

Aus der orthopädischen Universitätsklinik Tübingen

**Einschätzung der zu erwartenden Schmerzreduktion
durch epidurale Injektion oder Facettengelenksinfiltration
bei degenerativen Lendenwirbelsäulenerkrankungen
anhand kernspintomographischer Bildgebung**

Inaugural-Dissertation
zu Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Keller, Ramona Luise

2020

Dekan: Professor Dr. B.Pichler

1.Berichterstatter: Professor Dr. F. Mittag

2.Berichterstatter: Professor Dr. A.Nieß

Tag der Disputation 21.07.2020

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis | 5 |
| Abbildungsverzeichnis | 7 |
| Tabellenverzeichnis | 11 |
| Abkürzungsverzeichnis | 14 |
| 1 Einleitung | 15 |
| 1.1 Einführung | 15 |
| 1.2 Anatomische Grundlagen | 18 |
| 1.2.1 Wirbelsäule..... | 18 |
| 1.2.2 Rückenmark | 23 |
| 1.3 Physiologische Grundlagen | 25 |
| 1.3.1 Wirbelsäule..... | 25 |
| 1.3.2 Rückenmark | 25 |
| 1.4 Erkrankungen der Wirbelsäule | 27 |
| 1.4.1 Trauma | 27 |
| 1.4.2 Entzündliche Veränderungen der Wirbelsäule..... | 28 |
| 1.4.3 Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule | 30 |
| 1.5 Diagnostik | 37 |
| 1.5.1 Anamnese | 37 |
| 1.5.2 Klinische Untersuchung | 37 |
| 1.5.3 Bildgebende Verfahren | 38 |
| 1.5.4 Infiltrationsdiagnostik | 40 |
| 1.6 Therapie | 45 |
| 1.6.1 Konservative Therapie | 45 |
| 1.6.2 Operative Therapie..... | 46 |
| 1.7 Fragestellung..... | 47 |
| 2. Material und Methoden | 48 |
| 2.1. Material..... | 48 |
| 2.1.1 Technische Ausstattung..... | 48 |
| 2.1.2 Software | 48 |

| | |
|--|---|
| 2.2 Methoden | 49 |
| 2.2.1 Studiendesign | 49 |
| 2.2.2 Messteilnehmer | 50 |
| 2.2.3 Patientenkollektiv | 51 |
| 2.2.4 Vergleichsmessung..... | 52 |
| 2.2.5 Infiltrationstechnik | 53 |
| 2.2.6 Messtechnik und Klassifizierungssystem..... | 53 |
| 2.2.7 Statistische Analyse..... | 64 |
| 3. Ergebnisse..... | 66 |
| 3.1 Demographische Daten..... | 66 |
| 3.2 Darstellung der einzelnen Segmenthöhen..... | 67 |
| 3.3 Übungsmessung | 69 |
| 3.3.1 Messergebnisse der Spinalkanalstenose vor/nach der Übung mit dem Experten | 69 |
| 3.3.2 Messergebnisse der Foramenstenose vor und nach der Übung mit den Experten | 78 |
| 3.4 Vergleichsmessung | 82 |
| 3.4.1 Korrelation Messparameter Spinalkanalstenose | 82 |
| 3.4.2 Korrelation Messparameter Foramenstenose | 91 |
| 3.5 Ergebnisse der Studienmessungen..... | 99 |
| 3.5.1 Ergebnisse bei der epiduralen Infiltration | 99 |
| 3.5.2 Ergebnisse bei der Facetteninfiltration..... | 108 |
| 4. Diskussion | 116 |
| 4.1 Übungs- und Vergleichsmessung | 117 |
| 4.2 Studienmessung | 124 |
| 5 Zusammenfassung | 130 |
| 6. Literaturverzeichnis | 132 |
| 7. Erklärung zum Eigenanteil | 140 |
| 8. Veröffentlichungen..... | 141 |
| Danksagung | 142 |
| Lebenslauf | Fehler! Textmarke nicht definiert. |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Anatomie der Wirbelsäule..... | 19 |
| Abbildung 3: Aufbau der Bandscheibe. | 22 |
| Abbildung 4: Querschnitt der Lendenwirbelsäule der Cauda equina auf Höhe des 2. LWK..... | 24 |
| Abbildung 5: Schematische Darstellung der degenerativen Wirbelsäulenveränderungen | 31 |
| Abbildung 6: Darstellung der LWS mittels MRT Diagnostik in T1 Wichtung | 32 |
| Abbildung 7: MRT Diagnostik der LWS (sagittaler Schnitt)..... | 34 |
| Abbildung 8: Schematische Darstellung der Einteilung der Spondylolisthese nach Meyerding..... | 36 |
| Abbildung 9: Darstellung der Infiltrationstechniken an der Lendenwirbelsäule | 42 |
| Abbildung 10: Aufbau der Studie..... | 49 |
| Abbildung 11: Sagittaler Durchmesser des Duralsackes auf unterschiedlichen Höhen. 54 | |
| Abbildung 12: Interlaminärer Abstand..... | 55 |
| Abbildung 13: Fläche des Duralsackes | 56 |
| Abbildung 17: Messung der posterioren Bandscheibenhöhe | 56 |
| Abbildung 14: Klassifikation der Spinalkanalstenose..... | 58 |
| Abbildung 15: Messung des Durchmessers des Foramen nervale | 59 |
| Abbildung 16: Messung der Querschnittsfläche des Foramen nervale | 60 |
| Abbildung 18: Schematische Darstellung des Foramen nervale und der anatomischen Nachbarstrukturen | 61 |
| Abbildung 19: Schematische Darstellung zur Klassifizierung der Foramenstenose nach Lee | 62 |
| Abbildung 20: Klassifikation der Facettengelenkdegeneration..... | 63 |
| Abbildung 21: Demographische Daten | 67 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 22: Darstellung der einzelnen Segmenthöhen | 68 |
| Abbildung 23: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 1 bei der Übungsmessung | 70 |
| Abbildung 24: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 2 bei der Übungsmessung | 71 |
| Abbildung 25: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 3 bei der Übungsmessung | 72 |
| Abbildung 26: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 4 bei der Übungsmessung | 73 |
| Abbildung 27: Interlaminärer Abstand bei der Übungsmessung | 74 |
| Abbildung 28: Fläche Duralsack axial bei der Übungsmessung..... | 75 |
| Abbildung 29: Posteriore Bandscheibenhöhe bei der Übungsmessung | 76 |
| Abbildung 30: Klassifikation Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Übungsmessung.. | 77 |
| Abbildung 31: Durchmesser des linken Foramen bei der Übungsmessung..... | 78 |
| Abbildung 32: Fläche des linken Foramens (Sipola) bei der Übungsmessung..... | 79 |
| Abbildung 33: Klassifikation Neuroforamenstenose (Lee) bei der Übungsmessung | 80 |
| Abbildung 34: Klassifikation Facettengelenkdegeneration (Weishaupt) bei der Übungsmessung..... | 81 |
| Abbildung 35: Sagittaler Durchmesser des Duralsack Höhe 1 bei der Vergleichsmessung..... | 83 |
| Abbildung 36: Sagittaler Durchmesser des Duralsack Höhe 2 bei der Vergleichsmessung..... | 84 |
| Abbildung 37: Sagittaler Durchmesser des Duralsacks Höhe 3 bei der Vergleichsmessung..... | 85 |
| Abbildung 38: Sagittaler Durchmesser des Duralsacks Höhe 4 bei der Vergleichsmessung..... | 86 |
| Abbildung 39: Interlaminärer Abstand bei der Vergleichsmessung | 87 |
| Abbildung 40: Fläche des Duralsackes bei der Vergleichsmessung | 88 |
| Abbildung 41: Posteriore Bandscheiben bei der Vergleichsmessung | 89 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 42: Klassifikation Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Vergleichsmessung | 90 |
| Abbildung 43: Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe bei der Vergleichsmessung..... | 92 |
| Abbildung 44: Durchmesser der Foramen (Beers) bei der Vergleichsmessung | 93 |
| Abbildung 45: Fläche der Foramen bei der Vergleichsmessung..... | 94 |
| Abbildung 46: Klassifikation der Neuroforamenstenose (Lee) bei der Vergleichsmessung..... | 96 |
| Abbildung 47: Klassifikation der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) bei der Vergleichsmessung..... | 97 |
| Abbildung 48: Intraartikuläre Flüssigkeit (Erguss)..... | 98 |
| Abbildung 49: Deskriptive Statistik epidurale Infiltration..... | 99 |
| Abbildung 50: Darstellung der sagittalen Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 101 |
| Abbildung 51: Darstellung des interlaminären Abstandes in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration | 102 |
| Abbildung 52: Darstellung der Duralsackflächen in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 102 |
| Abbildung 53: Darstellung der posterioren Bandscheibenhöhen in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 103 |
| Abbildung 54: Klassifikation der Spinalkanalstenose (Schizas) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 104 |
| Abbildung 55: Darstellung der Durchmesser der Foramen auf Höhe BS in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 104 |
| Abbildung 56: Darstellung der Durchmesser der Foramen (Beers) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 105 |
| Abbildung 57: Darstellung der gemessenen Flächen der Foramen (Sipola) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 58: Darstellung der Klassifikation der Foramen (Lee) in Bezug auf die Beschwerdensymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 106 |
| Abbildung 59: Darstellung der Klassifikation der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) in Bezug auf die Beschwerdensymptomatik bei der epiduralen Infiltration | 107 |
| Abbildung 60: Darstellung der Klassifikation der intraartikulären Flüssigkeit in Bezug auf die Beschwerdensymptomatik bei der epiduralen Infiltration..... | 107 |
| Abbildung 61: Darstellung der sagittalen Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 109 |
| Abbildung 62: Darstellung der transversalen Durchmesser in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung bei der Facetteninfiltration | 110 |
| Abbildung 63: Darstellung der Flächen der Duralsäcke in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung bei der Facetteninfiltration | 110 |
| Abbildung 64: Darstellung der posterioren Bandscheibenhöhe in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung bei der Facetteninfiltration | 111 |
| Abbildung 65: Klassifikation der Spinalkanalstenose (Schizas) in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung Facetteninfiltration | 111 |
| Abbildung 66: Darstellung der Durchmesser der Foramen auf Höhe BS in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 112 |
| Abbildung 67: Darstellung der Durchmesser der Foramen (Beers) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 113 |
| Abbildung 68: Darstellung der Fläche der Foramen (Sipola) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 113 |
| Abbildung 69: Darstellung der Klassifikation der Foramen (Lee) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 114 |
| Abbildung 70: Darstellungen der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 115 |
| Abbildung 71: Darstellung intraartikulären Flüssigkeit in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 115 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Die 5 Abschnitte der Wirbelsäule | 18 |
| Tabelle 2: Auflistung der verschieden verwendeten technischen Geräte | 48 |
| Tabelle 3: Inhaltsstoffe des applizierten Mischpräparates | 53 |
| Tabelle 4: Einteilung der Facettengelenkdegeneration nach Weißhaupt | 62 |
| Tabelle 5: Interpretation des Kappa Koeffizienten nach Landis und Koch | 64 |
| Tabelle 6: Demographische Daten | 66 |
| Tabelle 7: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 1 bei der Übungsmessung | 70 |
| Tabelle 8: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 2 bei der Übungsmessung | 71 |
| Tabelle 9: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 3 bei der Übungsmessung | 72 |
| Tabelle 10: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 4 bei der Übungsmessung | 73 |
| Tabelle 11: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des interlaminären Abstandes auf Höhe der Bandscheibe bei der Übungsmessung | 74 |
| Tabelle 12: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche des Duralsacks auf Höhe der Bandscheibe bei der Übungsmessung | 75 |
| Tabelle 13: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der posterioren Bandscheibenhöhe bei der Übungsmessung | 76 |
| Tabelle 14: Korrelation der qualitativen Beurteilung der Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Übungsmessung | 77 |
| Tabelle 15: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Durchmessers des linken Foramens bei der Übungsmessung | 78 |
| Tabelle 16: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche des linken Foramens (Sipola) bei der Übungsmessung | 79 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 17: Korrelation der Klassifikation der Neuroforamenstenose (Lee)..... | 80 |
| Tabelle 18: Korrelation der qualitativen Beurteilung der Facettengelenkdegeneration (Weishaupt)..... | 81 |
| Tabelle 19: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 1 bei der Vergleichsmessung | 83 |
| Tabelle 20: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 2 bei der Vergleichsmessung | 84 |
| Tabelle 21: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 3 bei der Vergleichsmessung | 85 |
| Tabelle 22: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 4 bei der Vergleichsmessung | 86 |
| Tabelle 23: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des interlaminären Abstandes bei der Vergleichsmessung | 87 |
| Tabelle 24: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche des Duralsacks bei der Vergleichsmessung | 88 |
| Tabelle 25: Intraklassenkorrelationskoeffizient der posterioren Bandscheibenhöhe bei der Vergleichsmessung..... | 89 |
| Tabelle 26: Korrelation der Klassifikation der Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Vergleichsmessung | 90 |
| Tabelle 27: Intraklassen-Korrelationskoeffizient Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe bei der Vergleichsmessung..... | 91 |
| Tabelle 28: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Durchmessers der Foramen (Beers) bei der Vergleichsmessung..... | 93 |
| Tabelle 29: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche der Foramen bei der Vergleichsmessung | 94 |
| Tabelle 30: Korrelation der Klassifikation der Neuroforamenstenose (Lee) bei der Vergleichsmessung | 95 |

| | |
|--|-----|
| Tabelle 31: Korrelation Klassifikation der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) bei der Vergleichsmessung..... | 97 |
| Tabelle 32: Korrelation intraartikuläre Flüssigkeit der Facettengelenke bei der Vergleichsmessung | 98 |
| Tabelle 33: Sagittale Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration | 100 |
| Tabelle 34 Sagittale Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration | 108 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|--------------------------------------|
| Abb. | Abbildung |
| BWK | Brustwirbelkörper |
| BWS | Brustwirbelsäule |
| bzw. | beziehungsweise |
| CT | Computertomografie |
| D | Durchmesser |
| Exp | Experte |
| HWK | Halswirbelkörper |
| HWS | Halswirbelsäule |
| ICC | Intraklassen-Korrelationskoeffizient |
| LA | Lokalanästhetikum |
| Lig. | Ligamentum |
| LWS | Lendenwirbelsäule |
| LWK | Lendenwirbelkörper |
| mm | Millimeter |
| MRT | Magnetoressonanztomografie |
| N. | Nervus (lat. Nerv) |
| NRS | Numerische Ratingskala |
| p | Signifikanzniveau |
| SWK | Sakralwirbelkörper |
| VL | Versuchsleiter |

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die folgende Dissertation befasst sich mit dem Thema der Schmerzreduktion bei degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen nach epiduraler Infiltration und Facettengelenksinfiltration. Mit Hilfe der Untersuchung von kernspintomographischen Bildern und der Bestimmung des Schmerzverlaufs vor und nach einer durchgeführten Infiltration wird untersucht, ob eine Schmerzlinderung nach einer Infiltration bei Patienten mit chronisch lumbalen Rückenschmerzen vorhersagbar ist. Hierfür wurden verschiedene Mess- und Klassifizierungstechniken für die Spinalkanalstenose und Facettengelenkdegeneration untersucht.

Der Rückenschmerz („low back pain“) zählt zu dem häufigsten Leitsymptom bei degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen und hat sich bei der westlichen Bevölkerung zu einem führenden Krankheitsbild entwickelt. Der Lumbalbereich der Wirbelsäule ist den alltäglichen Belastungen am stärksten ausgesetzt, weswegen degenerative Prozesse in dieser Region am häufigsten auftreten. In den Industrieländern leiden etwa 80-90 Prozent der Bevölkerung mindestens einmal in ihrem Leben an Rückenschmerzen (Gibson and Waddell 2007b, Loeser and Volinn 1991, Marschall et al. 2018, Schmidt et al. 2007). Studien aus verschiedenen Ländern zeigen einen Anstieg der Prävalenz des Krankheitsbildes, besonders des chronischen Rückenleidens (Palmer et al. 2000). Das Robert Koch-Institut konnte in einer Studie zeigen (GEDA 2009 und 2010), dass 2009 bis 2011 25% der Frauen und knapp 17% der Männer an chronischen Rückenschmerzen (Rückenschmerzen die mindestens 3 Monate andauern) litten. Dagegen lag 2003 die Prävalenz bei Frauen noch bei 21,6% und bei den Männern bei 15,5% (Neuhauser et al. 2005).

Patienten mit chronischen Rückenleiden haben oftmals einen hohen Verlust an Lebensqualität zu verzeichnen. Neben ausgeprägter Schonhaltung und Verlust der Beweglichkeit und Mobilität leiden die Patienten auch an psychischen Begleiterkrankungen, wie Depressionen. Aber auch die ökonomischen und

gesellschaftlichen Auswirkungen sind beträchtlich, da die Therapie von Wirbelsäulenerkrankungen zu den teuersten Behandlungen in Deutschland zählt. Rückenschmerzen waren 2015 die dritt häufigste gestellte Diagnose in deutschen Arztpraxen und verursachte 3% der krankheitsbedingten Gesamtkosten in Höhe von 10,93 Milliarden Euro, im Vergleich zu 9,24 Milliarden Euro im Jahr 2008 (Destatis 2017, RKI 2015). 85% der Kosten entfallen dabei auf Arbeits- und Produktionsausfälle. So werden in Deutschland Rückenschmerzen als zweithäufigste Begründung aller Krankschreibungen genannt (Marschall et al. 2018).

Aus diesen Gründen ist die Diagnostik mit individueller Therapieentscheidung von sehr großer Bedeutung. Wegweisend für die Diagnose bei chronischen Rückenleiden sind die geschilderten Symptome und eine gründliche klinische Untersuchung. Bildgebende Untersuchungsverfahren, vor allem die Magnet-Resonanz-Tomografie (MRT), kommen bei der Indikationsstellung immer mehr zum Einsatz. In einer durchgeführten Studie der Bertelsmann Stiftung konnte gezeigt werden, dass die Häufigkeit der MRT-Aufnahmen bei Patienten mit Rückenleiden von 2009 bis 2015 um 34 Prozent gestiegen sind (Andersohn and Walker 2016). Ort und Ausmaß der Beschwerden anhand der bildgebenden Verfahren zu diagnostizieren, gestaltet sich meist schwierig, da die Schmerzursache aufgrund der multisegmentalen pathologischen Veränderungen nicht leicht zu stellen ist. In den letzten Jahren haben sich einige Arbeiten mit der Zuverlässigkeit solcher MRT-Befunde bei degenerativen lumbalen Wirbelsäulenerkrankungen befasst. Insgesamt ist aus den Studien eine mäßige bis sehr gute Übereinstimmung bei der Beurteilung von MRT-Bildern zu verzeichnen. Bildgebungen sollten demnach nicht als alleinige Diagnosestellung herangezogen werden. Zudem betont dies die Notwendigkeit eines standardisierten etablierten Bewertungsschemas für radiologische Befunde der degenerativen Erkrankungen (Carrino et al. 2009, Fu et al. 2014). Die Literatur bietet zahlreiche verschiedene Mess- und Klassifizierungssysteme lumbaler MRT Aufnahmen für die Beurteilung degenerativer Erkrankungen der Lendenwirbelsäule. Diese lassen sich in quantitative und qualitative Messparameter einteilen. Allerdings fehlt ein akzeptiertes einheitliches Bewertungssystem. Damit wird die Vergleichbarkeit von Studien, die unterschiedliche Messparameter verwenden, stark eingeschränkt. Unpräzise Diagnosekriterien begrenzen die Verlässlichkeit und klinische Relevanz solcher Messsysteme. In der Literatur herrscht

zudem Unstimmigkeit über den Zusammenhang zwischen den radiologischen Befunden und den klinischen Symptomen.

Mit zunehmendem Wunsch nach einer zufriedenstellenden Lebensqualität der älteren Bevölkerung und finanziellen Druck des Gesundheitssystem nimmt die Zahl der durchgeführten Wirbelsäulenoperationen zu (Deyo et al. 2005). Eine absolute Operationsindikation ist nur selten vorhanden. Um die Schmerzursache genau identifizieren zu können macht man sich, insbesondere bei Patienten mit multisegmentalen degenerativen Wirbelsäulenveränderungen, die Anwendung von präoperativen lokalen Infiltrationen zunutze.

1.2 Anatomische Grundlagen

1.2.1 Wirbelsäule

Die Wirbelsäule bildet im menschlichen Körper den zentralen Bestandteil des Achsenskeletts. Sie umgibt schützend das Rückenmark. Die Wirbelsäule wird in fünf Abschnitte unterteilt. Angefangen von der Halswirbelsäule (HWS), Brustwirbelsäule (BWS) und Lendenwirbelsäule (LWS), gefolgt von Kreuzbein (Os sacrum) und Steißbein (Os coccygis). Die Wirbelsäule besteht prinzipiell aus 32 bis 34 Wirbeln (Variation Steißbein) und 23 Bewegungssegmenten. Diese Segmente bestehen jeweils aus zwei aufeinander folgenden Wirbeln, einer dazwischenliegenden Bandscheibe, sowie den stabilisierenden Bändern. Je nach Wirbelsäulenabschnitt unterscheidet sich die Anatomie der Wirbel und damit die Beweglichkeit des Segmentes (Aumüller et al. 2017, Schiebler and Korf 2007).

Charakteristisch für die Wirbelsäule ist ihre Doppel-S-Form, aufgrund zweier aufeinander folgender Krümmungen. In der Sagittalebene erkennbar, bezeichnet man eine Lordose als eine nach ventral konvexe Krümmung und eine Kyphose als eine nach ventral konkave Krümmung (Aumüller et al. 2017, Rauber and Kopsch 1987, Schiebler and Korf 2007).

Tabelle 1: Die 5 Abschnitte der Wirbelsäule

| Wirbelsäulenabschnitt | Anzahl der Wirbel | Bezeichnung | Krümmung |
|-------------------------|-------------------|----------------|----------|
| Halswirbelsäule | 7 Halswirbel | HWK 1 - HWK 7 | Lordose |
| Brustwirbelsäule | 12 Brustwirbel | BWK 1 - BWK 12 | Kyphose |
| Lendenwirbelsäule | 5 Lendenwirbel | LWK 1 – LWK 5 | Lordose |
| Kreuzbein (Os sacrum) | 5 Kreuzwirbel | SWK 1 – SWK 5 | Kyphose |
| Steißbein (Os coccygis) | 3-5 Steißwirbel | - | - |

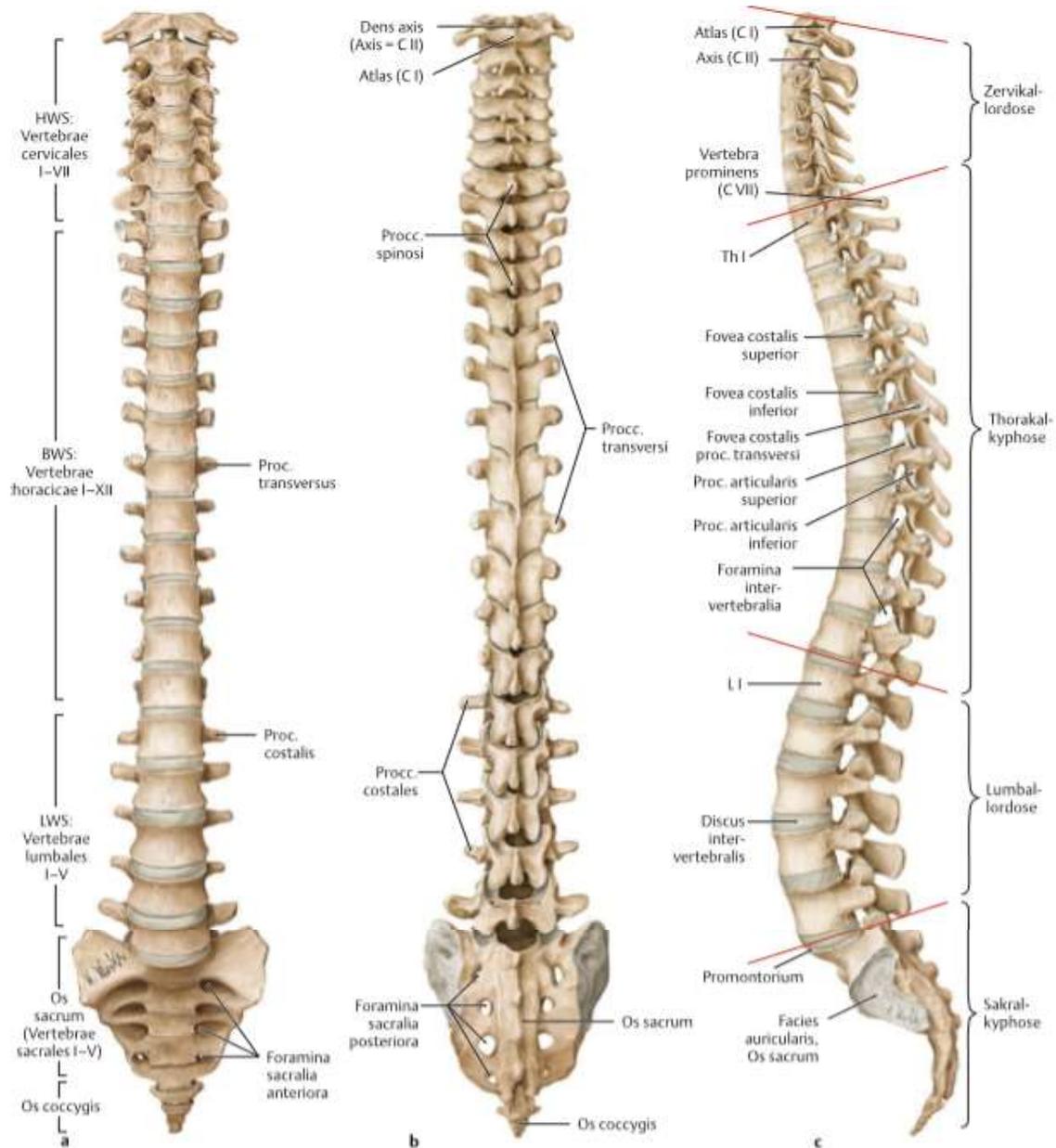


Abbildung 1: Anatomie der Wirbelsäule

Ansicht der Wirbelsäule a: von ventral, b: von dorsal, c: von links lateral (Schünke et al. 2014) mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

1.2.1.1 Wirbelkörper

Zu der Grundform eines jeden Wirbels, mit Ausnahme des Atlas, zählt ein Wirbelkörper (*Corpus vertebrae*), ein Wirbelbogen (*Arcus vertebrae*) mit seinen Wirbelbogenfortsätzen, sowie das Wirbelloch (*Foramen vertebrale*) (Aumüller et al. 2017). Die 7 Wirbelfortsätze setzen sich aus einem Dornfortsatz (*Proc. spinosus*), zwei Querfortsätzen (*Proc. transversi/costales*), sowie vier Gelenkfortsätzen (*Procc. articulares*) zusammen (Schünke et al. 2014). An den Querfortsätzen setzen sowohl Muskeln als auch Bänder an. Als tragendes Element der Wirbelsäule und entsprechend der nach kaudal zunehmenden Last, nimmt die Größe der Wirbelkörper von kranial nach kaudal zu. Somit sind die Wirbelkörper der HWS am kleinsten und werden nach kaudal immer größer. Der Wirbelbogen (*Arcus vertebrae*) bildet gemeinsam mit dem Wirbelkörper (*Corpus vertebrae*) das *Foramen vertebrale*. Die Gesamtheit aller *Foramen vertebrale* bilden den Wirbelkanal (*Canalis vertebralis*), welcher schützend das darin verlaufende Rückenmark umgibt. Betrachtet man die Wirbel von lateral, so lassen sich zwischen je zwei Wirbeln und deren Bandscheibe ein *Foramen intervertebrale* erkennen. Über das *Foramen intervertebrale* verlässt der jeweilige Spinalnerv des Segments den Wirbelkanal. Jeder Wirbelkörper besitzt kraniale und kaudale Gelenkfortsätze. (Aumüller et al. 2017, Rauber and Kopsch 1987, Schiebler and Korf 2007).

