Sharp R, Marshall RW. Conservatively treated massive prolapsed discs: a 7-year follow-up. Ann R Coll Surg Engl. 2010;92(2):147–53. doi:10.1308/003588410X12518836438840

Billy GG, Lemieux SK, Chow MX. Lumbar disc changes associated with prolonged sitting. PM&R. 2014;6(9):790–5. doi:10.1016/j.pmrj.2014.02.005

Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet. 1986;1(8476):307–10. doi:10.1016/S0140-6736(86)90837-8

Boden SD, Davis DO, Dina TS, Patronas NJ, Wiesel SW. Abnormal magnetic-resonance scans of the lumbar spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation. J Bone Joint Surg Am. 1990;72(3):403–8

Bolm-Audorff U, Brandenburg S, Brüning T, Dupuis H, Ellegast R, Elsner G, et al. Medizinische Beurteilungskriterien zu bandscheibenbedingten Berufskrankheiten der Lendenwirbelsäule (I) — Konsensempfehlungen zur Zusammenhangsbegutachtung der auf Anregung des HVBG eingerichteten interdisziplinären Arbeitsgruppe. Trauma Berufskrankh. 2005;7:211–52. doi:10.1007/s10039-005-1027-5

Bongers IL, Buitenweg DC, van Kuijk REFM, van Nieuwenhuizen C. I need to know: using the CeHRes Roadmap to develop a treatment feedback tool for youngsters with mental health problems. Int J Environ Res Public Health. 2022;19(17):10834. doi:10.3390/ijerph191710834

Bragard K. Über das Lasèguesche Phänomen. Münch Med Wochenschr. 1928;75:387–9

Brinjikji W, Luetmer PH, Comstock B, Bresnahan BW, Chen LE, Deyo RA, et al. Systematic literature review of imaging features of spinal degeneration in asymptomatic populations. AJNR Am J Neuroradiol. 2015;36(4):811–6. doi:10.3174/ajnr.A4173

Bullough PG, Boachie-Adjei O. Farbatlas der Wirbelsäulenerkrankungen. Hannover: Schlütersche Verlagsanstalt; 1994

Bush K, Cowan N, Katz DE, Gishen P. The natural history of sciatica associated with disc pathology. A prospective study with clinical and independent radiologic follow-up. Spine (Phila Pa 1976). 1992;17(10):1205–12. doi:10.1097/00007632-199210000-00013

Canva Pty Ltd. Canva — Online-Designtool, Sydney, Australien. Verfügbar unter https://www.canva.com/. Abgerufen 04.12.2024

Chua M, Hochberg U, Regev G, Ophir D, Salame K, Lidar Z, et al. Gender differences in multifidus fatty infiltration, sarcopenia and association with preoperative pain and functional disability in patients with lumbar spinal stenosis. Spine J. 2022;22(1):58–63. doi:10.1016/j.spinee.2021.06.007

Cooley JR, Walker BF, Ardakani EM, Kjaer P, Jensen TS, Hebert JJ. Relationships between paraspinal muscle morphology and neurocompressive conditions of the lumbar spine: a systematic review with meta-analysis. BMC Musculoskelet Disord. 2018;19(1):351. doi:10.1186/s12891-018-2266-5

Cribb GL, Jaffray DC, Cassar-Pullicino VN. Observations on the natural history of massive lumbar disc herniation. J Bone Joint Surg Br. 2007;89(6):782–4. doi:10.1302/0301-620X.89B6.18712

Dallaway A, Kite C, Griffen C, Duncan M, Tallis J, Renshaw D, et al. Age-related degeneration of the lumbar paravertebral muscles: systematic review and three-level meta-regression. Exp Gerontol. 2020;133:110856. doi:10.1016/j.exger.2020.110856

Danneels LA, Cools AM, Vanderstraeten GG, Cambier DC, Witvrouw EE, Bourgois J, et al. Differences in electromyographic activity in the multifidus muscle and the iliocostalis lumborum between healthy subjects and patients with sub-acute and chronic low back pain. Eur Spine J. 2002;11(1):13–9. doi:10.1007/s005860100314

Danneels LA, Vanderstraeten GG, Cambier DC, Witvrouw EE, Bourgois J, Dankaerts W, et al. Effects of three different training modalities on the cross-sectional area of the lumbar multifidus muscle in patients with chronic low back pain. Br J Sports Med. 2001;35(3):186–91. doi:10.1136/bjsm.35.3.186

de Frel D, Schroijen M, Aardoom J, van Gils W, Huisman S, Janssen V, et al. Participatory development of an integrated, eHealth-supported, educational care pathway (Diabetes Box) for people with type 2 diabetes: development and usability study. JMIR Hum Factors. 2024;11:e45055. doi:10.2196/45055

Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA). Fragen an den Kundenservice — Ist eine App patentierbar? Stand 02.11.2021. Verfügbar unter https://www.dpma.de/. Abgerufen 02.06.2022

Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ). Tabakatlas Deutschland 2020. Heidelberg: DKFZ; 2020

Donnally CJ III, Hanna A, Varacallo M. Lumbar degenerative disk disease. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023. Verfügbar unter https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448134/

Elmasry S, Asfour S, de Rivero Vaccari JP, Travascio F. Effects of tobacco smoking on the degeneration of the intervertebral disc: a finite element study. PLoS One. 2015;10(8):e0136137. doi:10.1371/journal.pone.0136137

EU-Verordnung (EU) 2017/745 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2017 über Medizinprodukte (MDR). Amtsblatt der Europäischen Union L 117/1 vom 05.05.2017. Verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/745/oj

Eysenbach G, CONSORT-EHEALTH Group. CONSORT-EHEALTH: improving and standardizing evaluation reports of web-based and mobile health interventions. J Med Internet Res. 2011;13(4):e126. doi:10.2196/jmir.1923

Felber S. Radiologische Diagnostik bei Wirbelsäulenerkrankungen. J Neurol Neurochir Psychiatr. 2011;12(1):S9–14

Fessl R. MRT. In: Bohndorf K, Imhof H, Wörtler K, Hrsg. Radiologische Diagnostik der Knochen und Gelenke. 4. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2017. doi:10.1055/b-004-140284

Fuchs J, Rabenberg M, Scheidt-Nave C. Prävalenz ausgewählter muskuloskelettaler Erkrankungen. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz. 2013;56(5–6):678–86. doi:10.1007/s00103-013-1687-4

Fujiwara A, Tamai K, An HS, Kurihashi T, Lim TH, Yoshida H, et al. The relationship between disc degeneration, facet joint osteoarthritis, and stability of the degenerative lumbar spine. J Spinal Disord. 2000;13(5):444–50. doi:10.1097/00002517-200010000-00013

Fujiwara A, Tamai K, Yamato M, An HS, Yoshida H, Saotome K, et al. The relationship between facet joint osteoarthritis and disc degeneration of the lumbar spine: an MRI study. Eur Spine J. 1999;8(5):396–401. doi:10.1007/s005860050193

Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE). Gesundheit in Deutschland — Rückenschmerzen. 2012. Verfügbar unter https://www.gbe-bund.de/. Abgerufen 02.06.2022

Goubert D, Van Oosterwijck J, Meeus M, Danneels L. Structural changes of lumbar muscles in non-specific low back pain: a systematic review. Pain Physician. 2016;19(7):E985–1000

Grifka J, Greimel F, Boluki D, Parik L. Orthopädie/Unfallchirurgie highlighted. Bayer Ärztebl. 2021;76(3):64–70

Haffer H, Muellner M, Chiapparelli E, Dodo Y, Camino-Willhuber G, Zhu J, et al. Georg Schmorl Prize of the German Spine Society (DWG) 2023: the influence of sarcopenia and paraspinal muscle composition on patient-reported outcomes. Eur Spine J. 2024;33(5):1737–46. doi:10.1007/s00586-024-08268-9