Die 5 Lendenwirbelkörper der LWS sind im Vergleich zu den Wirbelkörpern im Hals- und Brustbereich kräftiger. Der *Corpus* besitzt einen bohnenförmigen Querschnitt. Durch die überwiegend sagittal eingestellten Gelenkflächen ist die LWS in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt. Besonders zeigt sich dies bei Rotationsbewegungen (Aumüller et al. 2017). Der *Canalis vertebralis* ist verhältnismäßig schmal und besitzt einen dreieckigen Querschnitt. Dagegen sind die *Foramina intervertebralia* im Verhältnis zu den kranial gelegenen Wirbeln relativ groß (Aumüller et al. 2017, Graichen and Putz 1999, Schünke et al. 2014).

1.2.1.2 Gelenke der Wirbelsäule

Die einzelnen Wirbel sind über verschiedene Bandapparate und Gelenke miteinander verbunden. Die kranialen Gelenkfortsätze eines Wirbels bilden mit den kaudalen Gelenkfortsätzen des darüber liegenden Wirbels echte Gelenke, die sogenannten Facettengelenke (Wirbelbogengelenke oder *Articulationes zygapophysiales*). Über die Facettengelenke können Bewegungen über drei Achsen ausgeführt werden. Neben den echten Gelenken, wie den Facettengelenken und den zwei Kopfgelenken, gibt es auch unechte Gelenke (Aumüller et al. 2017, Graichen and Putz 1999, Schünke 2000). Die anatomische Einheit, welche zwei benachbarte Wirbelkörper verbindet, nennt man *Symphysis intervertebralis*. Sie besteht aus einer Bandscheibe, dem *Ligamentum longitudinale anterius* und dem *Ligamentum longitudinale posterius*. Die Bandscheiben bilden Synarthrosen, bzw. durch ihre knorpeligen Deckplatten sogenannte Synchrondrosen. Die Synarthrosen sind keine echten Gelenke, denn sie besitzen weder ein Gelenkspalt noch eine Gelenkkapsel (Fick 1904).

1.2.1.3 Bandscheibe

Die Bandscheibe liegt zwischen zwei Wirbelkörpern und bildet gemeinsam mit ihnen ein Bewegungssegment. Aufgrund der anatomischen Gegebenheiten wirkt die Bandscheibe als sogenannter Stoßdämpfer. Dieser kann die axiale Belastung auf die Wirbelkörper gleichmäßig verteilen. Der zentral gelegene *Nucleus pulposus* (Gallertkern), der *Anulus fibrosus* (Faserring) und die knorpelige Endplatte bilden die Grundbausteine der Bandscheibe (Aumüller et al. 2017, Battie and Videman 2006, Grignon et al. 2000). Diese setzen sich aus verschiedenen Kollagenfasern und Proteoglykanen zusammen. Die Proteoglykane verknüpfen die kollagenen Fasern zu einem Netz. Dadurch kann die Zugbelastung, sowie die axiale Belastung gleichmäßig auf die Bandscheibe verteilt werden. Die Endplatte besteht zudem aus hyalinem Knorpel und enthält kleine Netzwerke von Blutgefäßen. Durch diese Gefäße kann eine Versorgung der Bandscheibe durch eine metabolische Diffusion erfolgen. Der *Nucleus pulposus* liegt in der Mitte und wird von dem *Anulus fibrosus* umgeben (Aumüller et al. 2017, Feng et al. 2006, Grignon et al. 2000).

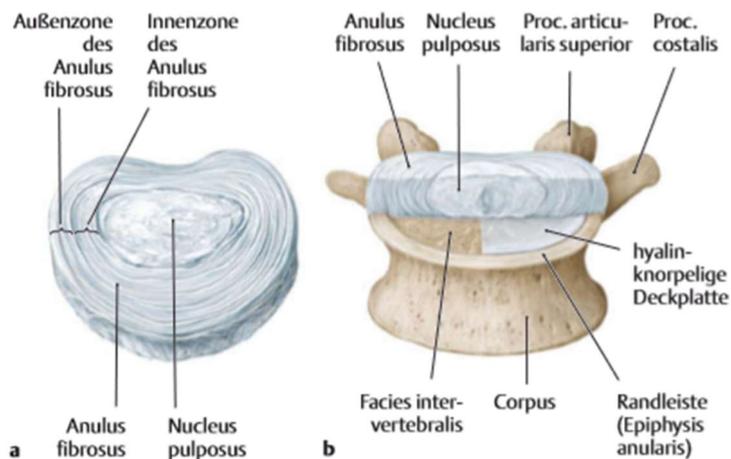


Abbildung 2: Aufbau der Bandscheibe

Der Anulus fibrosus lässt sich in eine Außen- und eine Innenzone einteilen. In der Mitte befindet sich der Nucleus pulposus. a: Ansicht der Bandscheibe von kranial, b: mit Wirbelkörper von kranial-ventral (Schünke et al. 2014) mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

Aufgrund der ventral konvexen Krümmung befindet sich beim Stehen eine asymmetrische Flüssigkeitsverteilung in den lumbalen Bandscheiben. Daher kommt es bei vermehrter Belastung auf die Bandscheibe zu einem Flüssigkeitsverlust im Nucleus pulposus. Hieraus resultiert eine Abflachung um bis zu 1mm der Bandscheibenhöhe im Tagesverlauf. Dabei kommt es physiologisch zu einer Verminderung der Körpergröße um bis zu 2,5cm. Durch die nächtliche Rückverlagerung der Flüssigkeit wird die Körpergröße ausgeglichen (Aumüller et al. 2017).

1.2.1.4 Muskulatur und Bandapparat der Wirbelsäule

Der Bandapparat der Wirbelsäule stabilisiert zusammen mit der Rückenmuskulatur die Wirbelsäule. Die Muskulatur der Wirbelsäule wird topografisch unterteilt in die kurze Nackenmuskulatur, sowie die angrenzende Rückenmuskulatur. Aufgrund der unterschiedlichen Entstehung der Muskeln in der Embryonalentwicklung wird zwischen der autochthonen und der nicht-autochthonen Rückenmuskulatur unterschieden. Die autochthone Rückenmuskulatur entsteht während der Embryonalentwicklung direkt vor Ort und liegt der Wirbelsäule an. Die nicht-autochthone Rückenmuskulatur wird als eingewanderte Rückenmuskulatur bezeichnet. Sie liegt der autochthonen

Rückenmuskulatur oberflächlich an. Neben der Bewegung des Rumpfes ist die Rückenmuskulatur auch für die Stabilität der Wirbelsäule verantwortlich. Besonders die kurzen Muskeln der autochthonen Rückenmuskulatur sind für die statische Funktion essentiell, da sie die einzelnen Wirbel untereinander verbindet. Durch diesen festen Verbund wird einer Deformation entgegen gewirkt (Schiebler and Korf 2007).

1.2.2 Rückenmark

Als Teil des zentralen Nervensystems bildet das Rückenmark funktionell eine Verbindung zwischen Gehirn und Körperperipherie. Nach dem Austritt aus dem Schädel über das Foramen magnum liegt das Rückenmark geschützt im Canalis vertebralis. Die Spinalnerven, die jeweils aus ihrem Rückenmarkssegment entspringen, verlassen den Wirbelkörper über die Foramina intervertebralia. Aufgrund eines ungleichen Längenwachstums endet das Rückenmark bei einem erwachsenen Menschen bereits auf Höhe des ersten oder zweiten Lendenwirbels. Die lumbalen und sakralen Nervenwurzeln müssen daher zunächst weiter im Wirbelkanal nach distal zu ihren entsprechenden Foramina intervertebralia ziehen. Dadurch entsteht ein Nervenfasergeflecht, das als Cauda equina („Pferdeschwanz“) bezeichnet wird (Trepel 2017). Im Bereich der Wirbelsäule wird das Rückenmark dorsal von dem jeweiligen Wirbelbogen, sowie von den Ligamenta flava begrenzt. Ventral begrenzen der Wirbelkörper und die Bandscheibe den knöchernen Wirbelkanal (Canalis vertebralis). Im lumbalen Wirbelkanal befinden sich neben den Nervenwurzeln der Duralsack und das peridurale Gewebe. Die Nervenwurzeln werden von dem periduralen Gewebe umhüllt, das aus Venen und Fettgewebe besteht (Schünke et al. 2015).

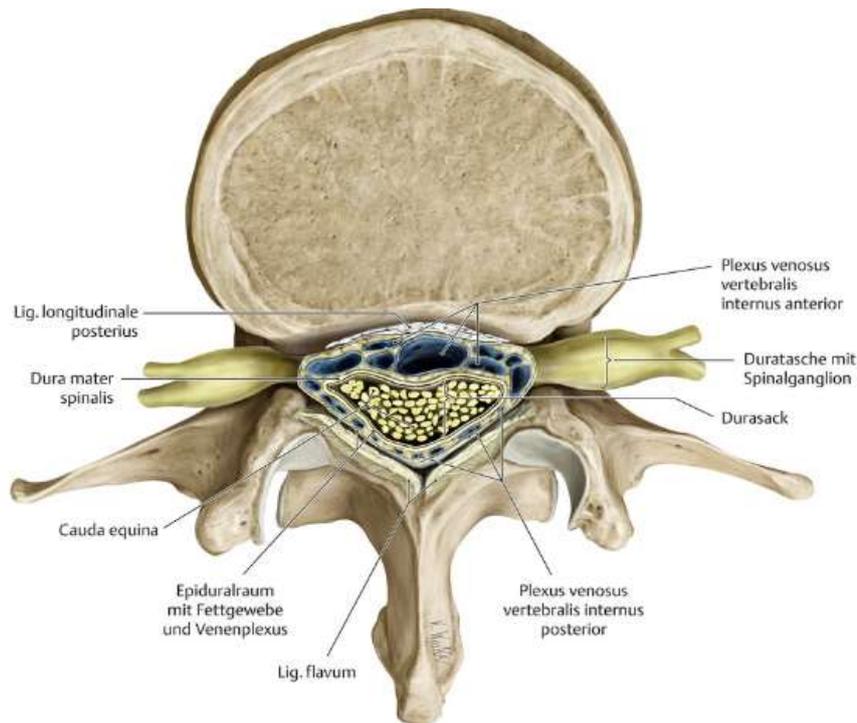


Abbildung 3: Querschnitt der Lendenwirbelsäule der Cauda equina auf Höhe des 2. LWK

Da das Rückenmark auf Höhe des 1. und 2. LWK endet, ist der Duralsack mit der Cauda equina dargestellt. Hier ist der Epiduralraum mit Fettgewebe und Venenplexus ausgefüllt (Schünke et al. 2014) mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

Das Rückenmark ist wie das Gehirn von drei Häuten, den sogenannten Meningen, umgeben. Sie sind für die Versorgung und den Schutz des Rückenmarks verantwortlich. Zu den drei Meningen gehört die harte Rückenmarkshaut (Dura mater), sowie die beiden weichen Rückenmarkshäute (Arachnoidea mater und Pia mater). Die Dura mater besteht aus einem straffen, faserreichen Bindegewebe. Sie unterteilt sich in zwei Blätter, dem Stratum periostale, sowie dem Stratum meningeale. Zwischen den beiden Blättern befindet sich der sogenannte Epiduralraum. Das Stratum periostale liegt dem Periost direkt an und ist mit diesem verwachsen. Das Stratum meningeale liegt der Arachnoidea mater an. Die Arachnoidea besteht aus lockerem Bindegewebe. Sie ist sehr dünn und hat ein spinnennetzähnliches Aussehen. Die Pia mater liegt dem Rückenmark direkt an. Beide weichen Rückenmarkshäute sind über einen Hohlraum (Subarachnoidalraum), der mit Liquor gefüllt ist, voneinander getrennt (Trepel 2017). Im Querschnitt zeigt sich das Rückenmark mit einer schmetterlingsförmigen grauen Struktur ummantelt von einer weißen Substanz. Die Zellkörper der Nervenzellen liegen in der grauen Substanz. Die weiße Substanz beherbergt die Nervenfasern.

1.3 Physiologische Grundlagen

1.3.1 Wirbelsäule

Die Wirbelsäule erfüllt sowohl statische, als auch dynamische Funktionen. Als Stützgerüst dient sie der Aufrichtung und ermöglicht über ihre Doppel-S-Form einen aufrechten Gang. Zusätzlich verleiht die Wirbelsäule dem Rumpf Stabilität (Eckardt 2011). Über die Krümmungen der Wirbelsäule können axiale Belastungen und Erschütterungen besser abgedämpft werden. Die Lordose und Kyphose dienen hierbei als „Sprungfedern“ des Achsenskeletts und schützen insbesondere das Gehirn vor Verletzungen beispielsweise beim Springen oder Laufen (Rössler and Rüther 2007). Des Weiteren schützt die Wirbelsäule das im Canalis vertebralis gelegene Rückenmark. Neben den statischen Funktionen gewährleistet sie ein hohes Maß an Beweglichkeit. Aufgrund der morphologischen Gegebenheiten der Bewegungssegmente sind grundsätzlich Bewegungen um drei Achsen möglich (Niethard et al. 2017):

- Ventralflexion / Dorsalextension von 245°
- Lateralflexion von 160°
- Rotation von 210°

Die anatomische Form der Wirbelkörper, das Vorhandensein einer Bandscheibe, sowie der unterschiedlich ausgeprägte Bandapparat unterscheiden sich je nach Wirbelsäulensegment. Somit variiert der Umfang der Drehbewegung je nach Wirbelsäulenabschnitt (Aumüller et al. 2017).

1.3.2 Rückenmark

Über auf- und absteigende Nervenbahnen, bildet die weiße Substanz des Rückenmarks eine Schaltstelle zwischen Körperperipherie und Gehirn. Sensible Bahnen (aufsteigend) leiten Informationen aus der Peripherie über das Rückenmark zum Gehirn. Die motorischen Bahnen verlaufen dagegen absteigend und werden in Pyramidenbahnen und extrapyramidalen Bahnen unterteilt. Auf der anderen Seite verbinden die Nervenbahnen auch verschiedene Rückenmarkssegmente untereinander und sind für die Entstehung des

spinalen Reflexes verantwortlich. Dieser Reflex ist eine unwillkürliche stereotype Reizantwort, deren Verbindung und Verschaltung durch das Rückenmark erfolgt (Aumüller et al. 2017).

1.4 Erkrankungen der Wirbelsäule

1.4.1 Trauma

Verletzungen an der Wirbelsäule lassen sich auf unterschiedlichste Krafteinwirkungen zurückführen. Die häufigste Ursache von HWS Verletzungen ist ein indirektes Trauma. Diese Verletzungen zeigen sich typischerweise nach einem Verkehrsunfall als Folge einer axialen Stauchung der Wirbelsäule. Direkte Traumata sind größtenteils für Frakturen im Bereich der Wirbelsäule verantwortlich. (Börm et al. 2017). Minderungen der Knochensubstanz, wie sie etwa bei der Osteoporose oder bei einem Tumor bestehen, können zu pathologischen Frakturen führen. Diese Frakturen können nach geringer Krafteinwirkung oder sogar ohne Krafteinwirkung (spontan) auftreten. Neben der zugrunde liegenden Ursache bestimmen die biomechanischen Eigenschaften der Wirbelsäule, wie beispielsweise das betroffene Wirbelsäulensegment oder die bestehende degenerative Veränderung, die Morphologie der Fraktur (Roaf 1960).

Klinische Anzeichen einer Wirbelsäulenverletzung sind lokaler Druck- und Stauchungsschmerz. Des Weiteren können Fehlstellungen, tastbare Stufen an der Dornfortsatzreihe, sowie eine neurologische Symptomatik auftreten (Scharf et al. 2011). Ein entscheidender Faktor in der Diagnostik und Therapie ist die Stabilität der Fraktur. Es existieren verschiedene Klassifikationen von Wirbelsäulenfrakturen. Das vereinfachte Drei-Säulen-Konzept nach Denis unterteilt die Wirbelsäule je nach Lokalisation der Fraktur in drei Abschnitte. Frakturen der mittleren und hinteren Säule sind stets als instabil zu werten. Frakturen der vorderen Säule werden als stabil angesehen. Die AO-Klassifikation nach Magerl berücksichtigt den Unfallmechanismus mit den einwirkenden Kräften (Kompressions-, Distraktions- und Translations-/Rotationskräfte), die typische Morphologie der Wirbelkörper, Bandscheibe und Bandapparat, sowie die Stabilität.

Die Frakturen werden nach dem AO-System in je drei zusätzliche Untergruppen eingeteilt (Magerl et al. 1994). Diese Einteilung der Verletzung ist hierbei Grundlage für die weitere Behandlung. Instabile oder offene Wirbelsäulenverletzungen werden überwiegend operativ versorgt, ebenso Wirbelsäulenverletzungen mit Rückenmarksbeteiligung (Börm et al. 2017).

1.4.2 Entzündliche Veränderungen der Wirbelsäule

Bei den entzündlichen Erkrankungen der Wirbelsäule unterscheidet man zwischen infektiösen und nicht-infektiösen Ursachen.

1.4.2.1 Infektiöse Erkrankungen der Wirbelsäule

Die Spondylitis kann sowohl eine aseptische, als auch eine septische (infektiöse) Ursache haben (Ahlhelm et al. 2006). Die septische Spondylitis ist definiert als eine primäre Osteomyelitis des Wirbelkörpers. Aufgrund der arteriellen Versorgung der Wirbelkörper kommt es zunächst zu einer Bakteriämie in den Endplatten der Wirbelkörper. Die dadurch verursachte Nekrose führt zur Ausbreitung der Infektion auf die angrenzende Bandscheibe (Börm et al. 2017). Eine Osteomyelitis kann generell gesehen durch hämatogene Ausbreitung oder durch iatrogene Keimstreuung, beispielsweise durch kontaminierte Epiduralanästhesie, entstehen (Härle 1989).

Eine Spondylodiszitis wird als eine infektiöse Entzündung der Bandscheibe und der angrenzenden Wirbelkörper bezeichnet. Sie entsteht hauptsächlich durch arterielle hämatogene Streuung. Die Bandscheibe bildet hier den Ursprung der Entzündung und greift sekundär auf die angrenzenden Wirbelkörper über (Börm et al. 2017, Cramer et al. 2003, Michiels and Jäger 2017). Zum Zeitpunkt der Diagnosestellung liegt meist eine Entzündung der Bandscheibe und der benachbarten Wirbelkörper vor. Aufgrund dessen ist oft nicht zu klären, ob die Entzündung primär vom Wirbelkörper (Krzysiek et al.) oder von der Bandscheibe (Diszitis) ausging (Börm et al. 2017, Cramer et al. 2003). Im Folgenden wird dementsprechend von der Spondylodiszitis als die infektiöse Erkrankung der Wirbelsäule gesprochen. Die ursächlichen Erreger sind häufig Bakterien, selten Pilze oder Parasiten (Börm et al. 2017, Gouliouris et al. 2010, Kehrer et al. 2014). Man unterscheidet einen akuten, subakuten und chronischen Verlauf. Bei einem akuten und fulminanten Verlauf kann es zu Abszessbildung kommen. Dadurch können auch neurologische Ausfälle auftreten (Ahlhelm et al. 2006, Börm et al. 2017, Cramer et al. 2003). Hämatogene Entzündungen können in der Regel konservativ mit einer antibiotischen Behandlung und Ruhigstellung des betroffenen Wirbelkörpers behandelt werden. Bei Abszessbildungen mit schweren neurologischen Defiziten ist eine operative Sanierung indiziert (Börm et al. 2017).

1.4.2.2 Nicht-infektiöse Erkrankungen der Wirbelsäule

Bei einem Großteil der nicht-infektiösen Erkrankungen an der Wirbelsäule liegen rheumatische Ursachen zugrunde. Bei den entzündlich-rheumatischen Erkrankungen handelt es sich hauptsächlich um chronische Erkrankungen, die durch ihren dumpfen, fließenden Schmerz charakterisiert sind. Sie gehen mit Entzündungen der Stütz- und Bewegungsorgane, einschließlich des Bindegewebes, einher. Einteilen kann man diese rheumatisch-entzündlichen Erkrankungen in 3 Hauptgruppen (Arnett et al. 1988, Wasmus et al. 1989, Zink et al. 2010):

- Entzündliche Gelenkerkrankung z.B. Rheumatoide Arthritis
- Entzündliche Erkrankungen der Wirbelsäule (Spondylarthritiden) z.B. Ankylosierende Spondylitis
- Entzündlich-rheumatische Erkrankungen der Gefäße und des Bindegewebes

Bei der rheumatoiden Arthritis handelt es sich um eine systemische Autoimmunerkrankung mit chronisch entzündlichem Befall der Gelenke. Die Zerstörung des Knorpels und der angrenzenden Knochen resultiert aus der chronischen Entzündung der Gelenkschleimhaut. Die Patienten leiden unter chronischen Schmerzen, die im Krankheitsverlauf eine körperliche Funktionseinschränkung zur Folge hat. Bei unzureichender Behandlung kann es in fortgeschrittenen Stadien zu einer vollständigen Zerstörung des Gelenkknorpels kommen. Daraus können Fehlstellungen und Funktionsausfälle der betroffenen Gelenken resultieren. Die rheumatoide Arthritis manifestiert sich an der Wirbelsäule hauptsächlich an der HWS (Börm et al. 2017, Zink et al. 2010).

Die ankylosierende Spondylitis (Morbus Bechterew) ist eine chronisch-entzündliche Erkrankung und gehört zu den Spondyloarthritiden. Das häufigste betroffene Gelenk dieser Erkrankung ist das Iliosakralgelenk. Die Patienten leiden unter schleichend einsetzenden Rückenschmerzen, die charakteristischerweise über Nacht anhalten. Der Begriff „ankylosierend“ (zur knöchernen Gelenkversteifung führend) bezeichnet, die mit der Erkrankung einhergehende fortschreitende Versteifung der Wirbelsäule (Dougados and Baeten 2011, Dougados et al. 1991). Die ankylosierende Spondylitis zeigt eine erbliche Komponente. 90-95% der Betroffenen sind HLA-B27 positiv (Hammer et al. 1990).

1.4.3 Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule

Mit zunehmendem Alter kommt es zu physiologischen Veränderungen im menschlichen Körper. Die Degeneration an der Wirbelsäule beginnt bereits im Alter von 20 Jahren. Dabei beeinflussen sich die Degenerationsphänomene der einzelnen Wirbelsäulenstrukturen (Wirbelkörper, Bandscheibe, Facettengelenke und der Lig. flava) häufig gegenseitig (Krämer et al. 2013).

Die lumbalen Wirbelsäulensegmente sind höheren axialen Belastungen ausgesetzt als die der kranialen Segmente. Aufgrund dessen sind die degenerativen Veränderungen der kaudalen Bandscheiben im lumbalen Wirbelsäulenbereich meist weiter fortgeschritten. Verschiedene Einflussfaktoren wie Alter, Übergewicht und genetische Faktoren spielen eine entscheidende Rolle bei der Entstehung und Fortschreitung der degenerativen Veränderungen. Ausschlaggebend hierfür ist die resultierende Avaskularität durch die Zerstörung des versorgenden Kapillarnetzes (Hassett et al. 2003). Die degenerativen Veränderungen der WS sind ein Prozess, der sich oft über mehrere Segmente erstreckt. An erster Stelle des Degenerationsprozesses steht die Bandscheibe. Durch den Wasserverlust der Bandscheibe aufgrund verschiedener Faktoren (u.a. die Veränderung der Zusammensetzung kollagenen Fasern) verliert die Bandscheibe an Elastizität und Höhe. Die ligamentäre Grundspannung geht verloren und die Bandscheibe wird instabil (Börm et al. 2017, Mayer and Heider 2016a). Durch die vermehrte Instabilität der Bewegungssegmente kommt es zu einer deutlichen Mehrbelastung der Facettengelenke. Dies führt in der Folge zu Verschleißerscheinungen an den Facettengelenken (Facettengelenksarthrose) und Bildung von knöchernen Anbauten. Zudem kann es zu einer Hypertrophie der Gelenkkapsel mit raumfordernden Gelenkzysten kommen. Durch die Größenzunahme werden benachbarte Strukturen verdrängt und eingeengt. Um die Instabilität des Bewegungssegments zu kompensieren kommt es zur Bildung von knöchernen Anbauten am gesamten Wirbel (Osteophytenbildung), sowie Randzacken an den Wirbelkörperändern (Spondylophyten) (Battie et al. 2009, Börm et al. 2017, Colombier et al. 2014). Die Folge der Segmentdegeneration ist die Hypertrophie aller Ligamente, insbesondere des Ligamentum flavum (Richard et al. 2005). Dadurch kommt es zu einer Vorwölbung des Lig. Flavum und der Verringerung des interlaminären Abstandes. Das Fortschreiten der degenerativen Veränderungen kann zu einer

degenerativen Spondylolisthesis führen. Durch das degenerative Wirbelgleiten kann der Wirbelkanal zusätzlich eingeengt werden. Die Facettengelenksarthrose, Hypertrophie der Ligg. flava, sowie die Bandscheibenprotrusion führen letztendlich zum Krankheitsbild der Spinalkanalstenose (Genevay and Atlas 2010).