Hou X, Hu H, Kong C, Li Y, Zhang S, Wang W, et al. Correlation of psoas major muscle morphology with function and clinical symptoms in patients with symptomatic multilevel lumbar spinal stenosis. J Orthop Surg Res. 2023;18(1):111. doi:10.1186/s13018-023-03596-w

Hu L, Zhao Y, Zhang C, et al. Imaging study of lumbosacral multifidus muscle fat changes in patients with lumbar disc herniation [Article in Chinese]. Zhongguo Gu Shang. 2020;33(2):173–7

Hurxthal LM. Measurement of anterior vertebral compressions and biconcave vertebrae. Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med. 1968;103(3):635–44. doi:10.2214/ajr.103.3.635

Internationale Organisation für Normung. ISO 9241-210:2019 — Ergonomie der Mensch-System-Interaktion — Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme. Genf: ISO; 2019. Verfügbar unter https://www.iso.org/standard/77520.html

Internationale Organisation für Normung. ISO/IEC 25010:2023 — Systems and software engineering — Systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE) — Product quality model. Genf: ISO; 2023. Verfügbar unter https://www.iso.org/standard/78176.html

Jensen MC, Brant-Zawadzki MN, Obuchowski N, Modic MT, Malkasian D, Ross JS. Magnetic resonance imaging of the lumbar spine in people without back pain. N Engl J Med. 1994;331(2):69–73. doi:10.1056/NEJM199407143310201

Schmorl G, Junghanns H. Die gesunde und die kranke Wirbelsäule in Röntgenbild und Klinik. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1968

Junghanns H. Die funktionelle Pathologie der Zwischenwirbelscheiben als Grundlage für klinische Betrachtungen. Langenbecks Arch Klin Chir. 1951;267:393–417

Kip H, Beerlage-de Jong N, van Gemert-Pijnen L, Kelders SM. The CeHRes Roadmap 2.0: update of a holistic framework for development, implementation, and evaluation of eHealth technologies. J Med Internet Res. 2025;27:e59601. doi:10.2196/59601

Koebbe CJ, Maroon JC, Abla A, El-Kadi H, Bost J. Lumbar microdiscectomy: a historical perspective and current technical considerations. Neurosurg Focus. 2002;13(2):E3. doi:10.3171/foc.2002.13.2.4

Koo TK, Li MY. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. J Chiropr Med. 2016;15(2):155–63. doi:10.1016/j.jcm.2016.02.012

Krämer J. Bandscheibenbedingte Erkrankungen. 3. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1994

Lauterbur PC. Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. Nature. 1973;242(5394):190–1. doi:10.1038/242190a0

Lee JC, Cha JG, Kim Y, Kim YI, Shin BJ. Quantitative analysis of back muscle degeneration in the patients with the degenerative lumbar flat back using a digital image analysis: comparison with the normal controls. Spine (Phila Pa 1976). 2008;33(3):318–25. doi:10.1097/BRS.0b013e318162458f

Modic MT, Masaryk TJ, Ross JS, Carter JR. Imaging of degenerative disk disease. Radiology. 1988;168(1):177–86. doi:10.1148/radiology.168.1.3289089

Movahed M, Ohashi JY, Kurustien N, Izumi H, Kumashiro M. Fatigue sensation, electromyographical and hemodynamic changes of low back muscles during repeated static contraction. Eur J Appl Physiol. 2011;111(3):459–67. doi:10.1007/s00421-010-1664-7

Ossendorf A. Krankheitskostenanalyse bei Patient*innen mit chronischen Rückenschmerzen [Diplomarbeit/Working Paper]. Kiel/Hamburg: ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft; 2020

Park MS, Moon SH, Kim TH, Oh JK, Kim SW, Riew KD. Paraspinal muscles of patients with lumbar diseases. J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg. 2018;79(4):323–9. doi:10.1055/s-0038-1639332