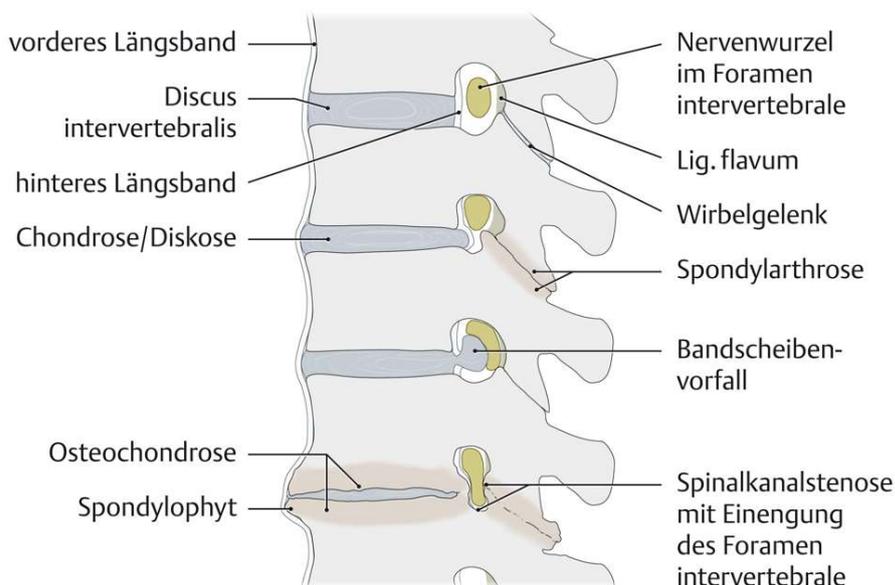


Abbildung 4: Schematische Darstellung der degenerativen Wirbelsäulenveränderungen

(Schünke et al. 2014) mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

1.4.3.1 Lumbaler Bandscheibenvorfall

Die Ursachen des lumbalen Bandscheibenvorfalles sind noch nicht eindeutig geklärt. Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind degenerative Veränderungen der Bandscheibe eine der Hauptursachen für das Entstehen eines lumbalen Bandscheibenvorfalles (Awad and Moskvich 2006). Traumatische Bandscheibenvorfälle von zuvor gesunden Bandscheiben sind eine Ausnahme (Greitemann and Stein 2014). Durch die Rissbildung im Anulus fibrosus kann es zu einem Vorwölben von Gewebe des Nucleus pulposus kommen, was als Diskusprotrusion bezeichnet wird (Börm et al. 2017, Krämer et al. 2013, Mayer and Heider 2016a). Begünstigt wird dies durch die Bildung von Hohlräumen und der mit zunehmendem Alter beginnenden Zystenbildung im Anulus fibrosus (Gibson and Waddell 2007b). Tritt ein Teil des Nucleus pulposus aus dem Anulus fibrosus aus, bezeichnet man dies als Diskusprolaps oder auch umgangssprachlich als Bandscheibenvorfall. In den meisten Fällen (ca. 90%) tritt das Gewebe am hinteren

Längsband (Lig. longitudinale posterior) aus. Bei einem sequestrierten Prolaps befindet sich ein Teil des Nucleus im Wirbelkanal und hat keinen Kontakt zur ursprünglichen Bandscheibe (Krämer et al. 2013, Mayer and Heider 2016a).

Am häufigsten sind die Segmente LWK 3/4, LWK 4/5 und LWK 5 / SWK 1 betroffen.

Die klassische Symptomatik des lumbalen Bandscheibenvorfalls resultiert durch die Kompression der Spinalnerven und kann folgende Komponenten beinhalten:

- Lumbalgie (Schmerzen des unteren Rückens)
- Radikuläres Schmerzsyndrom
- Mono- bzw. polysegmentale neurologische Funktionsstörung

Kommt es neben den ausstrahlenden Schmerzen in die Beine zu Kribbelparästhesien des entsprechenden Dermatoms, spricht man von einem radikulären Schmerzsyndrom (Börm et al. 2017). Mit fortschreitender Schwere der Erkrankung kann es zu neurologischen Symptomen wie Reflexunterschiede, Sensibilitätsstörungen und schließlich motorischen Ausfällen kommen (Börm et al. 2017, Krämer et al. 2013). Eine ausführliche Diagnostik mit klinisch-neurologischer Untersuchung und bildgebender Diagnostik ist therapieentscheidend. Etwa 80% der symptomatischen Bandscheibenvorfälle können durch konservative Maßnahmen behandelt werden, weshalb eine nicht-chirurgische Behandlung vorzuziehen ist (Gibson and Waddell 2007b, Lurie et al. 2014, Mayer and Heider 2016b). Die Indikation für eine Operation besteht bei einer Notfallindikation wie dem Cauda-Syndrom und bei progredienten motorischen Ausfällen (Kraftgrad 3/5 oder schlechter) (Börm et al. 2017, Gibson and Waddell 2007a).

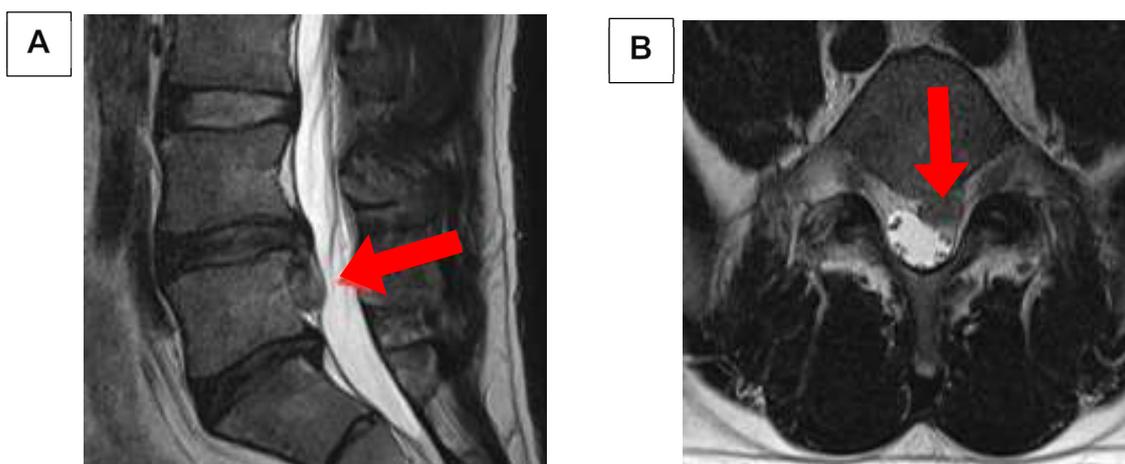


Abbildung 5: Darstellung der LWS mittels MRT Diagnostik in T1 Wichtung

Es zeigt sich ein Bandscheibenvorfall auf Höhe LWK 5/ SWK 1 rechtsseitig. A in sagittaler Schicht, B in axialer Schicht.

1.4.3.2 Lumbalspinalkanalstenose

Der Begriff degenerative Spinalkanalstenose lässt sich klinisch definieren als eine umschriebene ossäre und/oder disko-ligamentäre Einengung des Spinalkanals. Prinzipiell kann die Lumbalspinalkanalstenose (LSS) angeboren (primär), erworben (sekundär) oder eine Kombination aus beidem sein. Im höheren Alter handelt es sich zumeist um eine erworbene LSS, die auf degenerative Wirbelsäulenveränderungen zurückzuführen ist (Börm et al. 2017, Vogt et al. 2006). Bei der bildmorphologischen Einteilung unterscheidet man zwischen der absoluten und relativen LSS. Diese Einteilung ist durch eine Messung des posterior-anterior Spinalkanaldurchmessers zu ermitteln. Eine absolute LSS ist häufig symptomatisch und beinhaltet einen Durchmesser von unter 10mm. Dagegen wird bei einem a.-p. Durchmesser von 10-14mm von einer relativen LSS gesprochen. Diese Stenose zeigt sich häufig asymptomatisch (Verbiest 1975). Aufgrund der unterschiedlichen Pathogenese entstanden weitere Einteilungsprinzipien der LSS. Neben der zentralen Stenose lässt sich auch eine laterale Einengung des Spinalkanals unterscheiden. Somit lässt sich neben der zentralen Einengung auch eine Recessus- und Foramenstenose (laterale Lumbalspinalkanalstenose) definieren. Durch ossäre Einengung des Foramen intervertebrale wird der Spinalnerv direkt an seiner Austrittsstelle komprimiert, was häufig die Ursache von Radikulopathien ist (Börm et al. 2017).

Die degenerative LSS tritt üblicherweise ab dem 50. Lebensjahr auf und hat sich in den letzten Jahren zu einer der häufigsten degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen entwickelt. Infolge der weltweit alternden Bevölkerung ist mit einer Zunahme der Prävalenz zu rechnen (Vogt et al. 2006).



Abbildung 6: MRT Diagnostik der LWS (sagittaler Schnitt)

Es zeigt sich eine Spinalkanalstenose auf Höhe LWK 2/3 mit Einengung des Spinalkanals.

Mit steigendem Alter kommt es zu degenerativen Prozessen eines Bewegungssegments, die zu einer Kompression des Spinalkanals führen (Genevay and Atlas 2010). Klinisch lässt sich die lumbale Spinalkanalstenose mit dem charakteristischen Beschwerdebild der Lumboischialgie und belastungsabhängigen Symptomen in den Beinen (Claudicatio) feststellen. Meist schildern die Patienten eine langsam progrediente Zunahme der Rückenschmerzen, die abhängig von der Belastung und der Körperhaltung auftreten. Das charakteristische Hauptsymptom ist die Claudicatio spinalis oder auch neurogene intermittierende Claudicatio genannt. Die Claudicatio spinalis ist ein Krankheitsbild, bei dem es nach Zurücklegen einer bestimmten Gehstrecke zu belastungsabhängigen Schmerzen kommt. In den meisten Fällen strahlen die Schmerzen in die Beine aus. Charakteristischerweise präsentieren sich die Patienten mit einer eingeschränkten Gehstrecke und einer Symptomlinderung in vornüber gebeugter Haltung.

Im Gegensatz zur vaskulären Claudicatio, bei der sich die Beschwerden bereits beim Stehenbleiben deutlich bessern, empfinden die Patienten mit einer Claudicatio spinalis vor allem eine Besserung bei lumbaler Kyphose. Folglich wird das Fahrradfahren, sowie das Liegen mit angewinkelten Beinen als deutlich angenehmer empfunden. Eine Symptomverschlechterung tritt dagegen bei Reklination, wie beispielsweise beim Bergabgehen, auf. Die Symptomlinderung in der Flexionshaltung lässt sich hauptsächlich durch den vergrößerten Raum der Foramina intervertebralia erklären. Daraufhin wird der

Spinalnerv nicht mehr komprimiert und es zeigt sich eine Linderung der Beschwerden (Atlas and Delitto 2006, Börm et al. 2017, Reinhold et al. 2018). Bei Fortschreiten der Erkrankung können die Patienten unter neurologischen Ausfällen wie beispielsweise Parästhesien und Kraftminderung (Paresen) leiden (Krämer et al. 2013). Im Falle einer lateralen Spinalkanalstenose kann es zu einem radikulären Schmerzsyndrom kommen. Die Leitsymptome sind radikuläre Schmerzen, neurologische Ausfälle wie Taubheitsgefühl oder Paresen in dem Innervationsgebiet der entsprechenden Nervenwurzel (Jenis et al. 2001).

Die klinische Verdachtsdiagnose wird mittels MRT bestätigt. Die Behandlung erfolgt initial in der Regel über die konservative Therapie, sofern keine neurologischen Ausfallerscheinungen im Sinne progredienten Paresen bestehen. Die konservative Therapie beinhaltet eine analgetische, sowie eine physiotherapeutische Behandlung. Bei stark progredienten Beschwerden, sowie dem Auftreten von neurologischen Defiziten besteht nur selten eine absolute Indikation zur Operation (Atlas and Delitto 2006).

1.4.3.3 Facettengelenksarthrose

Als Facettengelenksarthrose (Spondylarthrose) bezeichnet man die degenerative Veränderung der Facettengelenke. Sie tritt am häufigsten in den Segmenten LWK 4/5 und LWK 5 / SWK 1 auf. Die resultierende Gelenkflächenvergrößerung aufgrund von knöchernen Anbauten (Osteophyten, Hypertrophie) können zu einer Einengung der Intervertebralraumes (lateralen Recessus des Spinalkanals) führen. Daraufhin kann es zu einer Spinalkanal- oder Recessusstenose kommen (Pennekamp 2013, Reinhold et al. 2018).

1.4.3.4 Spondylolisthesis

Der Begriff Spondylolisthesis leitet sich u.a. von dem griechischen Wort „Olisthesis“ (Gleiten) ab. Es beschreibt die Verschiebung eines Wirbelkörpers zum angrenzenden Wirbelkörper in der Sagittalebene.

Eine Ventrolisthesis bezeichnet dabei die Verschiebung des Wirbels nach ventral (bauchwärts). In seltenen Fällen kann auch eine Verschiebung nach dorsal (rückenwärts) auftreten, dann spricht man von einer Retrolisthesis.

Die Klassifikation nach Meyerding unterteilt die Spondylolisthesis in 4 Grade. Die Einteilung beschreibt die Ventrolisthese eines Bewegungssegments. Der untere Wirbelkörper wird in vier Quadranten eingeteilt und mit jedem weiteren Abgleiten des Wirbelkörpers nach ventral um 25% wird ein neuer Meyerding-Grad erreicht. Ein vollständiges Abgleiten des oberen Wirbelkörpers nach ventral wird als Spondyloptose beschrieben (Meyerding 1932).

Frakturen, degenerative Prozesse, sowie angeborene Fehlbildungen können mögliche Ursachen sein (Börm et al. 2017, Reinhold et al. 2018).

Eine degenerative Spondylolisthesis kann letztendlich zu einer Spinalkanalstenose führen. Die Patienten leiden meist unter dem Beschwerdebild einer Claudicatio spinalis. Zusätzlich berichten die Patienten über einen belastungsabhängigen „Durchbruchschmerz“ (Differenzialdiagnose: Spinalkanalstenose) (Börm et al. 2017, Wittenberg et al. 1998).

1.5 Diagnostik

1.5.1 Anamnese

Eine ausführliche Anamneseerhebung bildet die Basis einer gründlichen Diagnostik. In unserer Thematik dient die Anamnese u.a. der Identifikation von spezifischen Wirbelsäulenleiden, die eine dringende Abklärung und Therapie erfordern. Patienten mit Wirbelsäulenerkrankungen haben häufig eine lange „Leidensgeschichte“, geprägt von der Entwicklung ihres Schmerzleidens, sowie den unterschiedlichsten Therapieerfahrungen. Der behandelnde Arzt sollte die „Schmerzgeschichte“ möglichst gut kennen und bei der Anamneseerhebung möglichst strukturiert vorgehen. Folgende Basiserhebung sollte unbedingt abgefragt werden:

- Wann? (Zeitpunkt): Beginn, Verlauf (schubweise, chronisch), Dauer
- Wodurch? (auslösende Maßnahmen): In Ruhe oder bei Belastung
- Wie? (Art, Stärke): Intensität (NRS), Charakter der Beschwerden (dumpf etc.)
- Wo? (Lokalisation der Beschwerden): lokale Rückenschmerzen (Lumbalgie) oder ausstrahlende Schmerzen in die Beine (Ischialgie)

Die Anamnese gibt zudem Auskunft über die Vorgeschichte (Behandlungen), Familien- und Berufsanamnese, Risikofaktoren und körperliche Tätigkeiten (Grifka and Kuster 2011, Rössler and Rüther 2007)

1.5.2 Klinische Untersuchung

Die klinische Untersuchung beinhaltet eine ausgiebige körperliche Untersuchung insbesondere der Wirbelsäule mit der dazugehörigen Rückenmuskulatur, sowie den angrenzenden Gelenken und ihren Muskelgruppen. Zusätzlich sollte die Motorik, die Eigenreflexe und die Sensibilität in den Beinen, sowie die vegetativen Störungen untersucht werden. Die Basisuntersuchung beginnt mit der Inspektion des Patienten. Hierbei wird u.a. der Allgemeinzustand, die Wirbelsäulenkrümmung, Schulter- und Beckenstand, sowie der Gang beurteilt. Bei einer Spinalkanalstenose wird typischerweise eine Schonhaltung im Sinne einer inklinierten Körperhaltung beobachtet. Die Palpation der Dornfortsatzreihe erlaubt eine Aussage über mögliche Stufenbildung, wie sie bei einer

Spondylolisthese auftreten kann. Mit der Ausübung von Klopfbewegungen über der Wirbelsäule können Wirbelkörperfrakturen und Entzündungen (Erschütterungsschmerz) festgestellt werden. Bei der Funktionsprüfung wird die Beweglichkeit der einzelnen Segmente in Ante-, Retro- und Lateralflexion getestet und dokumentiert. Bei einer körperlichen Untersuchung im Bereich der Wirbelsäule ist eine neurologische Untersuchung obligat. Häufig richtet sich die Therapie sogar nach den einzelnen neurologischen Auffälligkeiten. Zu der Beurteilung des peripheren Nervensystems gehört beispielsweise die Überprüfung der seitengleichen dermatombezogenen Sensibilität und Motorik. Häufig zeigt sich bei einem akuten Bandscheibenvorfall eine Einschränkung von diesen neurologischen Funktionen. Mit dem Lasegue-Test können allenfalls vorhandene Nervendehnungsschmerzen untersucht werden. Sensibilitätsstörungen entlang eines bestimmten Dermatoms deuten auf eine bestimmte Höhenlokalisation bzw. auf die betroffene Spinalnervenwurzel hin (Grifka and Kuster 2011, Reith et al. 2006).

1.5.3 Bildgebende Verfahren

Neben einer präzisen Anamneseerhebung und einer sorgfältigen klinischen Untersuchung genießt die bildgebende Diagnostik einen hohen Stellenwert in der Abklärung von Rückenbeschwerden. Dies gilt insbesondere bei spezifischen Rückenschmerzen, denen eine spezielle Pathologie zugrunde liegt. Hier kann des Öfteren auch eine unverzügliche Bildgebung erforderlich sein. Dabei stehen dem Untersucher verschiedene bildgebende Verfahren zur Verfügung.

Das konventionelle Röntgen gehört zur Basisdiagnostik an der Wirbelsäule. Bereits im Jugendalter können mit Hilfe der Röntgendiagnostik Achsenfehlstellungen und Deformitäten (Skoliose) erkannt werden. Zusätzlich wird das konventionelle Röntgen vor allem bei der Diagnostik von Frakturen und degenerativen Prozessen verwendet. Die Aufnahmen werden in den meisten Fällen im Stehen in zwei Ebenen durchgeführt. Des Weiteren kann man die Röntgendiagnostik mit Hilfe von Funktionsaufnahmen ergänzen. Hier können beispielsweise Instabilitäten an den einzelnen Bewegungssegmenten diagnostiziert werden.

Die Computertomographie wird aufgrund der sehr guten Auflösung der knöchernen Strukturen besonders bei der Diagnostik von Frakturen verwendet. Des Weiteren können mittels der Computertomographie auch entzündliche oder tumoröse Prozesse am Knochen gut dargestellt werden (Börm et al. 2017, Reinhold et al. 2018).

Die Kernspintomographie (Magnetresonanztomographie kurz: MRT) ist der Goldstandard der Weichteildiagnostik. Das Rückenmark (Spinalkanal) lässt sich hierbei gut beurteilen. Auch für die Bandscheibendiagnostik ist die MRT Untersuchung obligat. Die Aufnahmen sind in mehreren Ebenen möglich und besitzen eine hohe Auflösung der anatomischen Strukturen. Dies ermöglicht eine genaue Lokalisation von pathologischen Veränderungen, insbesondere der Weichteilstrukturen. Im Gegensatz zu den vorherigen bildgebenden Verfahren kommen bei der MRT keine Röntgenstrahlen zum Einsatz. Der Patient ist somit keiner Strahlenbelastung ausgesetzt. Jedoch sollte vor der Untersuchung ein ausführliches Gespräch erfolgen, bei dem der Patient über die Risiken (metallische Fremdkörper, Implantate, sowie Herzschrittmacher) aufgeklärt wird.

Zur Beurteilung der verschiedenen Körperstrukturen gibt es verschiedene Sequenzen. Die meist verwendeten sind die T1- und die T2-gewichteten Sequenzen. Bei T1 gewichteten Bildern sind Flüssigkeiten aufgrund ihrer langen T1- Relaxationszeit signalarm (hypointens), dagegen zeigt sich hier das Fettgewebe signalreich (hyperintens). In der T2 Gewichtung werden sowohl Fettgewebe als auch Flüssigkeiten jeweils signalreich (hyperintens) abgebildet (Börm et al. 2017, Reinhold et al. 2018, Vogl et al. 2011).

Bei Vorliegen spezifischer Rückenschmerzen mit akut auftretenden Paresen oder eines Cauda-equina-Syndroms sollte eine MRT Diagnostik notfallmäßig erfolgen.

Degenerative Veränderungen der Wirbelsäule sind physiologische Prozesse, welche jede Person in verschiedener Ausprägung vorweist. Häufig kann man allein durch die bildgebenden Verfahren keine Rückschlüsse über bestehende Rückenbeschwerden treffen, da in vielen Fällen eine strukturelle Veränderung in der Bildgebung nachzuweisen ist, aber die Patienten keine klinischen Beschwerden aufweisen. Deshalb sollte eine Beurteilung der Bildgebung nie ohne eine gründliche Anamnese, sowie eine ausführliche klinische Untersuchung erfolgen (Pfirrmann et al. 2004).

1.5.4 Infiltrationsdiagnostik

Eine Schmerzdifferenzierung gestaltet sich oft schwierig, da sich die einzelnen Strukturen des Bewegungssegmentes gegenseitig beeinflussen. Eine klare Zuordnung der klinischen Symptome zu den bestehenden Pathologien ist daher nicht immer eindeutig möglich.

Zum Auffinden des betroffenen Bewegungssegments an der Wirbelsäule wird bei unklarem klinischen Befund zur weiteren Abklärung eine selektive Infiltrationsdiagnostik durchgeführt (Kayser et al. 2008, Oder and Thurnher 2015). Durch lokale Infiltration von speziellen Medikamenten können hierbei bestimmte schmerzsignalsendende Strukturen wie beispielsweise Nervenbahnen ausgeschaltet werden. Nach der Infiltration wird der Patient über das aktuelle Schmerzempfinden befragt. Bei positivem Ansprechen in Form einer Schmerzlinderung kann somit das schmerzverursachende Gebiet und die eigentliche Schmerzlokalisierung diagnostiziert werden (Marschall et al. 2012).

Bei der Stufendiagnostik werden nacheinander in einem bestimmten Zeitabschnitt gezielte Infiltrationen an verschiedenen Lokalisationen und Strukturen der Wirbelsäule durchgeführt. Durch die daraus resultierenden Ergebnisse können die relevanten Pathologien identifiziert werden. Im Anschluss kann auf Grundlage der subjektiven Besserung der Beschwerden die Ergebnisse zur Diagnosestellung mit einbezogen werden (Kayser et al. 2008).

Die wirbelsäulennahen Infiltrationsverfahren werden nicht nur für diagnostische Zwecke herangezogen. Bei der therapeutischen Infiltration können vorübergehende Beschwerdespitzen durch eine Schmerzreduktion verbessert werden. Darüber hinaus findet sie Anwendung bei therapieresistenten Beschwerden trotz konservativer Therapieanwendungen. Aufgrund der darauffolgenden Beschwerdelinderung ist eine Durchführung/Fortführung der konservativen Behandlung (Verhaltenstherapie, Rückenschule, Physiotherapie etc.) möglich (Linhardt et al. 2017, Theodoridis 2007). Eine länger anhaltende Desensibilisierung in Form einer Beschwerdelinderung erreicht man in der Regel durch mehrfache Infiltrationen. Dies bewirkt eine verminderte Intensität der Nervenregung der betroffenen sensorischen Fasern. Somit kann frühzeitig Einfluss auf die Chronifizierung der Rückenschmerzen genommen werden (Eckardt 2011).

Die Durchführung erfolgt häufig mit Hilfe von bildgebenden Verfahren. Für die Durchführung von diagnostischen Infiltrationen ist eine radiografische Nadelpositionierung obligat.

Durch die gezielten Infiltrationen von schmerzlindernden, sowie entzündungshemmenden Medikamenten therapiert man die primäre Schmerzursache, ohne den gesamten Körper systemisch mit den Medikamenten zu belasten (Manchikanti et al. 2015, Theodoridis 2007). Je nach Indikation wird ein Lokalanästhetikum des Aminoamidtyps, ein Kortikosteroid oder eine Kombination aus beiden appliziert. Durch die Anwendung eines Lokalanästhetikum werden sensible Nervenfasern blockiert. Dies bewirkt eine Schmerzreduktion, eine Erhöhung der Reizschwelle mit Abnahme der Nervenerregbarkeit, sowie eine lokale Durchblutungsförderung. Das Lokalanästhetikum vom Amidtyp (z.B. Lidocain) wirkt aufgrund des Basenanteils sehr schnell. Die kristallinen Kortikosteroide wirken dagegen erst spät, besitzen aber eine langanhaltende abschwellende und entzündungshemmende Wirkung. Bei diagnostischen Verfahren wird in der Regel ein kurzwirksames Lokalanästhetikum angewendet. Bei einmaliger Infiltrationstherapie wird ein langwirksames Lokalanästhetikum in Kombination mit einem Kortikoid verwendet (Linhardt et al. 2017, Theodoridis 2007, Theodoridis and Krämer 2017a).

Abgesehen von den allgemeinen Nebenwirkungen der lokalen Infiltrationen können spezifische Komplikationen auftreten. Nach der perineuralen Applikation von Lokalanästhetika um den Spinalnerv kann es beispielsweise zu einer Beeinträchtigung von motorischen Fasern kommen. In einzelnen Fällen kommt es hierbei zu motorischen Ausfällen in Form von vorübergehenden Lähmungen. Aufgrund dessen sollte der Patient postinterventionell überwacht werden (Epstein 2013, Theodoridis 2007).

Die Messbarkeit des Therapieerfolgs kann anhand des Schmerzbefindens des Patienten postinterventionell bestimmt werden. Hier wird immer die Verbesserung der Beschwerdesymptomatik zur Ausgangslage in % beurteilt. Die Beurteilung der Schmerzintensität erfolgt immer subjektiv. Hierzu stehen verschiedene validierte Verfahren zur Verfügung (Theodoridis and Krämer 2017a). Die Schmerzwahrnehmung ist ein subjektives Empfinden. Die Vergleichbarkeit der Schmerzintensität der Patienten untereinander stellt sich somit sehr schwierig dar. Allerdings lässt sich der

Schmerzverlauf eines Patienten vor und nach einer stattgefundenen Infiltration sehr gut anhand von Schmerzskalen vergleichen.

Die Infiltrationstechniken an der Wirbelsäule lassen sich generell in wirbelsäulenferne und wirbelsäulennahe Infiltrationsverfahren einteilen. Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen die wirbelsäulennahen minimalinvasiven Infiltrationsverfahren, insbesondere die lumbale Facetteninfiltration und die epidurale Infiltration.

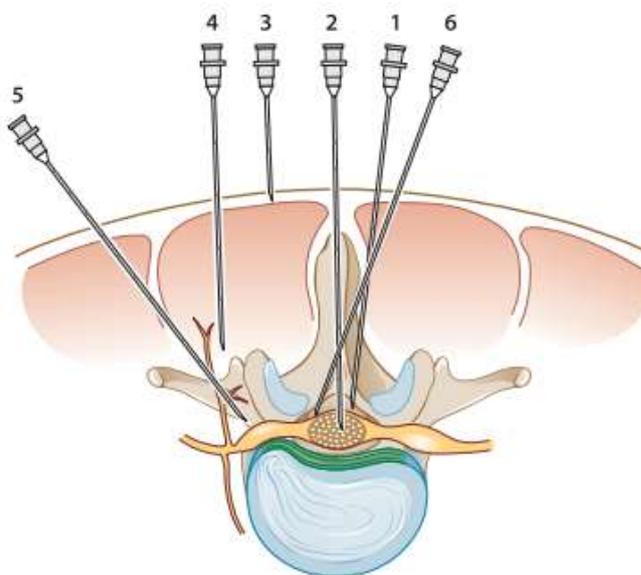


Abbildung 8: Darstellung der Infiltrationstechniken an der Lendenwirbelsäule

1 dorsale-epidurale Infiltration, 2 intrathekale Infiltration (Spinalanästhesie), 3 subkutane Injektion (wirbelsäulenferne Injektion), 4 Facettengelenksinfiltration, 5 Infiltration der foraminoartikulären Region (z.B. LSPA), 6 epiduralen-perineuralen Injektion (Eckardt 2011) mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlages.

Indikationen und absolute Kontraindikationen für die Durchführung der Infiltrationstechniken sind dabei streng zu beachten. Zu den absoluten Kontraindikationen zählen u.a.

- Unverträglichkeit gegenüber den verwendeten Medikamenten
- Immunsuppression (z.B. Leukopenie)
- schwere Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Bradykardie, höhergradiger AV-Block)
- Infektionen (Wundheilungsstörungen, Systemische entzündliche Prozesse)
- Erkrankungen des ZNS (Eckardt 2011, Linhardt et al. 2017, Theodoridis 2007)

1.5.4.1 Die lumbale Facetteninfiltration

Das Ziel der lumbalen Facetteninfiltration ist die Ausschaltung der schmerzwahnehmenden Sensoren (Nozizeptoren) in bzw. um die Facettengelenkkapsel. Die vorübergehende Hemmung der Nozizeptoren wird therapeutisch bei Beschwerden angewendet, welche pathologische Veränderungen an den Facettengelenken (z.B. Facettensyndrom oder pseudoradikuläre Syndrome) haben. Die Infiltration kann intra- oder extraartikulär erfolgen (Theodoridis and Krämer 2017b). Gerade für diagnostische Zwecke sollte das Infiltrationsvolumen von maximal 1ml nicht überschritten werden. Größere intraartikulär applizierte Mengen könnten zu einer intraspinalen Kapselruptur führen. Die Folgen wären eine unkontrollierte epidurale Medikamentenausbreitung und eine einhergehende mögliche Verfälschung der Ergebnisse. Ist eine intraartikuläre Infiltration, beispielsweise aufgrund fortschreitender Facettengelenksarthrose, nicht möglich, sollten die für die Kapselinnervation des Facettengelenkes zuständigen Rami dorsales n. spinalis der angrenzenden Bewegungssegmente infiltriert werden (Fritz et al. 2007, Silbergleit et al. 2001).

1.5.4.2 Die epidurale Infiltration

Der lumbale Epiduralraum kann über verschiedene Injektionswege punktiert werden.

Die epidurale-dorsale Infiltration

Um den dorsalen Epiduralraum des betroffenen Wirbelsäulensegmentes zu erreichen, erfolgt die Injektion durch das interlaminäre Fenster. Durch die dorsal-interlaminäre Technik diffundiert das Injektionsmittel zum Teil auf beiden Seiten und kann somit mehrere bedrängte Nervenwurzeln gleichzeitig umfluten. Zu den Hauptindikationen zählen u.a. zentrale Spinalkanalstenosen und Polyradikulopathie. Beim liegenden Patienten wird eine Kanüle unter röntgenologischer Kontrolle zwischen die Dornfortsätze des betroffenen Wirbelsäulensegmentes in den Epiduralraum vorgeschoben. Kurz vor oder bei Durchdringen des Lig. flavum wird der Mandrin entfernt und die Kanüle unter fortgesetztem Injektionsdruck vorgeschoben bis der Widerstandsverlust zu spüren ist (loss of resistance). Dies verhindert das Durchstoßen der Dura und signalisiert die epidurale Position der Nadelspitze (Theodoridis 2007, Theodoridis and Krämer 2017a).

Die epidurale-perineurale Infiltration

Die Indikation besteht insbesondere bei einer monoradikulären Wurzelkompression, beispielsweise durch einen Bandscheibenvorfall mit verlagertem Bandscheibengewebe oder durch ossäre Anbauten bei lateraler Spinalkanalstenose. Ziel dieser Technik ist die gezielte lokale Umflutung der betroffenen Nervenwurzel um eine Schmerzreduktion direkt am Ort der Schmerzursache zu erzielen. Das Vordringen in den ventrolateralen Epiduralraum erfolgt über einen schrägen interlaminären Zugang. Hierbei wird die Führungskanüle (Introducer-Kanüle) seitlich der Mittellinie (1cm unterhalb und 1cm kontralateral der Processus spinosus) in den kontralateralen Bereich leicht schräg eingebracht. Der Einstichwinkel der Introducer-Kanüle sollte zwischen 10° und 20° betragen (Eckardt 2011, Theodoridis 2007, Theodoridis and Krämer 2017a, Theodoridis et al. 2009).

Die epidurale-sakrale Infiltration

Bei der epiduralen-sakralen Infiltration wird der lumbale Epiduralraum über den Hiatus sacralis punktiert. Der Zugang über den Hiatus sacralis wird angewendet um beispielsweise den unteren Teil des Plexus sacralis zu infiltrieren. Diese Desensibilisierung beschränkt sich auf die Nervenwurzeln S3-S5 und wird beispielsweise bei einer S1-Ischialgie angewendet. Für die Durchführung wird der Patient in eine spezielle Kniehocklagerung platziert. Nach Palpation der beiden Cornua sacralia, wird der dazwischenliegende Hiatus sacralis palpirt und die Punktionsnadel in den Sakralkanal vorgeschoben.

1.6 Therapie

Grundsätzlich wird bei den Therapiemöglichkeiten an der Wirbelsäule zwischen konservativer und operativer Behandlungsmethodik unterschieden. Das Nichtansprechen von konservativen Maßnahmen ist im Krankheitsverlauf häufig eine Indikation für eine operative Therapie. Zudem sind in bestimmten Fällen chirurgische Maßnahmen auch notfallmäßig sofort einzuleiten. Zu den Notfallindikationen zählen u.a. das Vorliegen eines Cauda-equina- oder Conus medullaris- Syndrom mit Blasen- und Mastdarmfunktionsstörungen und Reithosenanästhesien (Grifka and Kuster 2011, Reinhold et al. 2018, Rössler and Rütger 2007).

1.6.1 Konservative Therapie

Nach Ausschluss der Red Flags ist in der Regel die konservative Therapie das Mittel der Wahl. Bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Cauda-equina-Syndrom) ist in der Regel zumeist bei Beginn der Diagnosestellung die konservative Therapie der operativen Therapie vorzuziehen. Hierbei ist ein multimodales Therapiekonzept essentiell. Dies beinhaltet eine Kombination aus nichtmedikamentöser (physikalischer) und medikamentöser Behandlung (Börm et al. 2017, Grifka and Kuster 2011, Rössler and Rütger 2007, Schulte et al. 2006) :

Tabelle 2: Konservative Therapieoptionen bei degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen

| Medikamentöse Therapie | Nichtmedikamentöse Therapie |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Analgetika • Antiphlogistika • Myotonolytische Medikamente (orale und lokale Infiltrationen) | <ul style="list-style-type: none"> • Physiotherapie • Manuelle Therapie • Wärme- und Kälteanwendung • Rückenschule • Verhaltenstraining • Elektrotherapie • Orthesen |

1.6.2 Operative Therapie

Bei den degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule wird eine operative Behandlung u.a. bei chronisch rezidivierenden Schmerzen und ausgereizter konservativer Therapie, sowie bei neurologischen Ausfällen in Erwägung gezogen. Bei der Dekompression ist das Ziel eine Entlastung der eingeengten neurovaskulären Strukturen herbei zu führen. Hierbei gibt es unterschiedliche dekomprimierende Operationsmethoden, wie etwa die Laminektomie oder die Foraminotomie. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich primär durch die Entfernung der eingeengten Strukturen (Grifka and Kuster 2011, Schulte et al. 2006).

1.7 Fragestellung

Die Magnetresonanztomographie spielt eine wesentliche Rolle in der Diagnostik und der zu planenden Behandlungsstrategie bei Patienten mit lumbalen Rückenschmerzen. Oftmals erweist es sich als schwierig, die klinischen Symptome sowie die subjektiv empfundenen Beschwerden mit den bildgebenden Befunden in ein Krankheitsbild einzuordnen. In der modernen Schmerztherapie kommen zahlreiche verschiedene therapeutische Ansätze zum Einsatz. Bisher lässt sich der Erfolg, besonders nach einer chirurgischen Therapie, nicht anhand eines präoperativen bildgebenden Befundes vorhersagen. Ein Weg, die Spinalkanal- und Neuroforaminalstenose einteilen zu können, sind verschiedene Mess- und Klassifikationssysteme. Hierfür ist die MRT-Diagnostik notwendig. Diese Messtechnik wurde in bereits durchgeführten Studien von erfahrenen Spezialisten untersucht. Die Auswirkungen eines gezielten Messtrainings wurden dabei nur selten bewertet.

In dieser Studie soll nun untersucht werden, ob Mess- und Klassifikationssysteme für die Spinalkanal- und Neuroforaminalstenose, sowie die Facettengelenkdegeneration eine Schmerzlinderung nach durchgeführter lokaler epiduraler Infiltration oder Facettengelenkinfiltration voraussagen können. Als objektivierbare Methode werden hierzu kernspintomographische Bildgebungen mit ausgewählten Mess- und Klassifikationssystemen vermessen und die subjektive Schmerzverbesserung nach Infiltration dokumentiert.

In der Dissertation wurden folgende Fragestellungen abgehandelt:

- Wie entscheidend wirkt sich ein fachspezifisches Training auf die Messergebnisse aus? Ist ein Messtraining wichtiger als eine jahrelange Berufserfahrung?
- Gibt es eine Korrelation zwischen Bildbefund und Ansprechen auf Infiltration? Nimmt die Schmerzlinderung mit zunehmender Pathologie im MRT-Bild nach einer epiduralen Infiltration oder einer Facettengelenkinfiltration ebenfalls zu?

2. Material und Methoden

2.1. Material

Für alle Patienten der Studie lagen MRT-Schnittbilder vor. Die MRT-Untersuchungen erfolgten ausschließlich im Universitätsklinikum Tübingen. Hierfür wurden zwei unterschiedliche MRT-Geräte verwendet (siehe Tabelle 3). Die Bilder der durchgeführten MRTs lagen vollständig in digitaler Form vor. Die Durchführung der verschiedenen Messungen erfolgte an einem dafür vorgesehenen Arbeitsplatz in der Orthopädischen Klinik. Der Arbeitsplatz beinhaltete eine Workstation mit hochauflösendem Bildschirm, sowie einem leistungsfähigen Computer (siehe Tabelle 3).

2.1.1 Technische Ausstattung

Tabelle 3: Auflistung der verschieden verwendeten technischen Geräte

Die Tabelle zeigt die unterschiedlichen verwendeten Geräte mit denen die Datenerhebung sowie die Analyse erfolgten. Des Weiteren wurden die Firmen in der zweiten Tabellenspalte zum zugehörigen Gerät dargestellt.

| Instrument | Unternehmen |
|----------------------------|-------------------------|
| Magnetom Sykra, 3 Tesla | Siemens Healthcare GmbH |
| Magnetom Aera, 1,5 Tesla | Siemens Healthcare GmbH |
| Magnetom Espree | Siemens Healthcare GmbH |
| Centricity PACS RA 100 | GE Healthcare |
| RadiForce RS110 Bildschirm | Eizo Nanao Corporation |

2.1.2 Software

Die einzelnen Messungen wurden mithilfe des Radiologie-Programms (Centricity PACS RA 100) durchgeführt. Des Weiteren erfolgte die zusätzliche Datenerhebung bezüglich des Schmerzverlaufs mit den jeweiligen Infiltrationsberichten mithilfe des Patientenverwaltungssystem SAP i.s.h. med.

Im Anschluss wurden die erhobenen Daten mittels Microsoft Excel 2016 als Datenbank angelegt. Diese konnten im Verlauf mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Statistics 24 ausgewertet werden.

2.2 Methoden

2.2.1 Studiendesign

Bei der durchgeführten Studie handelt es sich um eine klinisch-retrospektive Studie. Der Studienablauf gestaltete sich wie folgt:

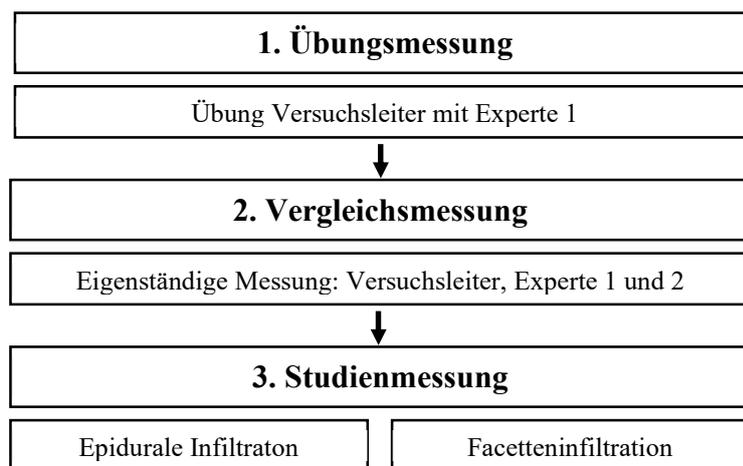


Abbildung 9: Aufbau der Studie

Schematische Darstellung des Studienaufbaus.

Zu Beginn der Datenerhebung erfolgte eine Übungsmessung. Mit der Übungsmessung sollte die Messfähigkeit des Versuchsleiters sichergestellt werden. Im Anschluss erfolgte die Vergleichsmessung. Hierbei wurden die Messergebnisse zwischen den erfahrenen Experten und dem Versuchsleiter verglichen. Nachfolgend führte der Versuchsleiter die eigentliche Studienmessung selbstständig durch.

Die Studienmessung unterteilte sich in zwei Probandengruppen:

- Epidurale Infiltration (100 Patienten)
- Facetteninfiltration (50 Patienten)

Die Probanden für die Übungs- und Vergleichsmessung wurden willkürlich ohne besondere Anforderungen außer den notwendigen Ein- und Ausschlusskriterien ausgesucht. Alle Patienten wurden mit einer Studiennummer pseudonymisiert. Die erforderlichen Messdaten wurden anhand der durchgeführten MRT Diagnostik erhoben.

Diese Untersuchungen wurden in der Orthopädischen Klinik der Universitätsklinik Tübingen durchgeführt. Zusätzlich wurden die Angaben über den subjektiv empfundenen Schmerz vor und nach durchgeführter Infiltration protokolliert.

Für die Studienmessungen wurden die MRT Bilder anhand verschiedener Parameter analysiert und ausgewertet. Dabei lagen zu diesem Zeitpunkt keinerlei Informationen über das klinische Bild und einer möglichen Schmerzlinderung vor. Die erhobenen Daten wurden mittels Microsoft Excel eingepflegt. Nach Abschluss aller Messungen wurden die Patienteninformation (Diagnose, Schmerzlinderung, etc.) ausgehändigt und ebenfalls dokumentiert.

Das Studienprotokoll wurde vor Studienbeginn der Ethikkommission der Universität Tübingen zur Begutachtung vorgelegt (Projektnummer 503 / 2016BO2). Nach Erhalt der entsprechenden Genehmigung wurde mit der Studie begonnen.

2.2.2 Messteilnehmer

Die Studienmessungen führten insgesamt 3 Messteilnehmer durch, ein Versuchsleiter (VL), Experte 1 (Exp1) und Experte 2 (Exp2). Der Versuchsleiter war zum Zeitpunkt der Datenerhebung und Auswertung der Studiendaten eine zahnmedizinische Studentin mit initial keiner Erfahrung in der MRT Diagnostik. Bei Experte 1 und 2 handelt es sich um hoch qualifizierte Wirbelsäulenchirurgen mit jahrelanger Erfahrung im Bereich der MRT Anwendung und Diagnostik. Im Unterschied zu Exp2, der lediglich die Vergleichsmessung durchführte, schulte Exp1 VL in der Anwendung der MRT Diagnostik und führte sowohl die Übungsmessung als auch die Vergleichsmessung durch.

2.2.3 Patientenkollektiv

Das Patientenalter der untersuchten Probanden lag bei der Studie zwischen 18 und 93 Jahren. Diese Probanden haben im Zeitraum von 2005 bis 2016 während eines stationären Aufenthaltes eine lumbale Infiltration im Sinne einer Stufendiagnostik erhalten. Die stationäre Behandlung erfolgte in der orthopädischen Abteilung der Universitätsklinik Tübingen. Hier erfolgte initial eine ausführliche Anamneseerhebung und Bestimmung des aktuellen subjektiven Schmerzempfindens. Das beschriebene Rückenleiden wurde anhand eines Schmerzniveaus dokumentiert. Für die Studie wurde die Schmerzstärke nachträglich der Numerischen Rating Skala zugeordnet und protokolliert. Die Indikationsstellung für eine Infiltrationsdiagnostik erfolgte im Rahmen der ambulanten Vorstellung durch einen Oberarzt der Orthopädischen Klinik. Die Patienten wurden für die Stufendiagnostik insgesamt 5 Tage stationär aufgenommen. Täglich wurde bei dem Patienten eine wirbelsäulennahe Infiltration durchgeführt. Die Lokalisation und das Verfahren der Infiltration wurden anhand der klinischen und radiologischen Befunde durch einen Arzt festgelegt. Nach einer Erholungsphase von 4 Stunden wurde der Patient nach seiner empfundenen Besserung der Rücken- und Beinschmerzen hin befragt. Diese Schmerzlinderung musste in Prozent angegeben werden.

- 100% -> keine Schmerzen mehr vorhanden
- 0% -> keine Schmerzlinderung eingetreten.

Einschlusskriterien:

- Diagnostizierte Lumbago, Ischialgie oder neurogene Claudicatio
- Eine am ersten Tag der stationären Diagnostik durchgeführte monosegmentale epidurale Injektion oder Facettengelenkinfiltration.
- Eine Aussage über den vorhandenen Schmerz nach durchgeführter Infiltration mit Bestimmung der Schmerzlinderung in Prozent.
- Das Vorliegen einer qualitativ hochwertigen MRT Diagnostik. Die angefertigten MRT Bilder durften nicht älter als 1 Jahr sein.

Ausschlusskriterien:

- Stattgefundenen Operationen an der Lendenwirbelsäule
- Vorhandensein von Metall im Bereich des Untersuchungsgebietes, welche die Untersuchung der MRT Bilder verhindert

2.2.4 Vergleichsmessung

Die Vergleichsmessung wurde von zwei erfahrenen Wirbelsäulenchirurgen der orthopädischen Abteilung des Universitätsklinikum Tübingen sowie dem Versuchsleiter (VL) durchgeführt. Die erfahrenen Wirbelsäulenchirurgen wurden im Folgenden als Experte 1 und 2 (Exp1 und Exp2) bezeichnet. Des Weiteren wurde eine Zusammenstellung zur Beschreibung der Mess- und Klassifizierungssysteme erstellt. Diese Zusammenstellung beinhaltete neben verschiedenen Definitionen und Erklärungen aus der Literatur auch hilfreiches Bildmaterial zu den einzelnen Messpunkten. Für einige Parameter waren die Informationen aus der Literatur zu ungenau, sodass hier eigene Anmerkungen notwendig waren. Vor der eigentlichen Vergleichsmessung wurde eine Übungsmessung von dem Versuchsleiter durchgeführt. Nach der Übungsmessung wurden die Messergebnisse des Versuchsleiters mit dem Experten 1 besprochen und analysiert. Mögliche Messfehler konnten hierbei frühzeitig erkannt werden und dadurch die Messgenauigkeit deutlich verbessert werden. Für die Übungsmessung wurden 10 Patienten anhand der genannten Ein- und Ausschlusskriterien (siehe Abschnitt 2.2.2) ausgewählt. Bei jedem Patienten wurden 2 Segmente vermessen, sodass insgesamt 20 Bewegungssegmente gemessen wurden. Vor der Übungsmessung erhielt der Versuchsleiter eine kurze Einführung zu der MRT Diagnostik der Wirbelsäule und anschließend die schriftliche Anweisung der Messtechnik. Nach der ersten Messung wurde dem Versuchsleiter die Messergebnisse des Experten 1 übergeben. Messfehler und Ungenauigkeiten wurden daraufhin mit dem Experten 1 besprochen. Um den Erfolg des Messtrainings sicherzustellen, führte VL ein weiteres Mal die Übungsmessung durch. Erst nachdem sichergestellt wurde, dass die Ergebnisse des VL und Exp1 sich ähneln, wurde die Vergleichsmessung von VL begonnen. Die Vergleichsmessung beinhaltete 30 zu messende vordefinierte Bewegungssegmente der Lendenwirbelsäule. Eine Messung wurde nicht durchgeführt, wenn eine der drei messenden Personen (VL, Exp1 und Exp2) die Bildqualität als nicht ausreichend definierte. Während der VL und der Exp1 sich zuvor bereits bei den Übungsmessungen mit der Messmethodik vertraut machen konnte, erhielt der andere erfahrene Wirbelsäulenchirurg (Exp2) lediglich die schriftliche Anweisung für die Messtechniken. Der Experte 2 erhielt zudem keinen Zugriff auf die Testmessdatenbank. VL, Exp1 und Exp2 führten die Messungen eigenständig durch.

2.2.5 Infiltrationstechnik

Für die Infiltrationen wurde ein Mischpräparat verwendet. Das Mischpräparat bestand aus einem Lokalanästhetikum, sowie einem Corticosteroid. Zusätzlich wurde dem Mischpräparat 0,6ml von einer 0,9% NaCl Lösung hinzugegeben. Diese Lösung wurde mit einer 20 G Crawford-Nadel appliziert. Sowohl die epidurale Infiltration als auch die Facetteninfiltration wurde unter radiologischer Kontrolle in der anterior-posterior- und lateralen Ansicht durchgeführt.

Tabelle 4: Inhaltsstoffe des applizierten Mischpräparates

| | Epidurale Infiltration | Facetteninfiltration |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Lokalanästhetika: Bupivacain | 1,8 ml 0,25% | 0,5 ml 0,25% |
| Corticosteroid: Triamcinolon | 0,6 ml 10 mg/ml | 0,5 ml 10 mg/ml |

2.2.6 Messtechnik und Klassifizierungssystem

Für diese Studie wurden sowohl für die Spinalkanalstenose als auch für die Neuroforamenstenose quantitative und qualitative Mess- und Klassifizierungssysteme verwendet. Darüber hinaus wurde die Facettendegeneration anhand eines Klassifizierungssystems bewertet. Für die Messungen wurde die Segmenthöhe gewählt, die am ersten Tag infiltriert wurde. Somit konnten jegliche Beeinflussungen des Behandlungserfolges durch die Infiltrationen an den Folgetagen ausgeschlossen werden.

2.2.6.1 Messtechnik für die Spinalkanalstenose

2.2.6.1.1 Quantitative Messung

2.2.6.1.1.1 Bestimmung des sagittalen Durchmessers des Duralsackes

Die Bestimmung des Durchmessers erfolgte in der T2 Wichtung im axialen Schnitt. Hierzu wurden verschiedene Höhen zur Messung des Durchmessers verwendet. Die Durchmesser wurden auf den folgenden Höhen gemessen:

- 1) 1/2 Wirbelkörper unterhalb der Bandscheibe
- 2) 1/2 Wirbelkörper oberhalb der Bandscheibe
- 3) Zentral auf Bandscheibenhöhe
- 4) Engste Stelle auf Bandscheibenhöhe (Herzog et al. 1991, Ullrich et al. 1980, Verbiest 1979).

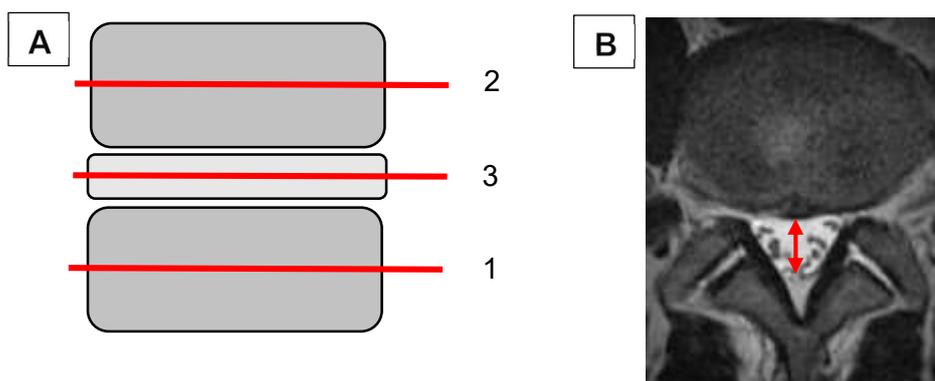


Abbildung 10: Sagittaler Durchmesser des Duralsackes auf unterschiedlichen Höhen

In der Abbildung A ist schematisch die Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf unterschiedlichen Höhen dargestellt. Die breiten rechteckigen Formen spiegeln jeweils einen Wirbelkörper wieder. Dazwischen ist die Bandscheibe angeordnet. 1) die Messung erfolgt einen halben Wirbelkörper unterhalb der Bandscheibe, 2) hier wird der Duralsack einen halben Wirbelkörper oberhalb der Bandscheibe gemessen, 3) die Messung erfolgt auf Höhe der Bandscheibe.

In der Abbildung B liegt ein MRT Bild in T2 Wichtung in axialer Schnittebene vor. Der rote Pfeil verdeutlicht die Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsackes.

2.2.6.1.1.2 Bestimmung des interlaminären Abstands (transversaler Durchmesser Duralsack)

Auf Höhe der Bandscheibe wurde in der axialen Schicht (T2 Wichtung) der Abstand zwischen beiden Ligg. flava gemessen. Die transversalen Messpunkte wurden so gewählt, dass die Messlinie parallel zur Hinterkante der Bandscheibe verlief. Wurden mit Hilfe des Localizers mehrere Bilder auf der jeweiligen Bandscheibenhöhe ermittelt, wurde das Bild mit dem geringsten Abstand zwischen den Bändern ausgewertet (Herzog et al. 1991).



Abbildung 11: Interlaminärer Abstand

In der Abbildung ist ein T2-gewichtetes axiales MRT-Bild der Lendenwirbelsäule in Höhe von L3 abgebildet. Der rote Pfeil zeigt die Messungslinie zwischen den Innenflächen der Lig. Flava (Herzog et al. 1991). Die Höhe der Verbindungslinie wurde an der dicksten Stelle der Ligamente zwischen dem Gelenkraum der Facettengelenke gewählt.

2.2.6.1.1.3 Bestimmung der Fläche des Duralsacks

Die kleinste Querschnittsfläche des Duralsacks wurde in T2-gewichteten Axialbildern gemessen. Die sagittale Höhe wurde mithilfe des Localizers innerhalb des infiltrierten Bewegungssegmentes auf Bandscheibenhöhe gewählt (Hamanishi et al. 1994, Laurencin et al. 1999). Die Literatur gab keine Information über die Messgrenze im Bereich der Foramen intervertebrale. Daher wurde die laterale Grenze des Duralsacks hypothetisch anhand der vor- und nachfolgenden Bilder bestimmt. Die in der Studie von Laurencin beschriebene Berechnung des Stenoseverhältnisses wurde in der Dissertation nicht vorgenommen.

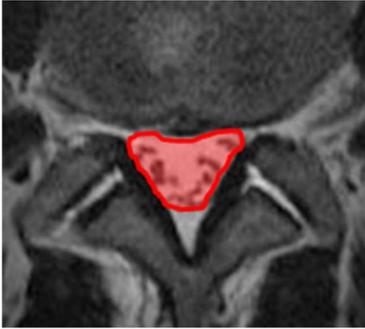


Abbildung 12: Fläche des Duralsackes

Das MRT-Bild zeigt die Flächenmessung des Duralsackes auf der Ebene der Bandscheibe. Die seitlichen Ränder des Duralsackes im Bereich des Neuroforamens wurden anhand der vor- und nachfolgenden Abbildungen bestimmt.