Pathria M, Sartoris DJ, Resnick D. Osteoarthritis of the facet joints: accuracy of oblique radiographic assessment. Radiology. 1987;164(1):227–30. doi:10.1148/radiology.164.1.3588910

Paul CP, Schoorl T, Zuiderbaan HA, Zandieh Doulabi B, van der Veen AJ, van de Ven PM, et al. Dynamic and static overloading induce early degenerative processes in caprine lumbar intervertebral discs. PLoS One. 2013;8(4):e62411. doi:10.1371/journal.pone.0062411

Pfirrmann CW, Metzdorf A, Zanetti M, Hodler J, Boos N. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration. Spine (Phila Pa 1976). 2001;26(17):1873–8. doi:10.1097/00007632-200109010-00011

Putz R, Pabst R, Hrsg. Sobotta — Atlas der Anatomie des Menschen. Band 2: Rumpf, Eingeweide, untere Extremität. 21. Aufl. München: Urban & Fischer; 2000

Ranger TA, Cicuttini FM, Jensen TS, Peiris WL, Hussain SM, Fairley J, et al. Are the size and composition of the paraspinal muscles associated with low back pain? A systematic review. Spine J. 2017;17(11):1729–48. doi:10.1016/j.spinee.2017.07.002

Ranger TA, Cicuttini FM, Jensen TS, Heritier S, Urquhart DM. Paraspinal muscle cross-sectional area predicts low back disability but not pain intensity. Spine J. 2019;19(5):862–8. doi:10.1016/j.spinee.2018.12.004

Reblin M, Wu YP, Pok J, Kane L, Colman H, Cohen AL, et al. Development of the electronic Social Network Assessment Program using the Center for eHealth and Wellbeing Research Roadmap. JMIR Hum Factors. 2017;4(3):e23. doi:10.2196/humanfactors.7845

Robert Koch-Institut, Hrsg. Rückenschmerzen. Gesundheitsberichterstattung des Bundes, Heft 53. Berlin: RKI; 2012

Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. Prometheus — Lernatlas der Anatomie. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. Stuttgart: Thieme; 2005

Seitz NN, John L, Atzendorf J, Rauschert C, Kraus L. Kurzbericht epidemiologischer Suchtsurvey 2018: Tabakkonsum und Hinweise auf Konsumabhängigkeit nach Geschlecht und Alter. München: IFT Institut für Therapieforschung; 2019

Spiegel Online. Rückenschmerzen durch Zigaretten? Hamburg: Spiegel; 29.08.2000. Verfügbar unter https://www.spiegel.de/. Abgerufen 02.06.2022

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. Durchschnittsalter der Bevölkerung. 2021. Verfügbar unter https://www.statistikportal.de/. Abgerufen 25.03.2022

Statistisches Bundesamt. Jeder zweite Erwachsene in Deutschland hat Übergewicht. Pressemitteilung Nr. 386 vom 05.11.2014. Wiesbaden: Destatis; 2014. Verfügbar unter https://www.destatis.de/. Abgerufen 02.06.2022

Statistisches Bundesamt. Krankheitskosten. Fachserie 12, Reihe 7.2. Wiesbaden: Destatis; 2010. Verfügbar unter https://www.destatis.de/. Abgerufen 02.06.2022

Statistisches Bundesamt. Hüftgelenksarthrose und Rückenschmerzen häufigste Reha-Diagnosen. Pressemitteilung Nr. 280 vom 01.07.2005. Wiesbaden: Destatis; 2005. Verfügbar unter https://www.destatis.de/. Abgerufen 02.06.2022

Stevens S, Agten A, Timmermans A, Vandenabeele F. Unilateral changes of the multifidus in persons with lumbar disc herniation: a systematic review and meta-analysis. Spine J. 2020;20(10):1573–85. doi:10.1016/j.spinee.2020.04.007

Suri P, Hunter DJ, Rainville J, Guermazi A, Katz JN. Vascular disease is associated with facet joint osteoarthritis. Osteoarthritis Cartilage. 2010;18(9):1127–30. doi:10.1016/j.joca.2010.06.012