2.2.6.1.1.4 Posteriore Bandscheibenhöhe

Die posteriore Bandscheibenhöhe wurde in der sagittalen T2- gewichteten Bildaufnahme gemessen. Dabei wurde die Einstellung in der Axialebene gewählt, bei der der Spinalkanal möglichst zentral dargestellt war (Hasegawa et al. 1995).

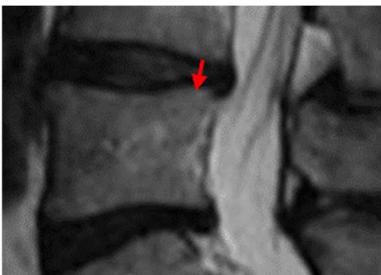


Abbildung 13: Messung der posterioren Bandscheibenhöhe

Das T2-gewichtete sagittale MRT Bild zeigt die Messung der posterioren Bandscheibenhöhe

2.2.6.1.2. Qualitative Messung der Spinalkanalstenose

Die Spinalkanalstenose wurde qualitativ über die Klassifikation nach Schizas et al. eingeteilt. Die Klassifikation erfolgt anhand der Morphologie des Duralsacks in axialen T2-gewichteten MRT-Bildern. Dabei wurde das Verhältnis von Nervenwurzeln und Liquor cerebrospinalis und das Vorhandensein von Epiduralfett beurteilt. Schizas et al. definierten Kategorie A als keine bis kleinere Stenose, die er weiter in A1 bis A4 einteilte. Weiterhin definierte er Kategorie B als moderate Spinalkanalstenose, Kategorie C als schwere Stenose und D als eine sehr schwere Form der Spinalkanalstenose. Eine Unterscheidung zwischen den Kategorien A1 bis A4 gestaltet sich in der Studie oft schwierig, sodass diese entgegen der Literatur zu einer Kategorie zusammengefasst wurden (Schizas et al. 2010).

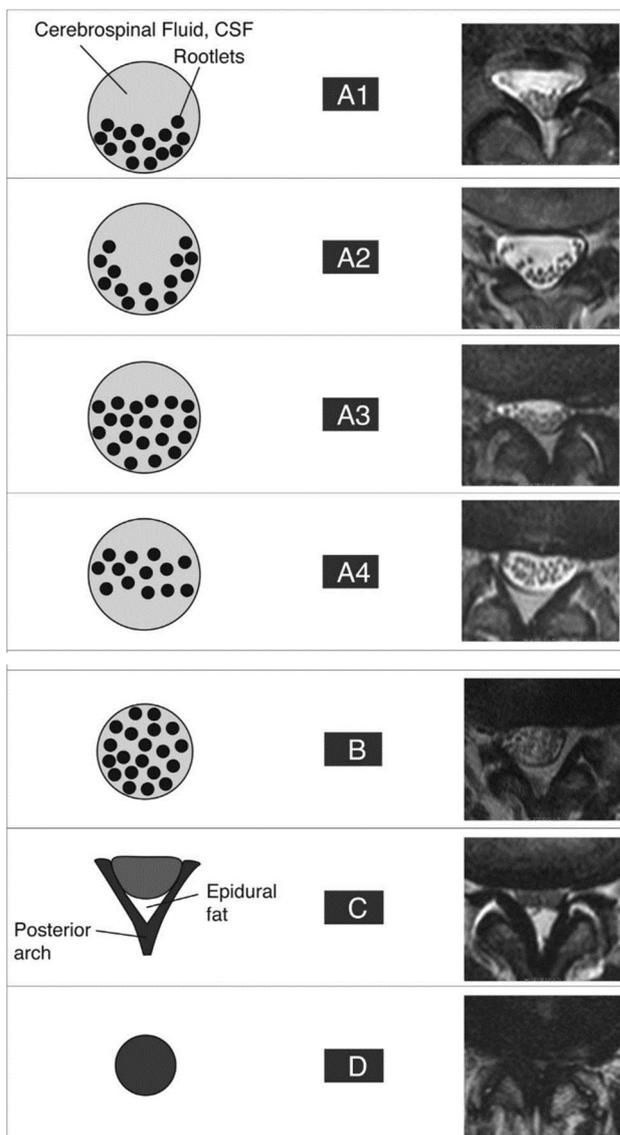


Abbildung 14: Klassifikation der Spinalkanalstenose

Darstellung der qualitativ morphologischen 7-Grad- Einteilung. Die Klassifikation beruht auf der Morphologie des Duralsacks. Dabei ist das Verhältnis zwischen Nervenwurzeln und Liquor und die Anordnung der Nervenwurzeln entscheidend. Zur besseren Beurteilung ist dem jeweiligen T2-axialen MRT Bild eine geeignete Grafik beigelegt. A1: Die Nervenwurzeln liegen dorsal im Duralsack und besetzen somit etwa ein Drittel der Duralsackfläche. A2: Die Wurzeln liegen dorsal und seitlich dorsal, ähnlich einer Hufeisenform. A3: Die Nervenwurzeln liegen dorsal und füllen den Duralsack über die Hälfte aus. A4: Die Wurzeln liegen zentral im Duralsack. Insgesamt besetzen sie über die Hälfte des Duralsacks. B: Der Duralsack ist fast vollständig mit Nervenwurzeln gefüllt. Nur wenig Liquor ist enthalten. C: Hier sind keine einzelnen Nervenwurzeln zu erkennen. Der Duralsack ist homogen grau abgebildet und posterior davon ist epidurales Fett vorhanden. D: Zusätzlich zu C ist hier kein posteriores Epiduralfett zu erkennen (Schizas et al. 2010) mit freundlicher Genehmigung von Wolters Kluwer Health.

2.2.6.2 Messtechnik für die Neuroforamenstenose

2.2.6.2.1 Quantitative Messung

2.2.6.2.1.1 Messung des anterioren-postioren Durchmesser

Der anterior-posteriore Durchmesser des Foramen nervale der rechten und linken Seite wurde in axialen T2-gewichteten MRT-Bildern (bezogen auf das sagittale T2 Bild) in zwei unterschiedlichen Höhen gemessen:

- Mithilfe des Lokalizers wurde der Durchmesser des Foramen nervale sagittal auf Höhe der Bandscheibe gemessen. Lagen mehrere Schnittbildeinstellungen vor, wurde das kranialste Bild gewählt. Diese Entscheidung wurde aufgrund der Tatsache getroffen, dass der Übergang der Nervenwurzel durch das Foramen relativ kranial verläuft.
- In der zweiten Messung wurde die sagittale T2 Einstellung gewählt, bei der die Wurzel auf dem axialen Bild das Foramen nervale durchquerte (Beers et al. 1985).

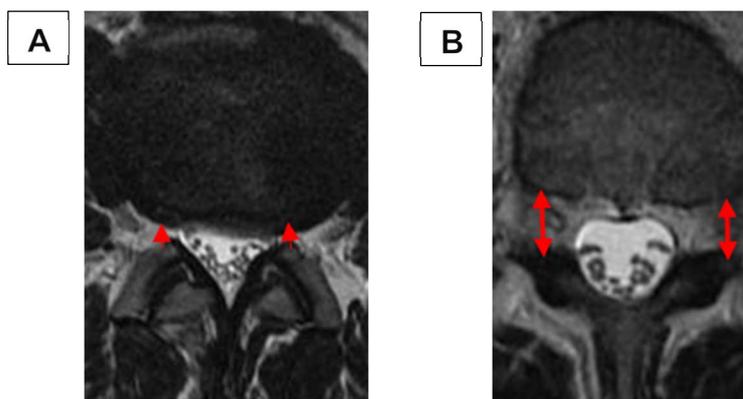


Abbildung 15: Messung des Durchmessers des Foramen nervale

Die axialen T2-gewichteten MRT-Bilder der Lendenwirbelsäule zeigen die Messung des anterior-posterioren Durchmessers des Foramen nervale. (A) auf Höhe der Bandscheibe. (B) auf der Höhe bei der die Nervenwurzel das Foramen nervale durchquert.

2.2.6.2.1.2 Querschnittsfläche des Foramen

In sagittalem T1-Bild wurde die minimale Querschnittsfläche des Foramen nervale gemessen. Sipola et al. unterteilt den lateralen lumbalen Spinalkanal in eine subartikuläre und eine foraminale Zone. Die subartikuläre Zone liegt unterhalb des oberen Gelenkfortsatzes und die foraminale Zone liegt unterhalb des Pedikels. Für die Messung des Foramen nervale wurde die Fläche der foraminale Zone gemessen. Die Nervenwurzel verläuft kranial der unteren Endplatte. Infolgedessen wurde bei der Flächenmessung eine Linie parallel zur unteren Endplatte bestimmt und kein Raum unterhalb der Linie für die Flächenmessung eingeschlossen (Sipola et al. 2011).

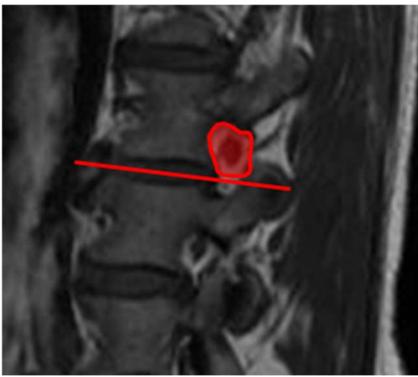


Abbildung 16: Messung der Querschnittsfläche des Foramen nervale

Die Abbildung 16 zeigt wie die Querschnittsfläche des Foramen nervale gemessen wurde. In T1-gewichteten Sagittalbildern wurde die Fläche des Nervenkanals unterhalb des Pedikels auf der Ebene der Nervenwurzel gemessen. Der Wirbelkörper, die Bandscheibe, das Ligamentum flavum und die Facettenverbindungen bilden die Grenzen des Nervenkanals. Die rote Linie verläuft parallel zur unteren Endplatte und bildet die kaudale Grenze der Flächenmessung (Sipola et al. 2011).

2.2.6.2.2 Qualitative Messung Neuroforamenstenose

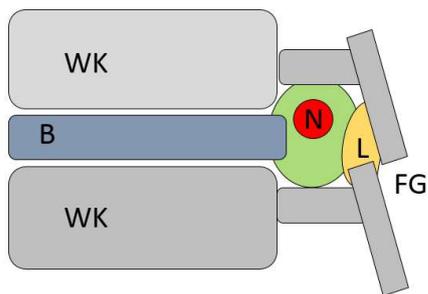


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Foramen nervalis und der anatomischen Nachbarstrukturen

Schematische Darstellung des sagittalen Querschnitts durch das Foramen zur Klassifizierung der Foramenstenose. Das kernspintomographische schematische Bild zeigt die Beziehung des Foramen nervalis mit angrenzenden anatomischen Strukturen.

NW: Nervenwurzel, WK: Wirbelkörper, B: Bandscheibe, L: Ligamentum flavum, FG: Facettengelenk

Die lumbale Foramenstenose wurde qualitativ nach Lee et al. klassifiziert. Anhand der sagittalen T1-gewichteten MRT-Bilder wurde die Foramenstenose in vier Grade eingeteilt.

- Bei Grad 0 liegt keine erkennbare Pathologie des Neuroforamens vor.
- Bei Grad 1 ist das perineurale Fett in transversaler oder vertikaler Richtung obliteriert. Es liegt keine Verformung der Nervenwurzel vor. Bei der transversalen Obliteration (Grad 1A) ist das Foramen u.a. durch das verdickte Ligamentum flavum eingeengt. Bei der vertikalen Obliteration (Grad 1B) ist das Foramen durch osteophytische Veränderungen eingeengt.
- Bei Grad 2 ist das perineurale Fett in allen 4 Raumrichtungen vermindert. Das Foramen nervalis ist u.a. aufgrund der Diskusraumverengung, eines verdickten Ligamentum flavum oder einer Facettengelenksarthrose eingeengt.
- Grad 3 bezeichnet eine schwere Form der Foramenstenose. Dabei kommt es zu einer morphologischen Veränderung oder Kollaps der Nervenwurzel (Lee et al. 2010)

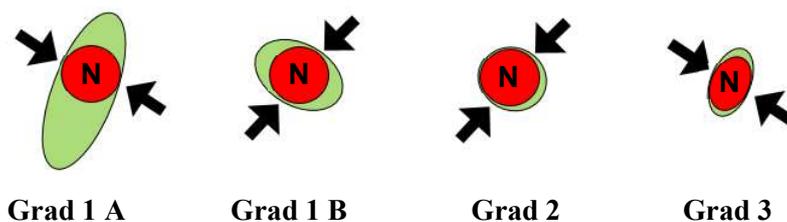


Abbildung 18: Schematische Darstellung zur Klassifizierung der Foramenstenose nach Lee

Die Abbildungen verdeutlichen schematisch die verschiedenen Klassifizierungsgrade der Foramenstenose. Grad 1 bezeichnet eine milde Form der Foramenstenose, bei der das perineurale Fett transversal (Grad 1A) oder vertikal (Grad 1B) obliteriert ist. Bei Grad 2 ist das perineurale Fett in allen 4 Raumrichtungen vermindert. Diese Pathologie wird als moderate Form der Foramenstenose eingestuft. Zusätzlich zu den in Grad 2 beobachteten Veränderungen liegt bei Grad 3, der schweren Form der Foramenstenose, eine Deformation der Nervenwurzel vor.

2.2.6.2.3 Qualitative Messung der Facettengelenkdegeneration

In axialen T2-gewichteten Bild beurteilten wir beidseits die Facettengelenke auf Höhe der Bandscheibe im sagittalen Schnitt. Dabei gingen wir nach der Technik von Weishaupt et al. vor. Die Facettengelenkdegeneration wurde anhand der Größe des Gelenkspalts, der Osteophytenbildung, der Hypertrophie der Facettengelenke, subartikulärer Knochenerosionen und subchondraler Zysten bestimmt (Weishaupt et al. 1999).

Tabelle 5: Einteilung der Facettengelenkdegeneration nach Weishaupt

Die Tabelle zeigt eine Übersicht über die Klassifizierungsgrade und der dazugehörigen Definition (Weishaupt et al. 1999).

| | |
|--------|---|
| Grad 0 | Normaler Gelenkspalt der Facette (2mm +/-4mm) |
| Grad 1 | Verengung des Facettengelenkspalt, kleine Osteophytenbildung und/oder Hypertrophie des Gelenkfortsatzes (< 2mm) |
| Grad 2 | Verengung des Gelenkspalt der Facette, moderate Osteophytenbildung und/oder stärkere Hypertrophie der Gelenkfortsätze und/oder subartikuläre Knochenerosionen |
| Grad 3 | Verengung des Gelenkspaltes der Facette, starke Osteophytenbildung und schwere Hypertrophie der Fortsätze und/oder schwere subartikuläre Knochenerosionen und/oder subchondrale Zystenbildung |

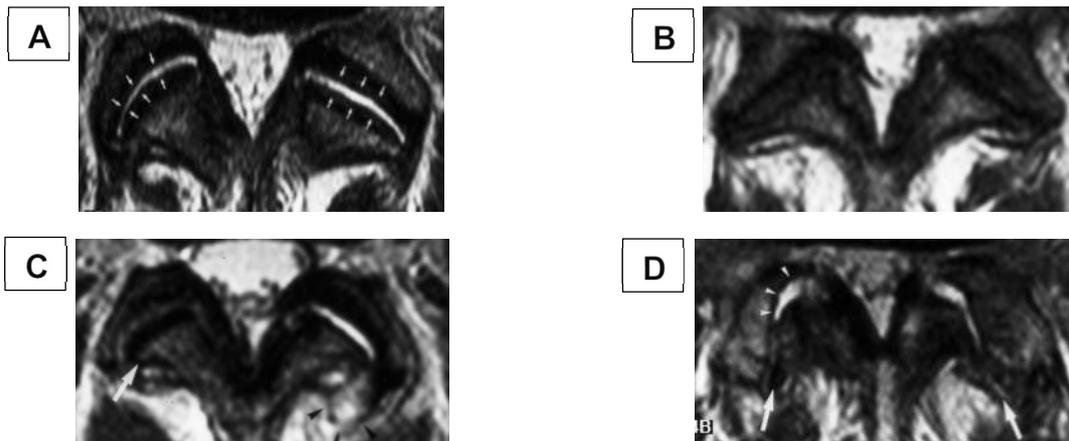


Abbildung 19: Klassifikation der Facettengelenkdegeneration

Die Abbildungen zeigen 4 unterschiedliche Facettengelenkdegeneration in axialen T2-gewichteten MRT-Bildern. Weishaupt teilt die Facettengelenkdegeneration in 3 Grade ein: Bild A: Grad 0 mit physiologischem Gelenkspalt. B: Grad 1 mit leichter Osteophytenbildung, C: Grad 2 mit mäßiger Osteophytenbildung (siehe Pfeil), D: Grad 3 mit Gelenkspaltverengung, Hypertrophie der Gelenkfortsätze und einer starken Osteophytenbildung (Weishaupt et al. 1999) mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlages.

2.2.6.2.4 Intraartikuläre Flüssigkeit der Facettengelenke

Die Facettengelenke wurden auf das Vorhandensein eines Gelenkergusses im axialen T2 MRT-Bild untersucht.

2.2.7 Statistische Analyse

Alle erhobenen Daten wurden mit Microsoft Office Excel 2016 verwaltet und mit IBM SPSS Statistics 24 statistisch ausgewertet.

Die Normalverteilung der Daten wurde anhand von Histogrammen überprüft. Dabei wurde der Mittelwert (Standardabweichung) bei normalverteilten Variablen und der Median (Minimum-Maximum) bei nicht normalverteilten Variablen verwendet.

Die Übereinstimmung zwischen den Untersuchern bei der Vergleichsmessung erfolgte für intervallskalierte Variablen über die Berechnung des unjustierten Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) 3.1 (zweifach gemischt, absolute Übereinstimmung). Der ICC kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen, wobei für die Validität ICC Werte möglichst nahe 1 erstrebenswert sind. Der Korrelationskoeffizient kann wie folgt eingeordnet werden:

- ICC $< 0,4$ = geringe Übereinstimmung
- ICC $0,4 < x < 0,59$ = mittelmäßige Übereinstimmung
- ICC $0,6 < x < 0,74$ = gute Übereinstimmung
- ICC $> 0,75$ = exzellente Übereinstimmung

Der Cohens-Kappa-Koeffizient (κ) wurde für ordinal und nominal skalierte Variablen berechnet. Für die Bewertung des Kappa Koeffizienten werden in dieser Arbeit die Werte nach Landis und Koch verwendet (Landis and Koch 1977).

Tabelle 6: Interpretation des Kappa Koeffizienten nach Landis und Koch

Tabellarische Auflistung der in der Studie verwendeten Interpretation des Kappa Koeffizienten nach Landis und Koch

| Korrelationskoeffizienten κ | Interpretation nach Landis und Koch |
|------------------------------------|---|
| $0,00 < \kappa < 0,20$ | Geringfügige („slight“) Übereinstimmung |
| $0,21 < \kappa < 0,40$ | Ausreichende („fair“) Übereinstimmung |
| $0,41 < \kappa < 0,60$ | Mittelmäßige („moderate“) Übereinstimmung |
| $0,61 < \kappa < 0,80$ | Beachtliche („substantial“) Übereinstimmung |
| $0,81 < \kappa < 1,00$ | Fast perfekte Übereinstimmung |

Für die statistische Auswertung wird der Student als Versuchsleiter (VL), der Wirbelsäulenchirurg, der für die Einarbeitung des Studenten zuständig war als Experte 1 (Exp1) und der zweite Wirbelsäulenchirurg als Experte 2 (Exp2) bezeichnet.

Bei der Studienmessung erfolgte der Vergleich von zwei unabhängigen Gruppen, in Abhängigkeit einer vorhandenen Normalverteilung, über den t-Test oder den Mann-Whitney-U-Test. Dementsprechend wurde bei Vorliegen einer Normalverteilung der t-Test und bei fehlender Normalverteilung der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Die Berechnung der Korrelation wurde mit Kendalls Tau durchgeführt. Alle aufgeführten p-Werte sind zweiseitig und haben ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.

Für die graphische Darstellung wurden neben Histogrammen, Balkendiagrammen, Streudiagrammen, Boxplots und Heatmaps gewählt.

3. Ergebnisse

Im Ergebnisteil werden zunächst die Ergebnisse der Übungsmessung vor und nach der Übung mit dem Experten 1 dargestellt. Im Anschluss werden die Daten der Vergleichsmessung dargestellt. Zuletzt werden die Ergebnisse der Studienmessung aufgezeigt. Die Ergebnisse werden hier in zwei Gruppen unterteilt:

- Ergebnisse nach epiduraler Infiltration
- Ergebnisse nach Facetteninfiltration

3.1 Demographische Daten

Die demographischen Daten der einzelnen Messungen und der verschiedenen Patientengruppen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 7: Demographische Daten

Tabellarische Darstellung der demographischen Daten aller Patientengruppen. Die Gruppe 1 stellt die Patienten der Übungsmessung dar. Die Patienten der Vergleichsmessung bilden die Gruppe 2. Gruppe 3 und 4 beinhaltet die Patienten der Studienmessung, dabei stellt Gruppe 3 die Patienten mit epiduraler Infiltration und Gruppe 4 mit Facettengelenkinfiltration dar.

| | Patienten- gruppen | Geschl. | Mittelw. | Standard- abw. | Median | Min | Max | Gültig N |
|-------|-----------------------|---------|----------|-------------------|--------|-----|-----|-------------|
| Alter | 1 | M | 54,00 | 11,55 | 54 | 44 | 64 | 4 |
| | | W | 65,63 | 12,88 | 67 | 48 | 85 | 16 |
| | | Gesamt | 63,30 | 13,22 | 64 | 44 | 85 | 20 |
| | 2 | M | 62,00 | 9,66 | 64 | 50 | 71 | 7 |
| | | W | 68,30 | 15,13 | 73 | 40 | 85 | 23 |
| | | Gesamt | 66,83 | 14,16 | 71 | 40 | 85 | 30 |
| | 3 | M | 64,91 | 15,32 | 68 | 23 | 90 | 46 |
| | | W | 67,46 | 13,54 | 68 | 32 | 91 | 54 |
| | | Gesamt | 66,29 | 14,37 | 68 | 23 | 91 | 150 |
| | 4 | M | 53,55 | 13,79 | 55 | 28 | 84 | 20 |
| | | W | 59,73 | 13,74 | 57 | 39 | 95 | 30 |
| | | Gesamt | 57,26 | 13,96 | 57 | 28 | 95 | 50 |

Im Hinblick auf den Faktor Alter lag bei allen vier Patientengruppen keine Normalverteilung vor. Bei der Studienmessung der Patienten mit epiduraler Infiltration formieren sich zwei Altersspitzen zwischen 55 und 80 Jahren. Ebenso liegen bei den Patienten der Facettengelenkinfiltration zwei Altersgipfel bei 50 und 65 vor.

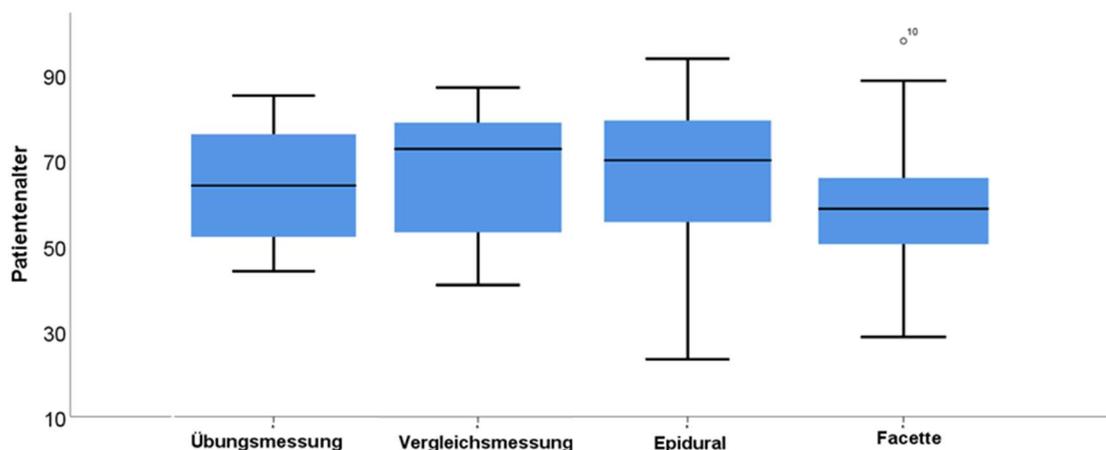


Abbildung 20: Demographische Daten

Darstellung des Patientenalters bei der Übungsmessung, der Vergleichsmessung und der Studienmessung. Die Studienmessung wird unterteilt in die epidurale Infiltration (Epidural) und die Facetteninfiltration (Facette).

3.2 Darstellung der einzelnen Segmenthöhen

Bei der Übungsmessung wurden insgesamt 20 Probanden vermessen. Die häufigste vermessene Segmenthöhe war hier auf Höhe L4/L5 mit 10 Probanden (50%).

Bei der Vergleichsmessung wurden 30 Probanden untersucht. Hierbei zeigt sich die Segmenthöhe L4/L5 mit 11 Probanden als häufigste vermessene Segmenthöhe (36,7%), gefolgt von der Segmenthöhe L3/L4 mit 9 Probanden (30%), sowie der Höhe L5/S1 mit 8 untersuchten Patienten (26,7%). Des Weiteren wurden 2 Probanden auf der Segmenthöhe L2/L3 vermessen (6,7%).

Bei der Studienmessung der epiduralen Infiltration wurden insgesamt 100 Patienten auf unterschiedlicher Segmenthöhe infiltriert und vermessen. Hierbei zeigte sich die Segmenthöhe L4/L5 als häufigste vermessene Höhe mit 38 Probanden (38%). Als zweit häufigste gemessene Segmenthöhe zeigte sich die Höhe L3/L4 mit 32 Probanden (32%).

L5/S1 wurden bei 25 Patienten infiltriert und vermessen (25%). Das Segment L2/L3 wurde nur bei 5 Patienten von insgesamt 100 Patienten (5%) infiltriert.

Die Messung der Patienten mit der erhaltenden Facetteninfiltration konzentrierte sich ebenfalls auf die Segmenthöhe L4/L5 mit 24 gemessenen Patienten bei insgesamt 50 untersuchten Patienten (48%). Die Segmenthöhe L5/S1 wurde bei 21 Patienten infiltriert und gemessen (44%). Die Segmenthöhen L3/L4 und L2/L3 wurden jeweils 2-mal untersucht (4%).

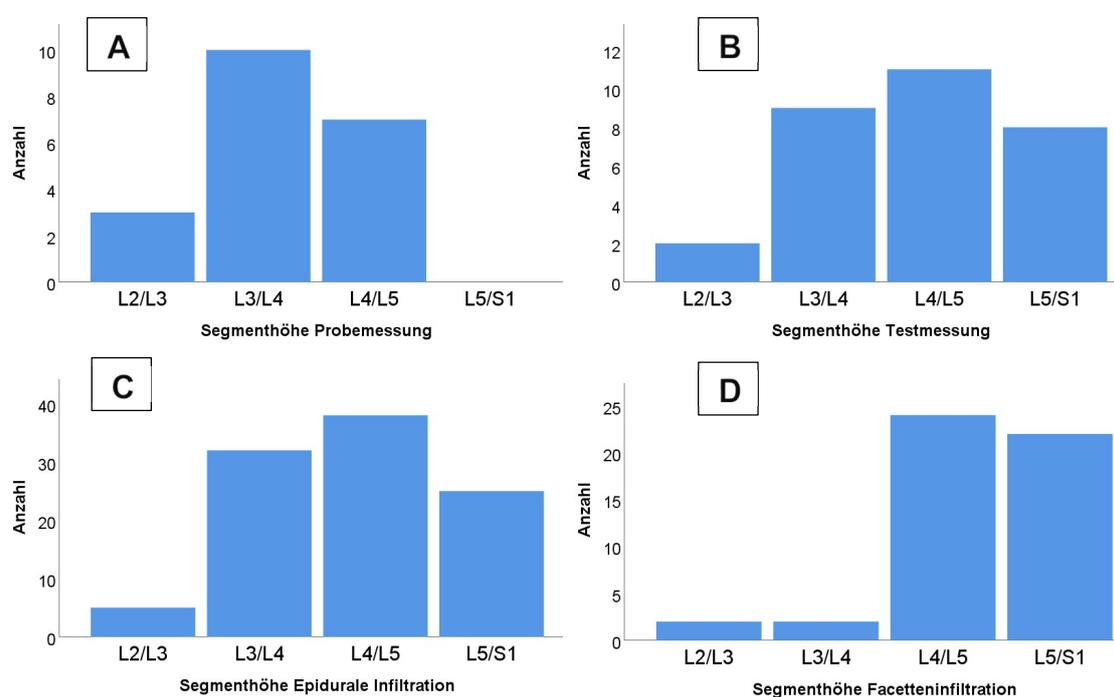


Abbildung 21: Darstellung der einzelnen Segmenthöhen

In den oben dargestellten Graphen wurden die einzelnen Segmenthöhen nach ihrer Häufigkeit in den unterschiedlichen Messungen mittels eines Balkendiagramms dargestellt. Diagramm A zeigt die unterschiedlichen Segmenthöhen der Übungsmessung. Die Segmenthöhen der Vergleichsmessung werden im Diagramm B dargestellt. Die Segmenthöhen der Studienmessungen sind unter C bei erhaltender epiduraler Infiltration und D bei Facetteninfiltration dargestellt.

3.3 Übungsmessung

In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen werden die Messungen des VL vor und nach der Übung mit dem Exp1 analysiert. Hierbei werden die Messwerte des VL mit denen des Exp1 verglichen und dargestellt. Die Messwerte werden mit Hilfe der Bland-Altman-Plots visualisiert. Die Korrelation zwischen den erhobenen Messwerten des VL und denen des Exp1 wird mit Hilfe des Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC 3.1) angegeben. Die ordinal und nominal skalierten Messparameter wurden mit dem Kappa Koeffizient berechnet.

3.3.1 Messergebnisse der Spinalkanalstenose vor/nach der Übung mit dem Experten

Bei der Übungsmessung zur Bestimmung der Messwerte der Spinalkanalstenose zeigen sich sehr hohe Übereinstimmungen der Messwerte zwischen dem Versuchsleiter und dem Experten 1 nach dem Expertentraining. Insgesamt sind sowohl bei den quantitativen Parametern (höherer ICC Wert nach dem Expertentraining), als auch bei den qualitativen Parametern (Kappa Koeffizient nach dem Training erhöht) die Übereinstimmung der Messwerte höher als vor dem Expertentraining.

3.3.1.1 *Quantitative Parameter*

In den folgenden Tabellen und Diagrammen sind die Korrelationskoeffizienten der quantitativen Messparameter der Spinalkanalstenose bei der Übungsmessung vor und nach dem Expertentraining dargestellt.

3.3.1.1.1 Sagittaler Durchmesser Duralsack

Der Duralsack wurde in vier verschiedenen Höhen sagittal ausgemessen (s. Abschnitt 2.2.6.1.1.1).

Sagittaler Durchmesser des Duralsacks auf Höhe 1

Tabelle 8: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 1 bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation von VL und Exp1 jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 1 (½ Wirbelkörper unterhalb der Bandscheibe des gemessenen Segmentes).

N = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | N | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|--|----|-----------|----------------------------|
| Sagittalen Durchmesser Duralsacks Höhe 1 | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,855 | 0,674-0,940 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,995 | 0,987-0,998 |

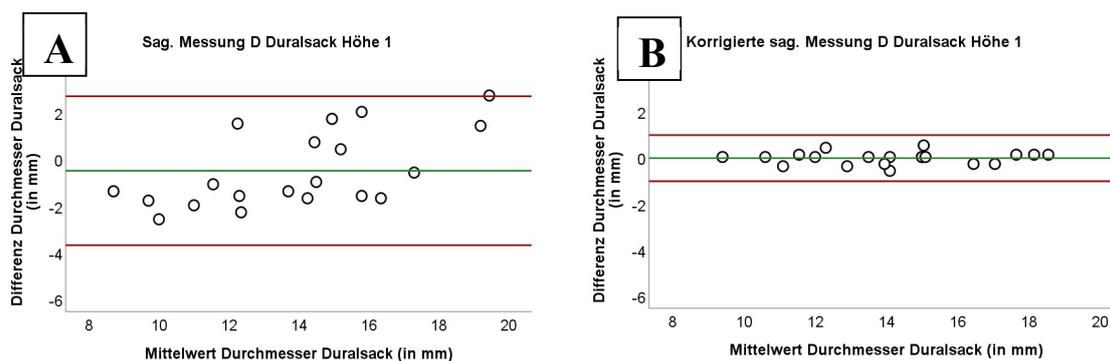


Abbildung 22: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 1 bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks in Höhe 1 vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

Sagittaler Durchmesser des Duralsacks auf Höhe 2

Tabelle 9: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 2 bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation von VL und Exp1 jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 2 ($\frac{1}{2}$ Wirbelkörper oberhalb der Bandscheibe des gemessenen Segmentes).

N = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | N | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|---|----|-----------|----------------------------|
| Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 2 | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,777 | 0,525-0,905 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,996 | 0,989-0,998 |

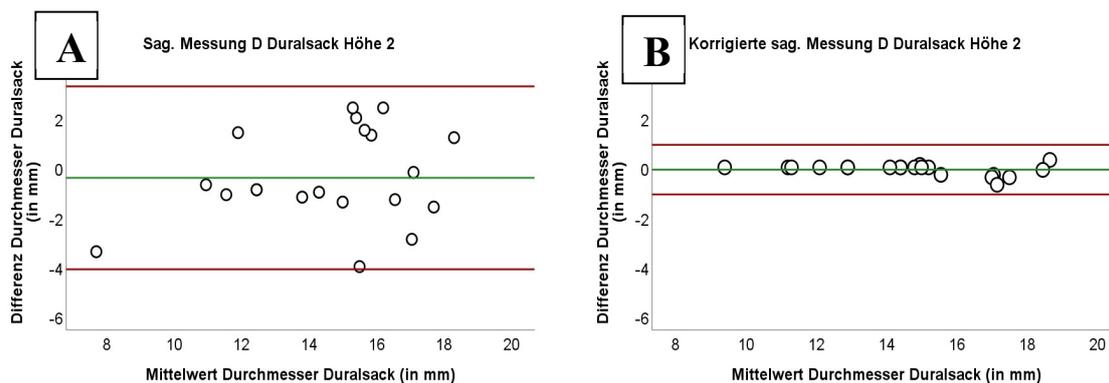


Abbildung 23: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 2 bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks in Höhe 2 vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

Sagittaler Durchmesser des Duralsacks auf Höhe 3

Tabelle 10: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 3 bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation von VL mit Exp1 jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 3 (auf Höhe der Bandscheibe des gemessenen Segmentes).

N = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | N | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|--|----|-----------|----------------------------|
| Sagittaler Durchmesser Duralsacks Höhe 3 | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,759 | 0,492-0,897 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,996 | 0,991-0,999 |

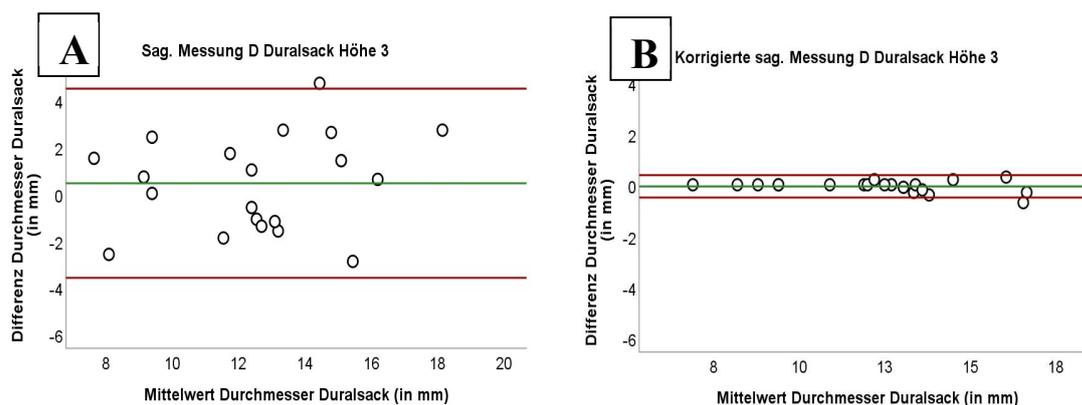


Abbildung 24: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 3 bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks in Höhe 3 vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

Sagittaler Durchmesser des Duralsacks auf Höhe 4

Tabelle 11: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 4 bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation von VL mit Exp1 jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 4 (engste Stelle des Querschnitts des Duralsacks).

N = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | N | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|---|----|-----------|----------------------------|
| Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 4 | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,804 | 0,573-0,917 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,993 | 0,981-0,997 |

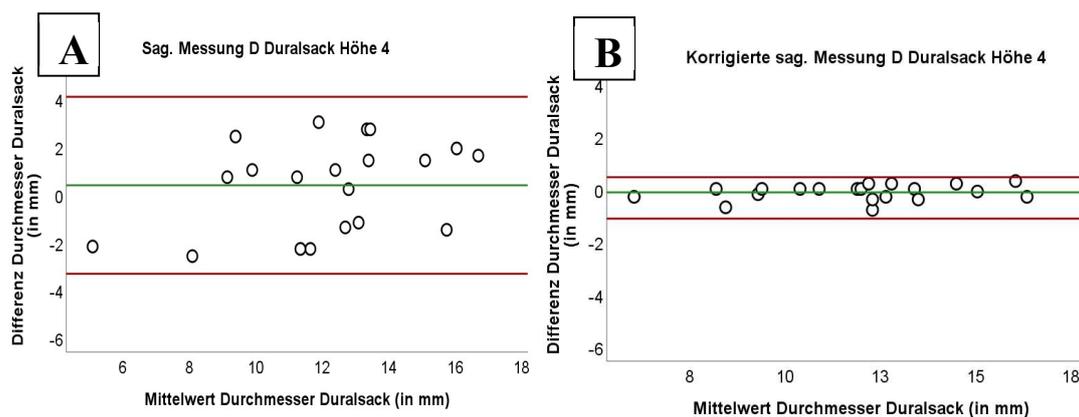


Abbildung 25: Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 4 bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks in Höhe 4 vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

3.3.1.1.2 Interlaminärer Abstand (transversaler Durchmesser Duralsack)

Tabelle 12: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des interlaminären Abstandes auf Höhe der Bandscheibe bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation von VL mit Exp1 jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters des interlaminären Abstandes, bzw. des transversalen Durchmessers des Duralsacks, auf Höhe der Bandscheibe.

N = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | N | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|---|----|-----------|------------------------|
| Transversaler Durchmesser des Duralsacks auf Höhe der Bandscheibe | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,728 | 0,433-0,883 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,990 | 0,974-0,996 |

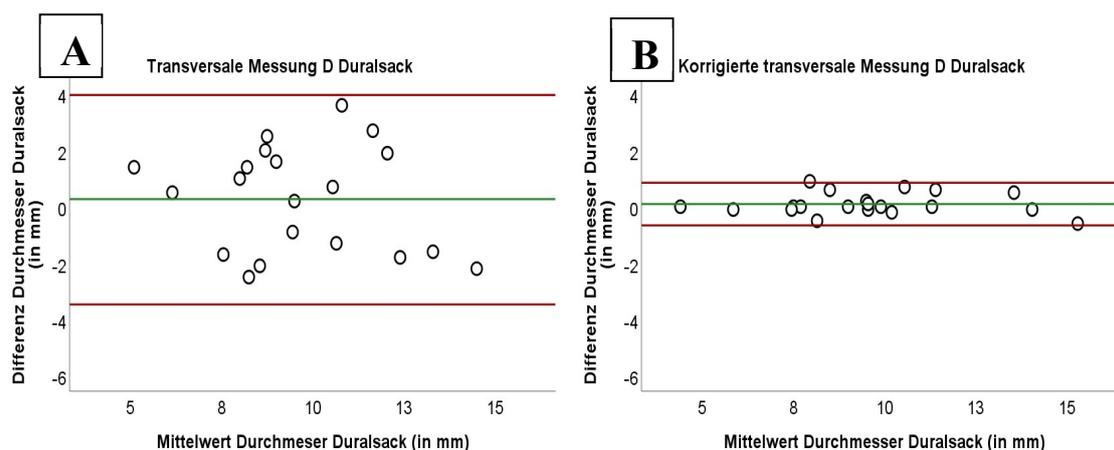


Abbildung 26: Interlaminärer Abstand bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung des interlaminären Abstandes (transversalen Durchmessers des Duralsacks) auf Höhe der Bandscheibe vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

3.3.1.1.3 Fläche des Duralsacks

Tabelle 13: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche des Duralsacks auf Höhe der Bandscheibe bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation des Versuchsleiters mit dem Experten jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters der Fläche des Duralsacks auf Höhe der Bandscheibe.

N = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|--|----|-----------|----------------------------|
| Fläche des Spinalkanals auf Höhe der Bandscheibe | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,876 | 0,718-0,949 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,995 | 0,985-0,998 |

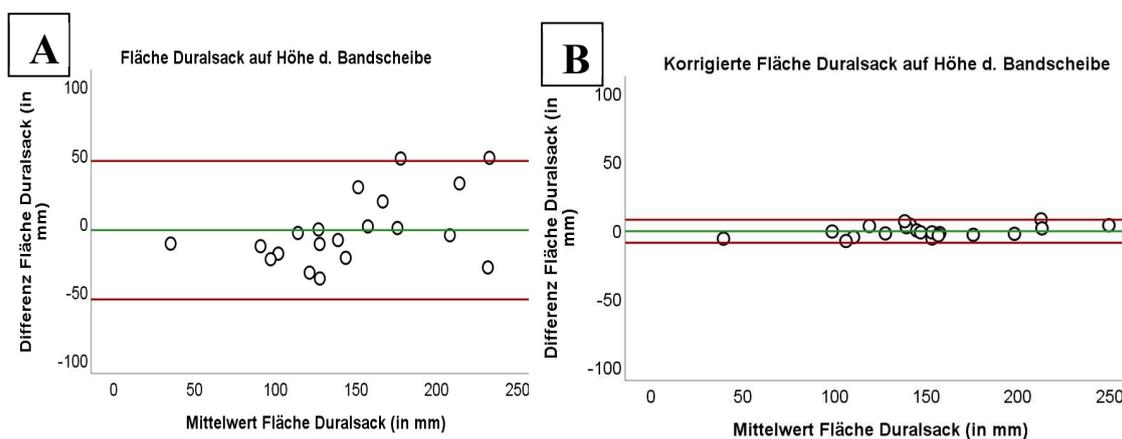


Abbildung 27: Fläche Duralsack axial bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung der axialen Fläche des Duralsacks auf Höhe der Bandscheibe vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

3.3.1.1.4 Posteriore Bandscheibenhöhe

Tabelle 14: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der posterioren Bandscheibenhöhe bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation des Versuchsleiters mit dem Experten jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters der posterioren Bandscheibenhöhe.

N = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|-----------------------------|----|-----------|------------------------|
| Posteriore Bandscheibenhöhe | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,731 | 0,432-0,885 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,977 | 0,942-0,991 |

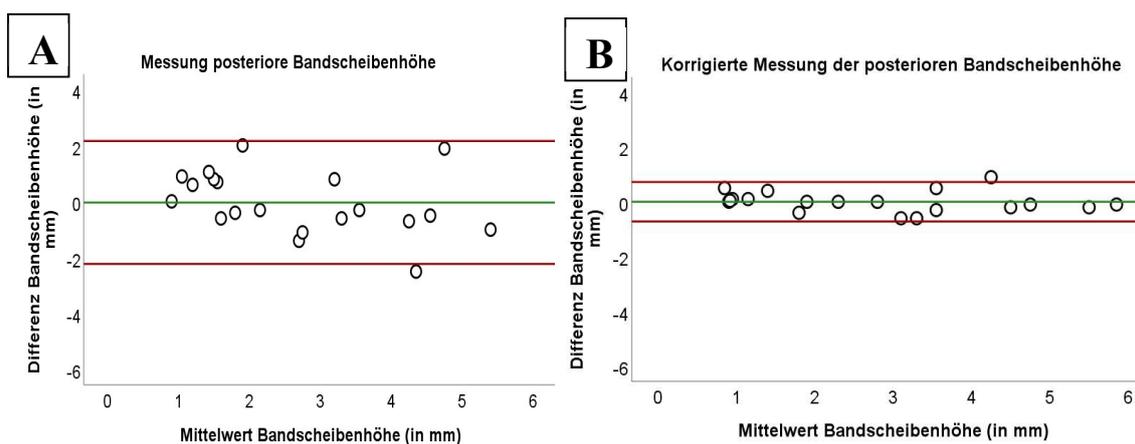


Abbildung 28: Posteriore Bandscheibenhöhe bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung der posterioren Bandscheibenhöhe vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

3.3.1.2 Qualitative Parameter

3.3.1.2.1 Spinalkanalstenose

Tabelle 15: Korrelation der qualitativen Beurteilung der Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Übungsmessung

In der folgenden Tabelle wurden die von VL und Exp1 gemessenen Werte gegenübergestellt, so dass mit Hilfe der Berechnung des Cohen's Kappa deren Übereinstimmung bestimmt werden konnte. Auch hier wurden die Messwerte vor der Übung mit dem Experten, sowie die Werte nachdem Training aufgezeigt.

n = Anzahl, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | N | Kappa |
|--|----|-------|
| Spinalkanalstenose in axialem T2-Bild nach Schizas | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,133 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 1,000 |

| A | Spinal qualitativ (Schizas) Exp1 | | | | | Gesamt |
|--------------------------------|----------------------------------|----|----|---|---|--------|
| | A1 | A2 | A3 | B | C | |
| Nicht Korrigiert: | | | | | | |
| Spinal qualitativ (Schizas) VL | A1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | A2 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| | A3 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| | A4 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| | C | 0 | 1 | 3 | 0 | 1 |
| Gesamt | | 4 | 6 | 8 | 1 | 1 |
| | | | | | | 20 |

| B | Spinal qualitativ (Schizas) Exp1 | | | | | Gesamt |
|--------------------------------|----------------------------------|----|----|---|---|--------|
| | A1 | A2 | A3 | B | C | |
| Korrigiert: | | | | | | |
| Spinal qualitativ (Schizas) VL | A1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | A2 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| | A3 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| | B | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Gesamt | | 4 | 6 | 8 | 1 | 1 |
| | | | | | | 20 |

Abbildung 29: Klassifikation Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Übungsmessung

Heat Map zur Darstellung der Spinalkanalstenose. Hierbei werden die Ergebnisse des VL vor (A) und nach der Übung (B) mit den Ergebnissen des Exp1 verglichen.

VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

3.3.2 Messergebnisse der Foramenstenose vor und nach der Übung mit den Experten

Bei der Übungsmessung zur Bestimmung der Messwerte der Foramenstenose zeigen sich sehr hohe Übereinstimmungen der Messwerte zwischen dem Versuchsleiter und dem Experten 1 nach dem Expertentraining.

3.3.2.1 Quantitative Parameter

3.3.2.1.1 Durchmesser des linken Foramens auf Höhe der Bandscheibe

Tabelle 16: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Durchmessers des linken Foramens bei der Übungsmessung

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|---|----|-----------|----------------------------|
| Durchmesser des linken Neuroforamens auf Höhe der Bandscheibe | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,572 | 0,144-0,812 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,986 | 0,963-0,995 |

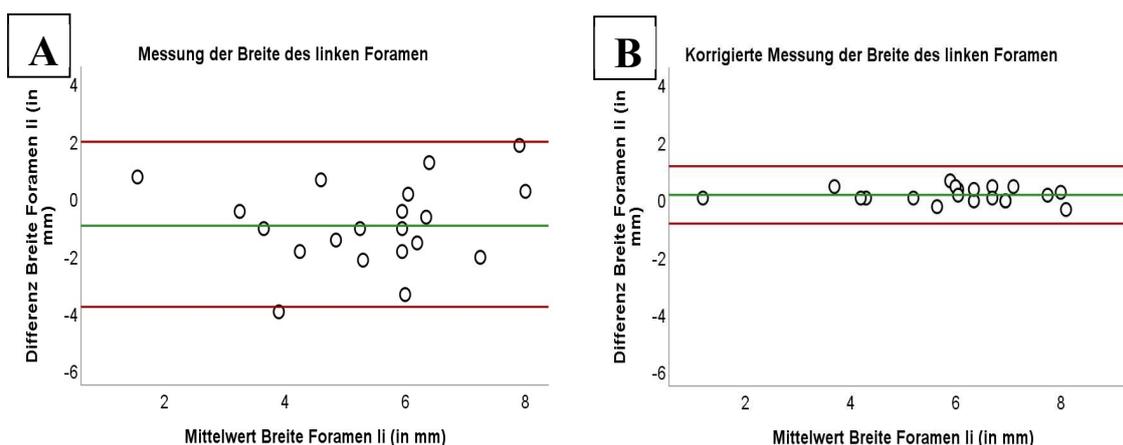


Abbildung 30: Durchmesser des linken Foramen bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung des Durchmessers des linken Foramen bei der Übungsmessung vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

3.3.2.1.2 Fläche des linken Foramens

Tabelle 17: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche des linken Foramens (Sipola) bei der Übungsmessung

Die Tabelle zeigt die Korrelation von VL mit dem Exp1 jeweils vor und nach der gemeinsamen Übung anhand des Messparameters der Fläche des linken Foramens in axialer Ebene auf Höhe der Bandscheibe.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|------------------------------------|----|-----------|------------------------|
| Fläche des linken Foramen (Sipola) | | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,786 | 0,543-0,909 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,955 | 0,778-0,986 |

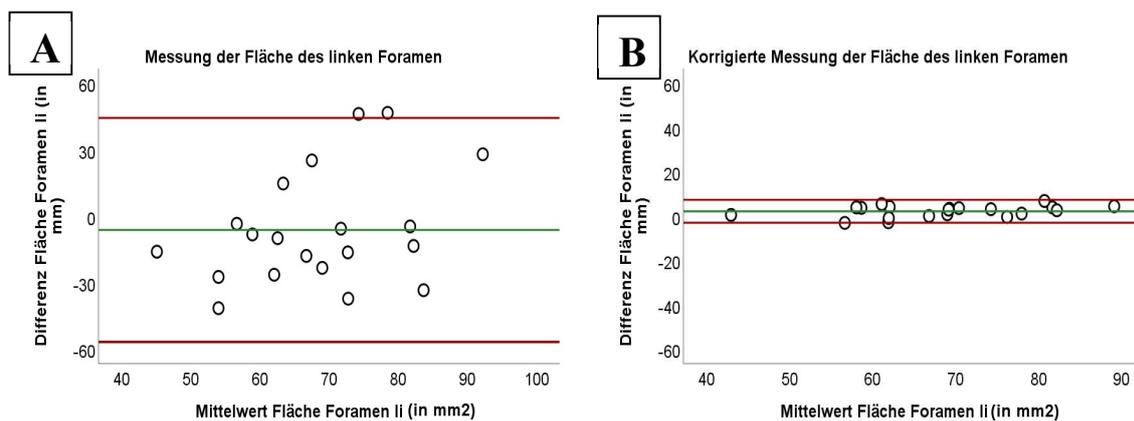


Abbildung 31: Fläche des linken Foramens (Sipola) bei der Übungsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellung der Korrelation zwischen VL und Exp1 bei der Messung der Fläche des linken Foramens (Sipola) bei der Übungsmessung vor (A) und nach (B) der Übung mit Exp1.

D = Durchmesser, Exp1 = Experte 1

3.3.2.2 Qualitative Parameter

3.3.2.2.1 Klassifikation der Neuroforamenstenose nach Lee

Tabelle 18: Korrelation der Klassifikation der Neuroforamenstenose (Lee)

In der folgenden Tabelle wurde die von VL mit Exp1 gemessenen Werte gegenübergestellt, so dass mit Hilfe der Berechnung des Cohen's Kappa deren Übereinstimmung bestimmt werden konnte. Auch hier wurden die Messwerte vor der Übung mit dem Experten, sowie die Werte nachdem Training aufgezeigt

n = Anzahl, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | n | Kappa |
|------------------------------|----|-------|
| Neuroforamenstenose nach Lee | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,291 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 1,000 |

| A | Foramen Qualitativ links (Lee) Exp1 | | | | Gesamt |
|-------------------|-------------------------------------|---|---|---|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| Nicht korrigiert: | | | | | |
| 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| 1 | 5 | 4 | 0 | 0 | 9 |
| 2 | 0 | 4 | 2 | 0 | 6 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Gesamt | 7 | 9 | 2 | 2 | 20 |

| B | Foramen Qualitativ links (Lee) Exp1 | | | | Gesamt |
|-------------|-------------------------------------|---|---|---|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| Korrigiert: | | | | | |
| 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 1 | 0 | 9 | 0 | 0 | 9 |
| 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Gesamt | 7 | 9 | 2 | 2 | 20 |

Abbildung 32: Klassifikation Neuroforamenstenose (Lee) bei der Übungsmessung

Heat Map zur Darstellung der Neuroforamenstenose. Hierbei werden die Ergebnisse des VL vor (A) und nach der Übung (B) mit den Ergebnissen des Exp1 verglichen.

VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

3.3.2.2.1 Klassifikation Facettengelenkdegeneration nach Weishaupt

Tabelle 19: Korrelation der qualitativen Beurteilung der Facettengelenkdegeneration (Weishaupt)

In der folgenden Tabelle wurde die Übereinstimmung von VL und Exp1 anhand des Cohen's Kappa bestimmt. Auch hier wurden die Messwerte vor der Übung mit Exp1., sowie die Werte nach dem Training aufgezeigt.

n = Anzahl, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

| Korrelation | n | Kappa |
|---|----|-------|
| Facettengelenkdegeneration nach Weishaupt | | |
| VL vor der Übung mit Exp1 | 20 | 0,152 |
| VL nach der Übung mit Exp1 | 20 | 0,761 |

| A | Facetten qualitativ links (Weißhaupt) | | | | Gesamt |
|--------------------------------------|---------------------------------------|----|---|---|--------|
| | Exp1 | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| Nicht korrigiert | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Facette qualitativ links (Weißhaupt) | 1 | 2 | 4 | 1 | 7 |
| VL | 2 | 0 | 6 | 1 | 8 |
| | 3 | 0 | 0 | 2 | 4 |
| Gesamt | 3 | 10 | 4 | 3 | 20 |

| B | Facetten qualitativ links (Weißhaupt) | | | | Gesamt |
|--|---------------------------------------|----|----|---|--------|
| | Exp1 | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| Korrigiert Facette qualitativ links (Weißhaupt) VL | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 1 | 2 | 10 | 0 | 12 |
| | 2 | 0 | 0 | 4 | 5 |
| | 3 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Gesamt | 3 | 10 | 4 | 3 | 20 |

Abbildung 33: Klassifikation Facettengelenkdegeneration (Weishaupt) bei der Übungsmessung

Heat Map zur Darstellung der Facettengelenksdegeneration. Hierbei werden die Ergebnisse des VL vor (A) und nach der Übung (B) mit den Ergebnissen des Exp1 verglichen

VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1

3.4 Vergleichsmessung

Die Korrelation zwischen VL, Exp1 und dem Exp2 wurde bei der Vergleichsmessung mittels des Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC 3.1) beschrieben. Die nominal skalierten Messparameter wurden mit Hilfe des Cohen's Kappa aufgezeigt. Die graphische Darstellung erfolgt für die intervallskalierten Variablen über Bland-Altman-Plot Diagramme. Hierbei werden die Mittelwerte der Messungen zu der Differenz der Messparameter der Untersucher aufgezeigt. Über die Heat-Map Diagramme werden die Ergebnisse der einzelnen Messklassifikationsparameter der jeweiligen Untersucher verglichen. Dabei werden über Farben die Häufigkeit der Übereinstimmungen zwischen den Untersuchern hervorgehoben.

3.4.1 Korrelation Messparameter Spinalkanalstenose

3.4.1.1 Quantitative Messparameter

3.4.1.1.1 Sagittaler Durchmesser des Duralsacks

Der Duralsack wurde in vier verschiedenen Höhen sagittal ausgemessen (s. Abschnitt 2.2.6.1.1.1)

Vergleicht man die Messwerte aller Untersucher (VL, Exp1 und Exp2) bei der Bestimmung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks, so zeigen sich hohe ICC Werte. Dies spiegelt die hohe Korrelation der einzelnen Messungen wieder. Bei der Bestimmung des sagittalen Durchmessers auf Höhe 4 zeigt sich ein sehr hoher ICC Wert von 0,889. Auf den Höhen 1, 2 und 3 zeigen sich geringere Korrelationen verglichen mit der Vermessungshöhe 4. Hier liegen ICC Werte zwischen 0,700 – 0,805 vor. Bei Betrachtung der Messwerte zweier Untersucher zeigt sich eine deutlich höhere Korrelation, bzw. höhere ICC Werte, bei den Untersuchern VL und Exp1. Hierbei sind bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks ICC Werte von 0,973-0,980 abgebildet.

Sagittaler Durchmesser des Duralsacks auf Höhe 1

Tabelle 20: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 1 bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist die Korrelation von VL, Exp 1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 1 angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|--|----|-----------|------------------------|
| Sagittalen Durchmesser Duralsacks Höhe 1 | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 29 | 0,715 | 0,374-0,871 |
| VL und Exp1 | 29 | 0,974 | 0,945-0,988 |
| VL und Exp2 | 30 | 0,568 | 0,023-0,814 |
| Exp1 und Exp2 | 29 | 0,638 | 0,061-0,856 |

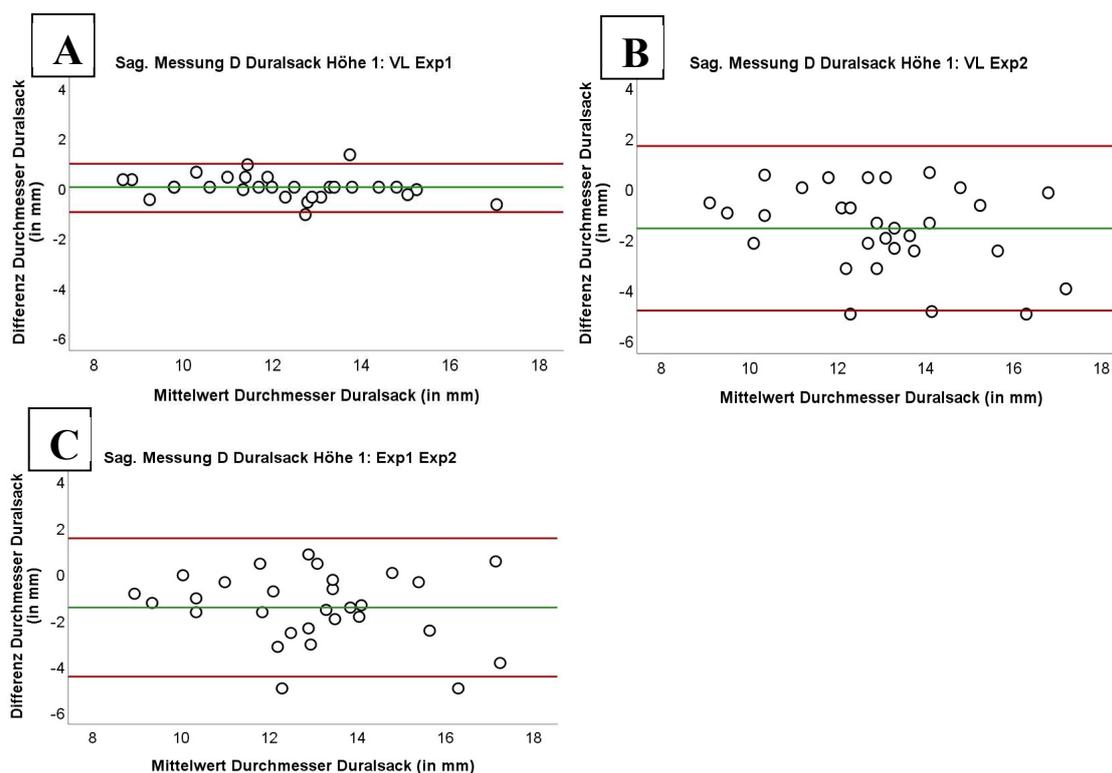


Abbildung 34: Sagittaler Durchmesser des Duralsack Höhe 1 bei der Vergleichsmessung

Bland-Altman-Plot Darstellungen der Korrelation zwischen VL/ Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 ((C) bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 1.

D = Durchmesser, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1, Exp2 = Experte 2

Sagittaler Durchmesser des Duralsackes auf Höhe 2

Tabelle 21: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 2 bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation von VL, Exp1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 2 angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|--|----|-----------|------------------------|
| Sagittalen Durchmesser Duralsacks Höhe 2 | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 30 | 0,805 | 0,404-0,925 |
| VL und Exp1 | 30 | 0,973 | 0,944-0,987 |
| VL und Exp2 | 30 | 0,601 | 0,025-0,836 |
| Exp1 und Exp2 | 30 | 0,738 | 0,001-0,916 |

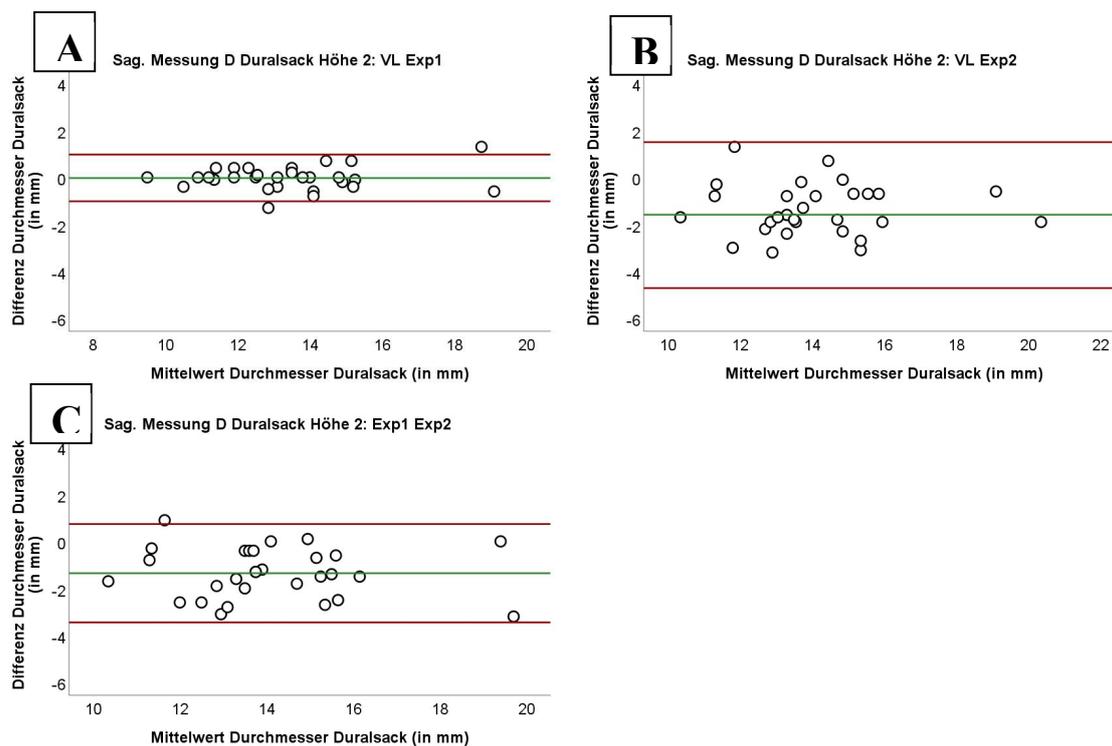


Abbildung 35: Sagittaler Durchmesser des Duralsack Höhe 2 bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 2.

D = Durchmesser, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1, Exp2 = Experte 2

Sagittaler Durchmesser des Duralsackes auf Höhe 3

Tabelle 22: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 3 bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation von VL, Exp1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 3 angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|--|----|-----------|------------------------|
| Sagittalen Durchmesser Duralsacks Höhe 3 | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 30 | 0,700 | 0,337-0,865 |
| VL und Exp1 | 30 | 0,980 | 0,958-0,990 |
| VL und Exp2 | 30 | 0,582 | 0,010-0,826 |
| Exp1 und Exp2 | 30 | 0,601 | 0,018-0,837 |

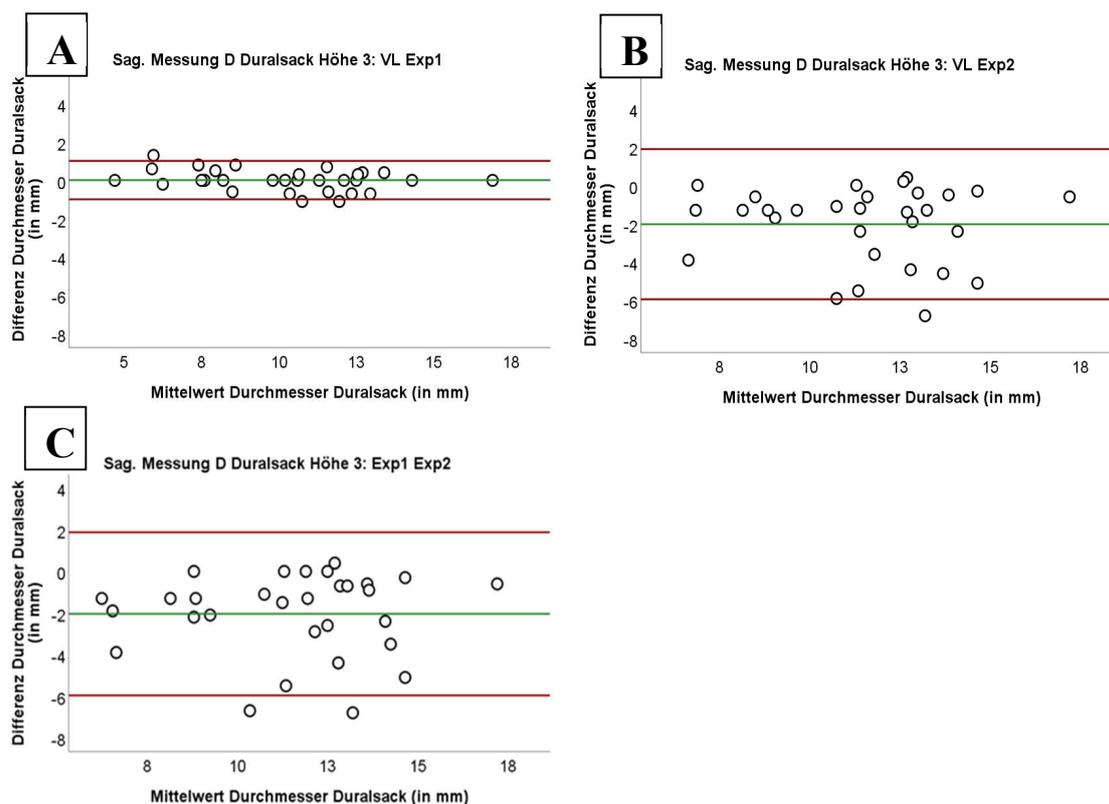


Abbildung 36: Sagittaler Durchmesser des Duralsacks Höhe 3 bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 3.

D = Durchmesser, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1, Exp2 = Experte 2

Sagittaler Durchmesser des Duralsackes auf Höhe 4

Tabelle 23: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 4 bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation von VL, Exp1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 4 angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|---|----|-----------|------------------------|
| Sagittaler Durchmesser Duralsack Höhe 4 | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 29 | 0,889 | 0,733-0,951 |
| VL und Exp1 | 30 | 0,979 | 0,957-0,990 |
| VL und Exp2 | 29 | 0,834 | 0,477-0,935 |
| Exp1 und Exp2 | 29 | 0,857 | 0,482-0,947 |

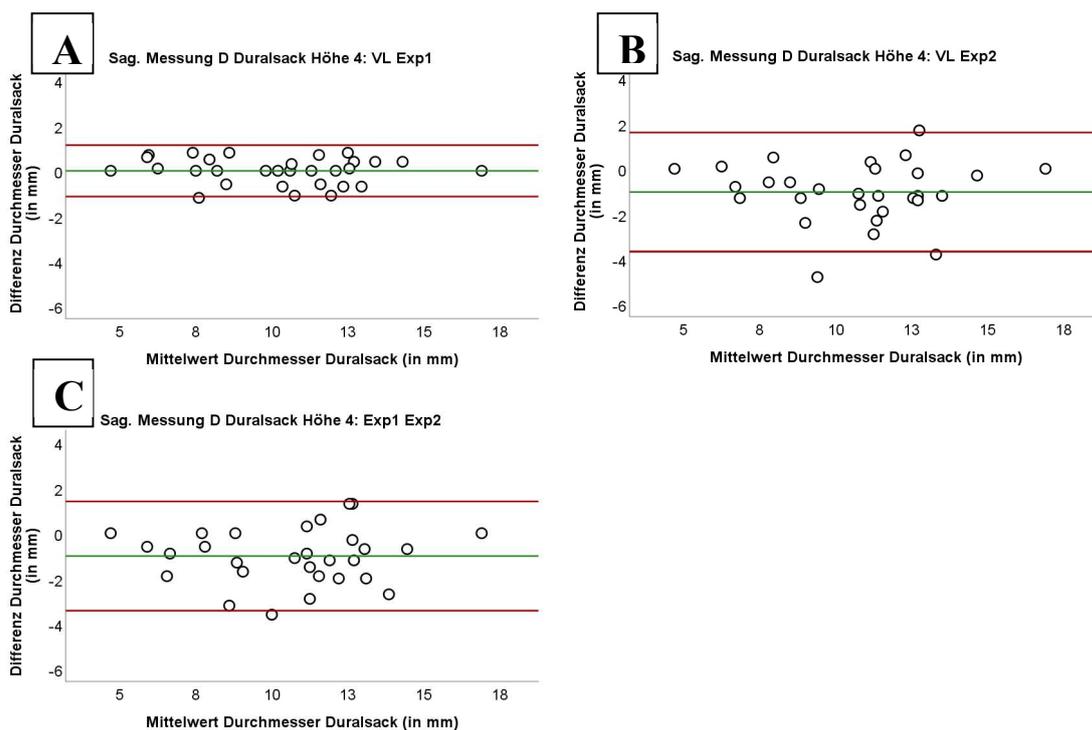


Abbildung 37: Sagittaler Durchmesser des Duralsacks Höhe 4 bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsacks auf Höhe 4.

D = Durchmesser, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1, Exp2 = Experte 2

3.4.1.1.2 Interlaminärer Abstand (transversaler Durchmesser des Duralsacks)

Für den interlaminären Abstand zeigen sich bei allen Vergleichen der Messungen unter den Untersuchern sehr hohe ICC Werte (0,945-0,975).

Tabelle 24: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des interlaminären Abstandes bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation von VL, Exp1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung des interlaminären Abstandes (transversalen Durchmessers des Duralsacks) angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|--------------------------------------|---|-----------|------------------------|
| Transversaler Durchmesser Duralsacks | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | | 0,961 | 0,930-0,980 |
| VL und Exp1 | | 0,975 | 0,948-0,988 |
| VL und Exp2 | | 0,945 | 0,887-0,974 |
| Exp1 und Exp2 | | 0,955 | 0,908-0,979 |

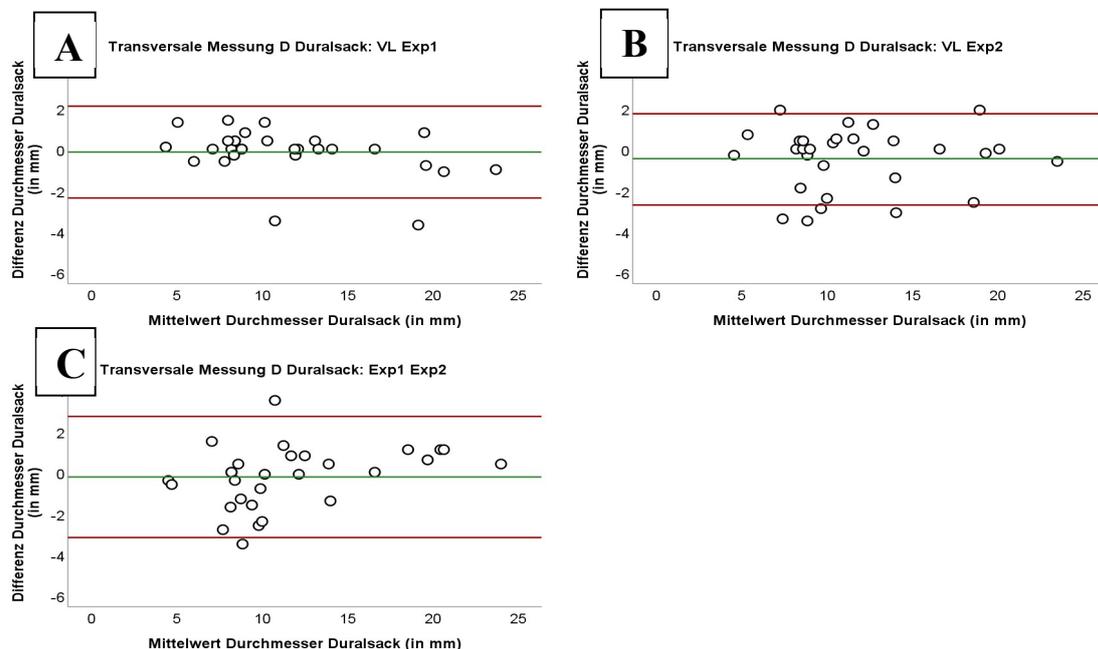


Abbildung 38: Interlaminärer Abstand bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung des interlaminären Abstandes (transversalen Durchmessers des Duralsacks).

3.4.1.1.3 Fläche des Duralsacks

Bei der Flächenmessung des Duralsacks zeigen sich insgesamt ebenfalls hohe Übereinstimmungen der Messwerte (hohe ICC Wert), vor allem bei dem Vergleich der Untersucher VL und Exp1 zeigt sich eine deutlich höhere Korrelation (0,972).

Tabelle 25: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche des Duralsacks bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation von VL, Exp1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung der Fläche des Duralsacks angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|--|----|-----------|------------------------|
| Fläche des Spinalkanals auf Höhe der Bandscheibe | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 28 | 0,888 | 0,789-0,945 |
| VL und Exp1 | 30 | 0,972 | 0,942-0,986 |
| VL und Exp2 | 28 | 0,842 | 0,636-0,929 |
| Exp1 und Exp2 | 28 | 0,863 | 0,697-0,937 |

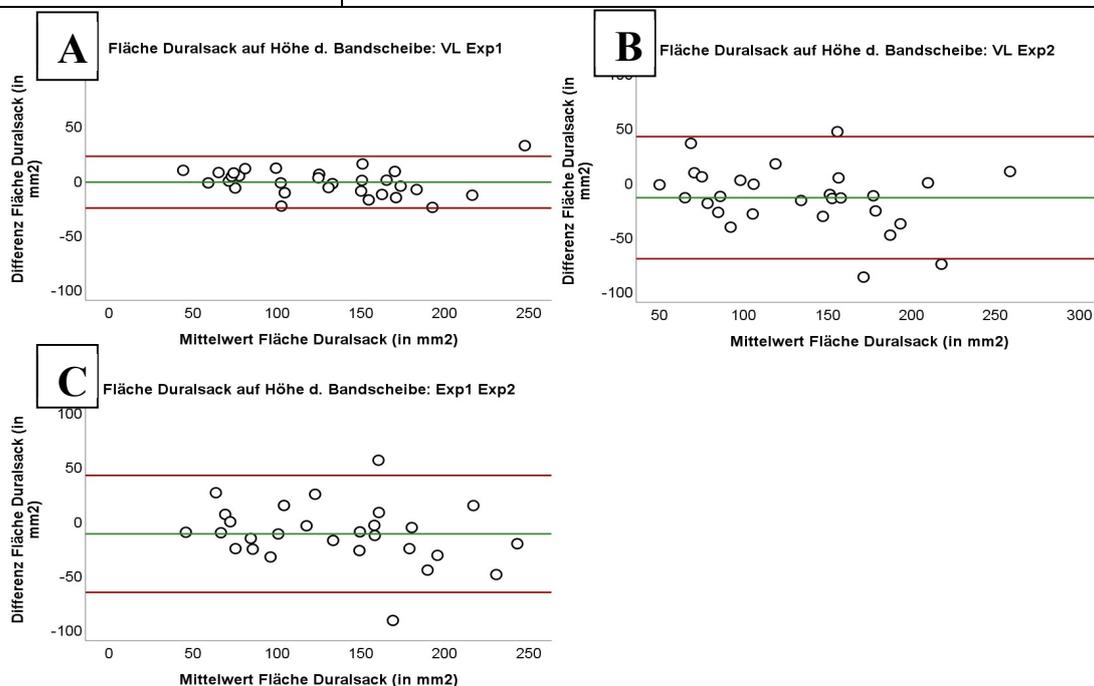


Abbildung 39: Fläche des Duralsackes bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung der Fläche des Duralsacks auf Höhe der Bandscheibe.

3.4.1.1.4 Posteriore Bandscheibenhöhe

Bei der Messung der posterioren Bandscheibenhöhe ist die Korrelation zwischen VL und Exp2 deutlich niedriger (0,550), im Vergleich zu der Korrelation zwischen VL und Exp1 (0,892).

Tabelle 26: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der posterioren Bandscheibenhöhe bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation von VL, Exp1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung der posterioren Bandscheibenhöhe angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|-----------------------------|----|-----------|------------------------|
| Posteriore Bandscheibenhöhe | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 29 | 0,701 | 0,214-0,882 |
| VL und Exp1 | 29 | 0,892 | 0,686-0,956 |
| VL und Exp2 | 30 | 0,550 | -0,095-0,837 |
| Exp1 und Exp2 | 29 | 0,700 | -0,029-0,901 |

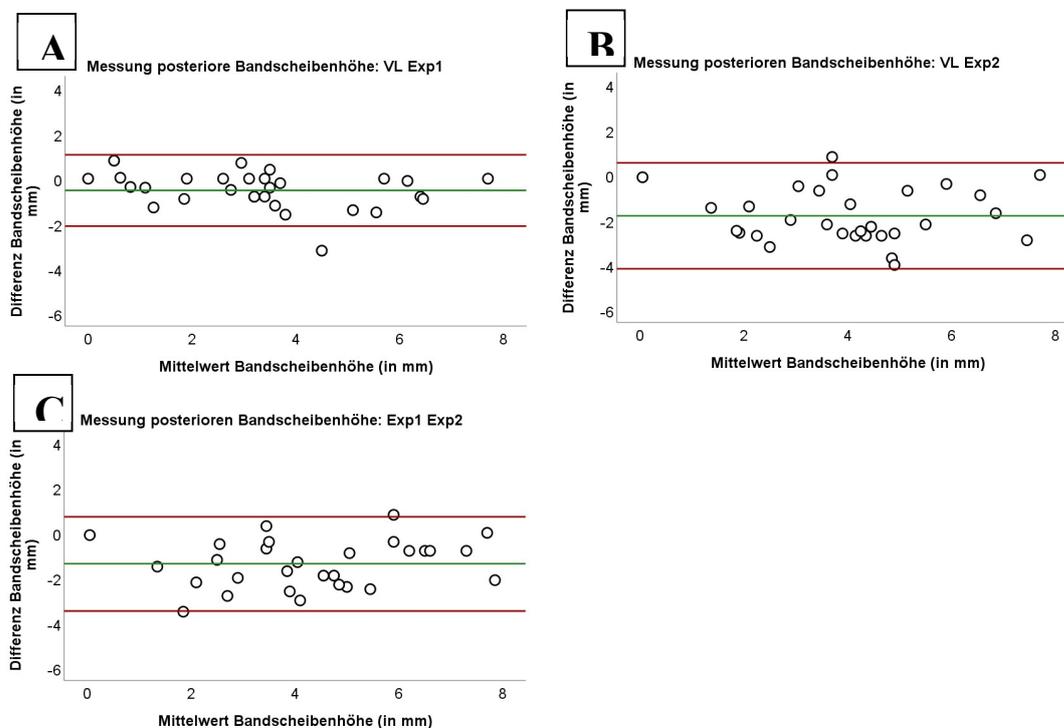


Abbildung 40: Posteriore Bandscheiben bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung der posterioren Bandscheibenhöhe.

3.4.1.2 Qualitative Messparameter

3.4.1.2.1 Spinalkanalstenose

Bei der Klassifikation der Spinalkanalstenose nach Schizas ist die Korrelation zwischen VL und Exp1 am höchsten mit einem Cohen's Kappa Koeffizient von 0,909.