Vahlensieck M, Reiser M. MRT des Bewegungsapparates. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2001

van Gemert-Pijnen JEWC, Nijland N, van Limburg M, Ossebaard HC, Kelders SM, Eysenbach G, et al. A holistic framework to improve the uptake and impact of eHealth technologies. J Med Internet Res. 2011;13(4):e111. doi:10.2196/jmir.1672

Wan Q, Lin C, Li X, Zeng W, Ma C. MRI assessment of paraspinal muscles in patients with acute and chronic unilateral low back pain. Br J Radiol. 2015;88(1053):20140546. doi:10.1259/bjr.20140546

Weishaupt D, Zanetti M, Boos N, Hodler J. MR imaging and CT in osteoarthritis of the lumbar facet joints. Skeletal Radiol. 1999;28(4):215–9. doi:10.1007/s002560050503

Woodham M, Woodham A, Skeate JG, Freeman M. Long-term lumbar multifidus muscle atrophy changes documented with magnetic resonance imaging: a case series. J Radiol Case Rep. 2014;8(5):27–34. doi:10.3941/jrcr.v8i5.1401

Yazıcı A, Yerlikaya T, İnız A. An evaluation of the efficacy of a four-grade fat infiltration classification method, presented for the first time in literature. BMC Musculoskelet Disord. 2022;23(1):226. doi:10.1186/s12891-022-05176-1

Zeitler S. Non-invasive, quantitative Erfassung der dynamischen Rückenform und Beweglichkeit mit dem Epionics SPINE® bei Patient*innen mit mono- und bisegmentalen degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen — Prä- und postoperative Verlaufsuntersuchungen nach lumbaler Fusionsoperation [Inauguraldissertation]. Berlin: Charité — Universitätsmedizin Berlin; 2018

Zielinska N, Podgórski M, Haładaj R, Polguj M, Olewnik Ł. Risk factors of intervertebral disc pathology — a point of view formerly and today: a review. J Clin Med. 2021;10(3):409. doi:10.3390/jcm10030409

9 Anhang

Evaluationsbogen:

Legende

Frau (Herr) Name

Alter

Beruf

BMI Größe Gewicht

Raucher(-in) Zig/Tag

Diagnose: OP-Datum

Nebendiagnose:

Lasègue-Bragard: positiv/negativ, ab wie viel Grad

Neurom. Ausfälle: z.B. Fußsenkerschwäche (Kraftmessung nach Janda)

Wie lange Schmerzen

<u>Vermessungen:</u>

1.Relative BS-Höhe nach Hurxthal (Tabelle)

2. Breite des Spinalkanals

a) weniger 5 mm – absolute Spinalkanalstenose

b) 5-7 mm – relative Spinalkanalstenose

3. Oberfläche und Länge (d) des Defektes (Schema 2)

a) weniger 5 qmm- Protrusio

b) über 5 qmm – BSV

c) über 10 qmm- massiver Vorfall

d) Länge des Defektes

4. Berechnung der Neuroforamina (sagittale Schnittführung) Schema 1

Oberfläche: For., Nerv, Defekt, Frei

a) fehlender Kontakt zur Nervenwurzel

b) direkter Kontakt ohne Anhebung oder Kompression

c) Anhebung der Nervenwurzel

d) Kompression der Nervenwurzel

5. Muskulatur mit Fettschicht dorsal und ventral bds nach Schema 2 (zwei Verfahren)

Schema 1

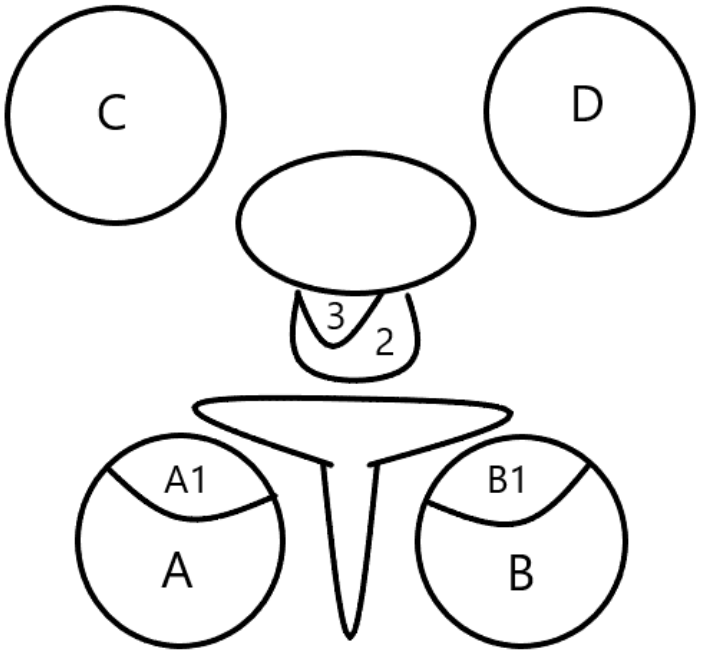
fehlender Kontakt zur Nervenwurzel

direkter Kontakt ohne Anhebung oder Kompression

Anhebung der Nervenwurzel

Kompression der Nervenwurzel

Schema 2



10 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie/ Bereich Neurochirurgie des AMEOS Klinikums Geestland unter Betreuung von Herrn Prof. Dr. Ulrich A. Wagner durchgeführt.
Die Konzeption der Studie und der Arbeit erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr. Ulrich A. Wagner / Chefarzt (em.) der Klinik für Orthopädie u. Unfallchirurgie.
Sämtliche Analysen wurden nach Einarbeitung durch Herrn Prof. Dr. Ulrich A. Wagner von mir eigenständig durchgeführt.
Das zur Auswertung verwendete Datenmaterial wurde eigenständig zusammengestellt.
Die statistische Auswertung erfolgte nach Beratung durch das Institut für Medizinische Biometrie, Informatik und Epidemiologie (IMBIE) der Universität Bonn und durch Unterstützung von Herrn Jannik Ole Wecks / wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institute for Finance and Accounting der Universität Bremen durch mich.
Bei der Erstellung dieser Arbeit verwendete ich kein ChatGPT oder eine andere künstliche Intelligenz sondern ausschließlich die im Bereich Material und Methoden aufgeführten Programme inklusive eines Zitationsprogramms . Ich übernehme die volle Verantwortung für den Inhalt der veröffentlichten Dissertationsschrift.
Ich versichere, die Dissertationsschrift selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

11 Danksagung

Herrn Prof. Dr. U. Wagner, Chefarzt am AMEOS Klinikum Geestland / Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie möchte ich ganz herzlich für die Überlassung des Promotionsthemas danken. Er hat weder Zeit noch Mühen gescheut, die Arbeit ständig wohlwollend zu fördern und war stets ansprechbar. Seine Hinweise, kritische Durchsicht der Arbeit und vielen Ratschläge waren mir eine große Hilfe.

Herrn Janik Ole Wecks, wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institute for Finance and Accounting der Universität Bremen danke ich für die Unterstützung bei den statistischen Auswertungen und Formulierungen.

Der Mitarbeiterin Frau Charlotte Behning des Instituts für Medizinische Biometrie, Informatik und Epidemiologie (IMBIE) Universitätsklinikum Bonn (AöR) Venusberg- Campus 1 Gebäude 11, 53127 Bonn danke ich für statistische Beratungen.

Herrn Dr. A. Er, Chefarzt der Abteilung für Wirbelsäulenchirurgie am AMEOS Klinikum Geestland und Herr Dr. Shaath, Oberarzt für die Überlassung der klinischen Unterlagen.

Meiner Familie danke ich für die Geduld bei langen Abwesenheiten in der Klinik und die Unterstützung im täglichen Ablauf.