Tabelle 27: Korrelation der Klassifikation der Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle wurde die Korrelation zwischen dem VL, Exp1 und Exp2 mit der Methode nach Cohen's Kappa ermittelt.

| Korrelation | n | Kappa |
|---|----|-------|
| Spinalkanalstenosis gemäß der Klassifikation nach Schizas | | |
| VL und Exp1 | 30 | 0,909 |
| VL und Exp2 | 30 | 0,795 |
| Exp1 und Exp2 | 30 | 0,780 |

| A | Spinal qualitativ (Schizas) Exp1 | | | | | | Gesamt | |
|-----------------------------|----------------------------------|----|----|----|---|---|--------|----|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | B | C | | |
| Spinal qualitativ (Schizas) | A1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | |
| | A2 | 1 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | |
| | A3 | 0 | 1 | 3 | 1 | 1 | 6 | |
| | A4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | |
| VL | B | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 6 | |
| | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | |
| Gesamt | | 5 | 8 | 3 | 2 | 7 | 5 | 30 |

| B | Spinal qualitativ (Schizas) Exp2 | | | | | | Gesamt | |
|-----------------------------|----------------------------------|----|----|----|---|---|--------|----|
| | A1 | A2 | A3 | B | C | D | | |
| Spinal qualitativ (Schizas) | A1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| | A2 | 1 | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| | A3 | 0 | 0 | 4 | 2 | 0 | 0 | 6 |
| | A4 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| VL | B | 0 | 0 | 2 | 3 | 1 | 0 | 6 |
| | C | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| Gesamt | | 3 | 5 | 12 | 6 | 2 | 2 | 30 |

| C | Spinal qualitativ (Schizas) Exp2 | | | | | | Gesamt | |
|-----------------------------|----------------------------------|----|----|----|---|---|--------|----|
| | A1 | A2 | A3 | B | C | D | | |
| Spinal qualitativ (Schizas) | A1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| | A2 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| | A3 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| | A4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Exp1 | B | 0 | 0 | 3 | 3 | 1 | 0 | 7 |
| | C | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 5 |
| Gesamt | | 3 | 5 | 12 | 6 | 2 | 2 | 30 |

Abbildung 41: Klassifikation Spinalkanalstenosis (Schizas) bei der Vergleichsmessung

Heat Map Darstellung der Korrelation zwischen VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C). Die Spinalkanalstenosis wird nach Schizas in Gruppe A bis D unterteilt, wobei Gruppe A in A1 bis A4 strukturiert ist.

3.4.2 Korrelation Messparameter Foramenstenose

3.4.2.1 *Quantitative Messparameter*

3.4.2.1.1 Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe

Bei den Messungen des Foramendurchmessers zeigen sich nur geringe Übereinstimmungen. Bei Vergleich der Messungen der beiden Experten zeigen sich deutliche Unterschiede. Mit einem Wert von 0,240 ist dieser der niedrigste Wert von allen Korrelationskoeffizienten.

Tabelle 28: Intraklassen-Korrelationskoeffizient Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe bei der Vergleichsmessung

In der Tabelle ist Korrelation von VL, Exp1 und Exp2 über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung der Durchmesser der Foramen dargestellt. Zudem ist der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

n = Anzahl, ICC = Intraklassen-Korrelationskoeffizient, VL = Versuchsleiter, Exp1,-2 = Experte 1 bzw. 2

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|--|----------|------------------|------------------------------------|
| Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 56 | 0,369 | 0,046-0,621 |
| VL und Exp1 | 57 | 0,611 | 0,212-0,800 |
| VL und Exp2 | 56 | 0,302 | -0,082-0,594 |
| Exp1 und Exp2 | 57 | 0,240 | -0,096-0,557 |

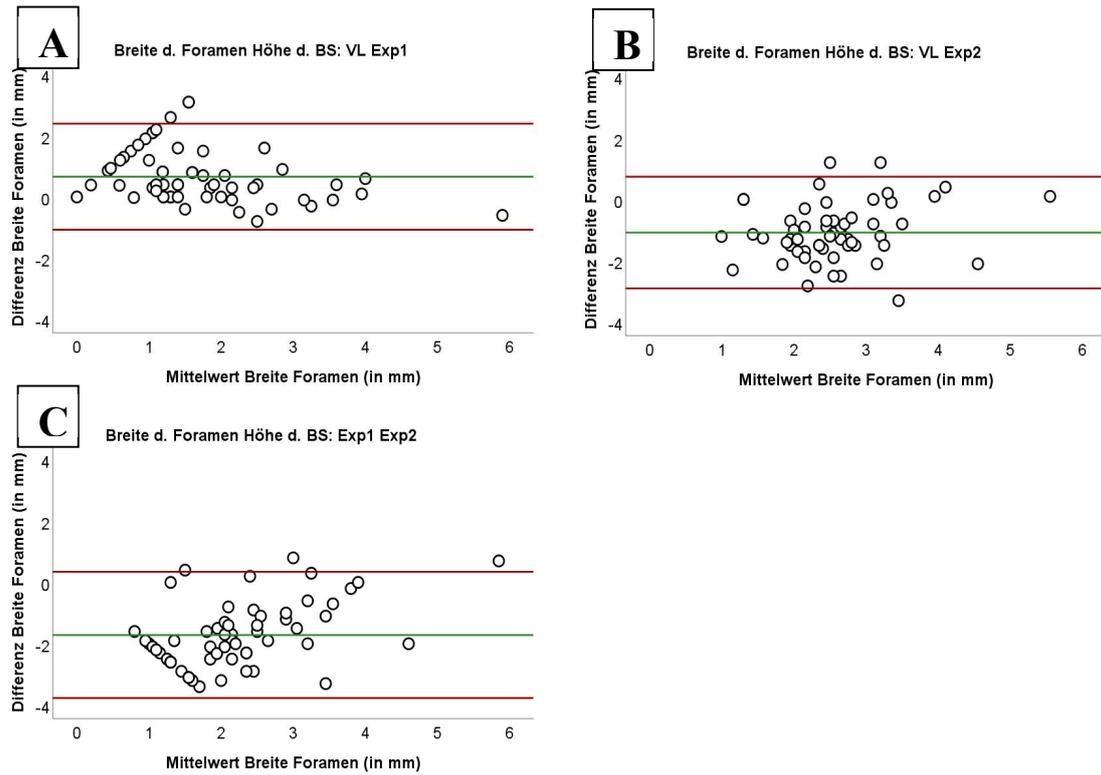


Abbildung 42: Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe bei der Vergleichsmessung

Die Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung der Durchmesser der Foramen. Die Messung erfolgt auf sagittaler Höher der Bandscheibe.

3.4.2.1.2 Durchmesser der Foramen nach Beers

Bei der Messung der Breite des Foramens nach Beers zeigen sich insgesamt nur mäßige Übereinstimmungen der Messwerte zwischen allen Untersuchern (ICC = 0,577). Bei den Messwerten des Versuchsleiters und Experten 2 zeigen sich die geringsten Übereinstimmungen mit einem ICC Wert von 0,362.

Tabelle 29: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Durchmessers der Foramen (Beers) bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation der Versuchsleiter und Experten über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung der Breite der Foramen (Beers) angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%- Konfidenzintervall |
|------------------------------------|----|-----------|----------------------------|
| Durchmesser der Foramen nach Beers | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 58 | 0,557 | 0,406-0,690 |
| VL und Exp1 | 58 | 0,787 | 0,666-0,867 |
| VL und Exp2 | 58 | 0,362 | 0,127-0,561 |
| Exp1 und Exp2 | 58 | 0,530 | 0,297-0,699 |

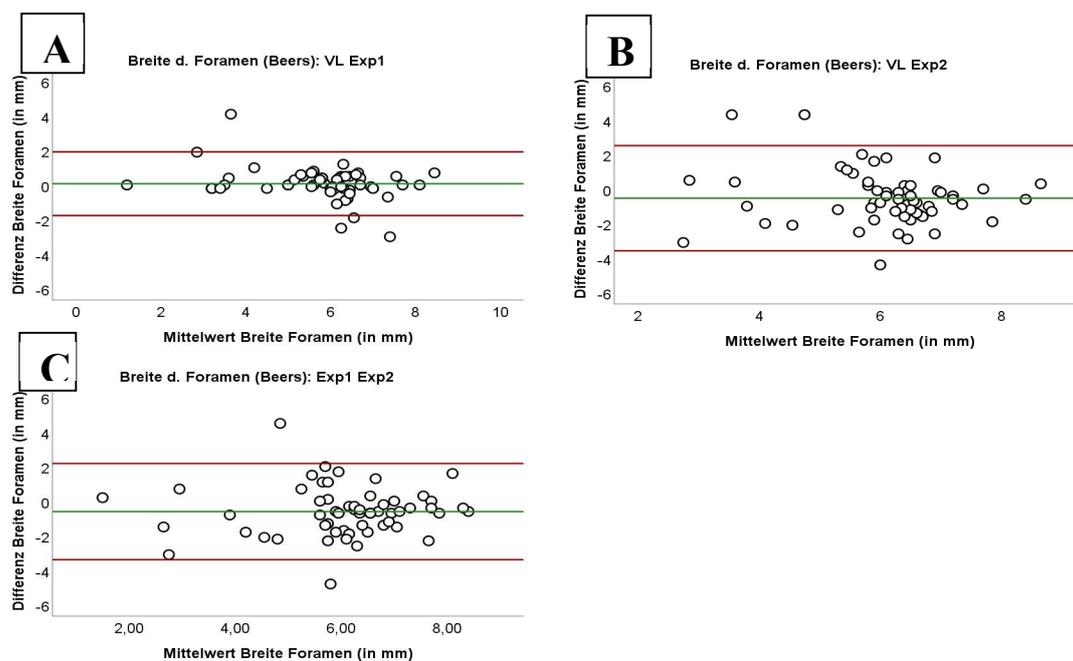


Abbildung 43: Durchmesser der Foramen (Beers) bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung der Durchmesser der Foramen (Beers).

3.4.2.1.3 Fläche der Foramen

Bei der Flächenmessung des Foramens nach Sipola zeigen sich wieder deutlich höhere Korrelationen im Vergleich zu den Messwerten des Foramendurchmessers. Es zeigt sich eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den Messwerten des Versuchsleiters mit dem Experten 1 (ICC Wert = 0,903).

Tabelle 30: Intraklassen-Korrelationskoeffizient der Fläche der Foramen bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle ist Korrelation der Versuchsleiter und Experten über den Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) für die Messung der Fläche der Foramen angegeben. Zudem ist für die jeweilige Korrelationsmessung der 95%ige Konfidenzintervall aufgeführt.

| Korrelation | n | ICC (3.1) | 95%-Konfidenzintervall |
|--------------------------------|----|-----------|------------------------|
| Fläche der Foramen nach Sipola | | | |
| VL, Exp1 und Exp 2 | 55 | 0,712 | 0,420-0,850 |
| VL und Exp1 | 55 | 0,903 | 0,840-0,942 |
| VL und Exp2 | 56 | 0,616 | 0,056-0,831 |
| Exp1 und Exp2 | 56 | 0,672 | 0,173-0,853 |

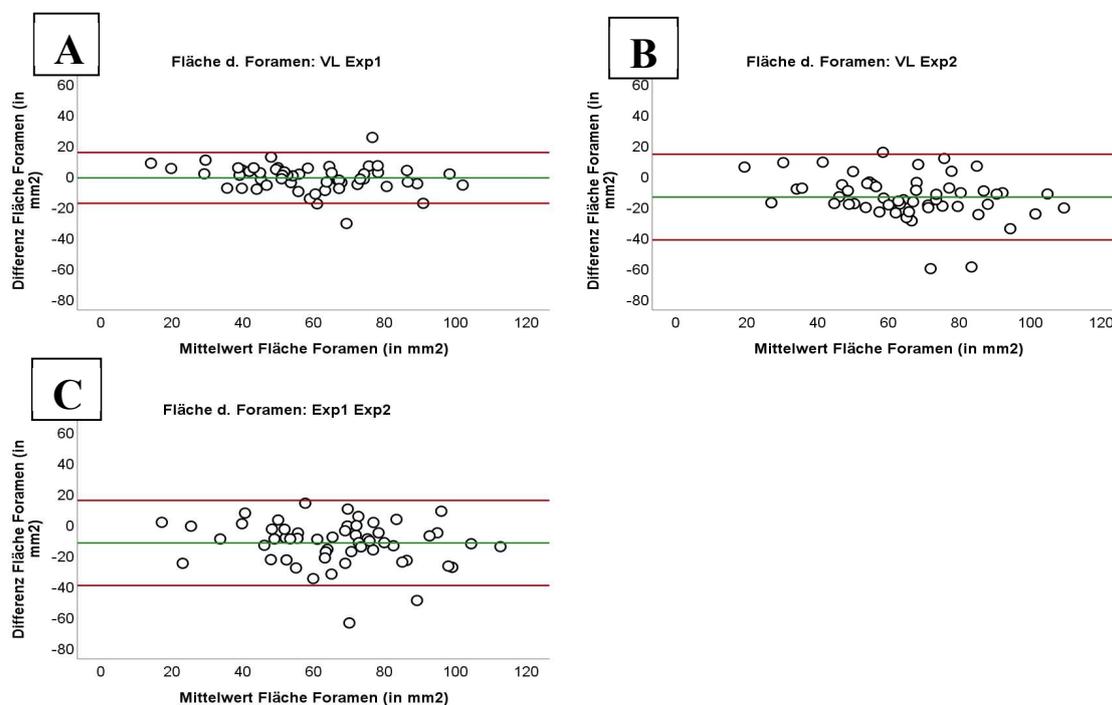


Abbildung 44: Fläche der Foramen bei der Vergleichsmessung

Die drei Bland-Altman-Plot Diagramme zeigen die Korrelation von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) bei der Messung der Durchmesser der Foramen (Sipola).

3.4.2.2 Qualitative Messparameter

Bei der Bestimmung der qualitativen Parameter in der Vergleichsmessung zeigt sich sowohl bei der Betrachtung der Neuroforamenstenose sowie bei der Facettengelenkdegeneration die höchste Übereinstimmung der Messwerte zwischen dem VL Exp1. Hier zeigen sich Korrelationen mit einem Kappa Wert zwischen 0,833 und 0,894. Beim Vergleich der anderen Untersucherkombinationen sind nur deutlich geringere Übereinstimmungen vorhanden.

3.4.2.2.1 Klassifikation der Neuroforamenstenose nach Lee

Tabelle 31: Korrelation der Klassifikation der Neuroforamenstenose (Lee) bei der Vergleichsmessung

Die Tabelle zeigt die Übereinstimmung der gemessenen Werte von VL, Exp1 und Exp2 mit Cohen's Kappa.

n = Anzahl, VL = Versuchsleiter, Exp1 = Experte 1, Exp2 = Experte 2

| Korrelation | n | Kappa |
|------------------------------|----------|--------------|
| Neuroforamenstenose nach Lee | | |
| VL und Exp1 | 56 | 0,894 |
| VL und Exp2 | 56 | 0,738 |
| Exp1 und Exp2 | 56 | 0,741 |

| A | | Foramen Qualitativ (Lee) Exp1 | | | | Gesamt |
|-----------------------------------|---|-------------------------------|----|----|---|--------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| Foramen Qualitativ (Lee) VL | 0 | 11 | 2 | 0 | 0 | 13 |
| | 1 | 4 | 17 | 0 | 1 | 22 |
| | 2 | 0 | 0 | 12 | 0 | 12 |
| | 3 | 0 | 0 | 2 | 7 | 9 |
| Gesamt | | 15 | 19 | 14 | 8 | 56 |

| B | | Foramen Qualitativ (Lee) Exp2 | | | | Gesamt |
|-----------------------------------|---|-------------------------------|----|---|---|--------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| Foramen Qualitativ (Lee) VL | 0 | 8 | 5 | 0 | 0 | 13 |
| | 1 | 3 | 17 | 0 | 2 | 22 |
| | 2 | 0 | 5 | 6 | 1 | 12 |
| | 3 | 0 | 1 | 2 | 6 | 9 |
| Gesamt | | 11 | 28 | 8 | 9 | 56 |

| C | | Foramen Qualitativ (Lee) Exp2 | | | | Gesamt |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|----|---|---|--------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| Foramen Qualitativ (Lee) Exp1 | 0 | 7 | 8 | 0 | 0 | 15 |
| | 1 | 4 | 14 | 0 | 1 | 19 |
| | 2 | 0 | 5 | 7 | 2 | 14 |
| | 3 | 0 | 1 | 1 | 6 | 8 |
| Gesamt | | 11 | 28 | 8 | 9 | 56 |

Abbildung 45: Klassifikation der Neuroforamenstenose (Lee) bei der Vergleichsmessung

Heat Map Darstellung der Korrelation zwischen VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C). Die Neuroforamenstenose wird nach Lee in 4 Gruppen eingeteilt. Die Häufigkeit der Übereinstimmung zwischen den Untersuchern wird über die Farbstufen (grün am häufigsten) visuell dargestellt.

3.4.2.2.2 Klassifikation Facettengelenkdegeneration nach Weißhaupt

Tabelle 32: Korrelation Klassifikation der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle wurde die Übereinstimmung der gemessenen Werte von dem VL, Exp1 und Exp2 mit Hilfe des Cohen's Kappa ermittelt. Von den ermittelten Klassifikationswerten des rechten und linken Facettengelenks wurde der pathologischste Befund ausgewählt.

| Korrelation | n | Kappa |
|---|----|-------|
| Facettengelenkdegeneration nach Weishaupt | | |
| VL und Exp1 | 60 | 0,873 |
| VL und Exp2 | 58 | 0,457 |
| Exp1 und Exp2 | 58 | 0,473 |

| A | Facetten qualitativ bds. Weißhaupt Exp1 | | | | | Gesamt |
|--------------------------|--|----|----|----|----|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | | |
| Facetten qualitativ bds. | 0 | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 7 | 1 | 0 | 0 | 8 | |
| 1 | 3 | 25 | 3 | 0 | 31 | |
| Weißhaupt VL | 2 | 0 | 2 | 16 | 18 | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | |
| Gesamt | 10 | 28 | 19 | 3 | 60 | |

| B | Facetten qualitativ bds. Weißhaupt Exp2 | | | | | Gesamt |
|--------------------------|--|----|----|----|----|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | | |
| Facetten qualitativ bds. | 0 | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 0 | 7 | 1 | 0 | 8 | |
| 1 | 1 | 13 | 15 | 2 | 31 | |
| Weißhaupt VL | 2 | 1 | 1 | 8 | 16 | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | |
| Gesamt | 2 | 21 | 24 | 11 | 58 | |

| C | Facetten qualitativ bds. Weißhaupt Exp2 | | | | | Gesamt |
|--------------------------|--|----|----|----|----|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | | |
| Facetten qualitativ bds. | 0 | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 0 | 9 | 1 | 0 | 10 | |
| 1 | 1 | 11 | 14 | 2 | 28 | |
| Weißhaupt Exp1 | 2 | 1 | 1 | 9 | 17 | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | |
| Gesamt | 2 | 21 | 24 | 11 | 58 | |

Abbildung 46: Klassifikation der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) bei der Vergleichsmessung

Heat Map Darstellung der Korrelation zwischen VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C). Die Facettengelenkdegeneration wird nach Weißhaupt in 4 Gruppen eingeteilt. Die Häufigkeit der Übereinstimmung zwischen den Untersuchern wird über die Farbstufen (grün am häufigsten) visuell dargestellt.

3.4.2.2.2 Intraartikuläre Flüssigkeit der Facettengelenke

Tabelle 33: Korrelation intraartikuläre Flüssigkeit der Facettengelenke bei der Vergleichsmessung

In der folgenden Tabelle wurde die Übereinstimmung von VL, Exp1 und Exp2 mit Hilfe des Cohen's Kappa ermittelt. Dabei bewerteten diese das MRT-Bild auf Vorhandensein von intraartikulärer Flüssigkeit (Erguss) in den jeweiligen Facettengelenken aus.

| Korrelation | n | Kappa |
|---|----|-------|
| Intraartikuläre Flüssigkeit der Facettengelenke | | |
| VL und Exp1 | 60 | 0,833 |
| VL und Exp2 | 60 | 0,474 |
| Exp1 und Exp2 | 60 | 0,595 |

| A | Erguss Facettengelenk bds. Exp2 | | Gesamt | |
|---------------------|------------------------------------|--------|--------|----|
| | kein Erguss | Erguss | | |
| Erguss | kein Erguss | 30 | 1 | 31 |
| Facettengelenk bds. | Erguss | 11 | 18 | 29 |
| Gesamt | | 41 | 19 | 60 |

| B | Erguss Facettengelenk bds. Exp2 | | Gesamt | |
|---------------------|------------------------------------|--------|--------|----|
| | kein Erguss | Erguss | | |
| Erguss | kein Erguss | 30 | 1 | 31 |
| Facettengelenk bds. | Erguss | 11 | 18 | 29 |
| Gesamt | | 41 | 19 | 60 |

| C | Erguss Facettengelenk bds. Exp2 | | Gesamt | |
|---------------------|------------------------------------|--------|--------|----|
| | kein Erguss | Erguss | | |
| Erguss | kein Erguss | 30 | 4 | 34 |
| Facettengelenk bds. | Erguss | 11 | 15 | 26 |
| Gesamt | | 41 | 19 | 60 |

Abbildung 47: Intraartikuläre Flüssigkeit (Erguss)

Heat Map Darstellung über das Vorhandensein von intraartikulärer Flüssigkeit (Erguss) in den Facettengelenken. Hierbei werden die Ergebnisse von VL/Exp1 (A), VL/Exp2 (B) und Exp1/Exp2 (C) verglichen. Die Häufigkeit der Übereinstimmung zwischen den Untersuchern wird über die Farbstufen (grün am häufigsten) visuell dargestellt

3.5 Ergebnisse der Studienmessungen

3.5.1 Ergebnisse bei der epiduralen Infiltration

Von 2005 bis 2016 konnten 100 Patienten in die Studie eingeschlossen werden. Die Studiengruppe teilt sich auf in 46 Männern und 54 Frauen. Die Zeit zwischen der Durchführung der kernspintomographischen Bildgebung und der durchgeführten epiduralen Infiltration betrug im Durchschnitt 51 Tage (0-351 Tage). Für die Auswertung der präinfiltrativen Beschwerden wurden die subjektiven Angaben nachträglich mit der NRS-Skala bewertet. Der mittlere NRS-Wert betrug 4,7 (3-8). Die von den Patienten angegebene Gesamtverbesserung durch die Injektion bewerteten die Patienten durchschnittlich mit 50% (0-100%). Unterteilt man die Patienten anhand der Schmerzverbesserung in 3 Gruppen, so zeigten 36 Patienten keine Besserung (0-30%), 36 Patienten eine gute (31-74%) und 28 Patienten eine ausgezeichnete Besserung (75-100%).

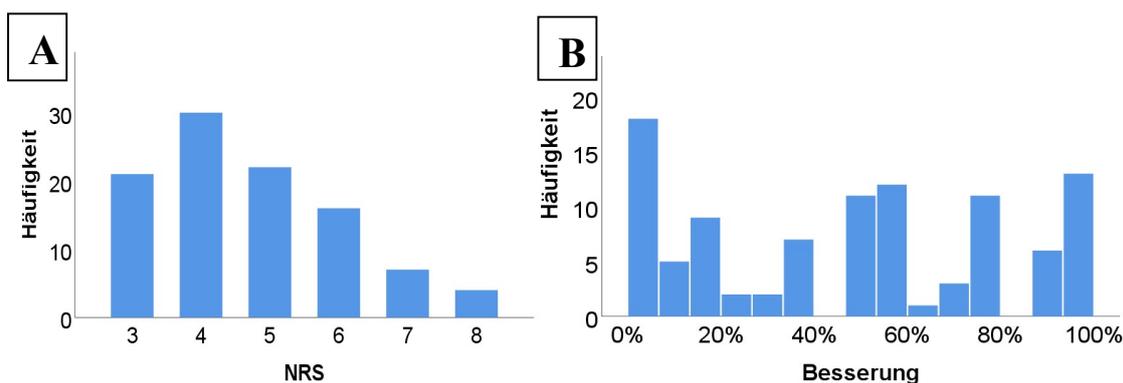


Abbildung 48: Deskriptive Statistik epidurale Infiltration

A Balkendiagramm präinfiltrative Beschwerden (NRS = Numerische Rating Skala, 1-10)

B Balkendiagramm postinfiltrative Schmerzbesserung

3.5.1.1 Messergebnisse der Spinalkanalstenose bei der epiduralen Infiltration

Mittels Kendall's tau (τ) wurde untersucht, wie hoch die Übereinstimmungen zwischen den radiomorphologischen Messwerten und den subjektiven Beschwerdebesserungen nach der epiduralen Infiltration sind.

3.5.1.1.1 Quantitative Messparameter

3.5.1.1.1.1 Sagittaler Durchmesser des Duralsacks

Die folgende Tabelle präsentiert die Korrelationen zwischen den Durchmessern und der Beschwerdebesserung. Hierbei zeigen sich keine signifikante Korrelation zwischen den untersuchten Parametern.

Tabelle 34: Sagittale Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

| Messparameter | n | Kendall's tau | p-Wert |
|---|----------|----------------------|---------------|
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 1 | 100 | 0,033 | 0,641 |
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 2 | 100 | -0,053 | 0,459 |
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 3 | 100 | -0,051 | 0,475 |
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 4 | 100 | -0,045 | 0,531 |

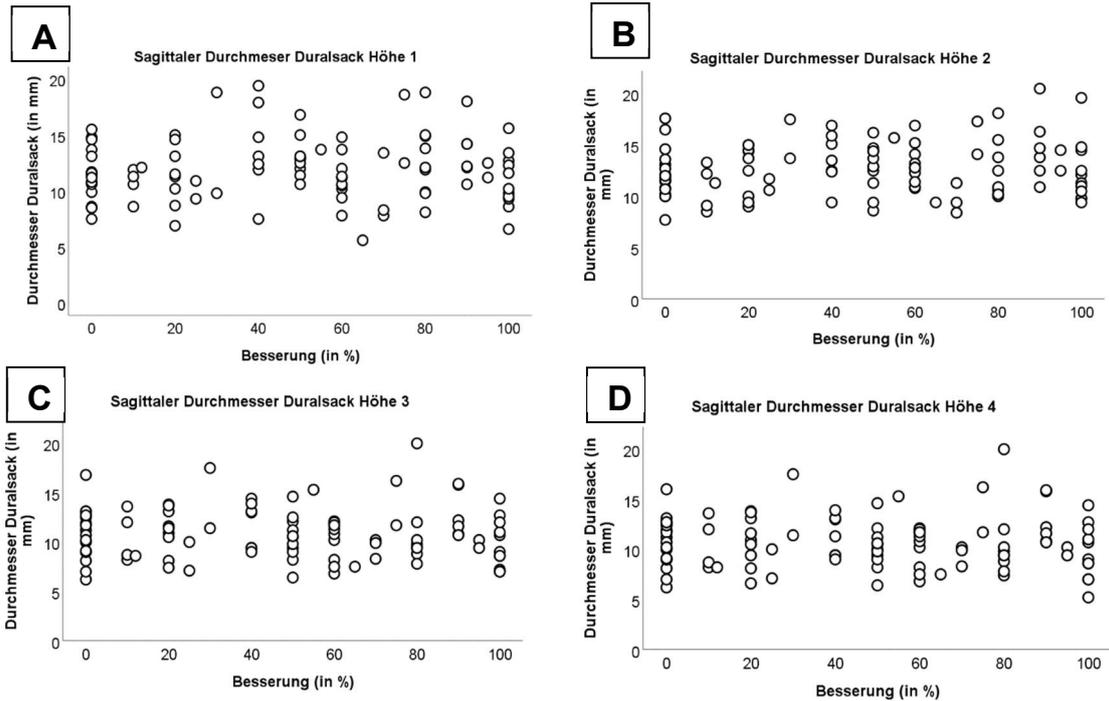


Abbildung 49: Darstellung der sagittalen Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Über Streudiagramme ist die Besserung zu den verschiedenen sagittalen Durchmesserwerten dargestellt. In diesen Abbildungen sind nur Patienten abgebildet, die an dem ersten Tag des stationären Aufenthaltes eine epidurale Infiltration erhalten haben. A) sag. Durchmesser Höhe 1, B) Höhe 2, C) Höhe 3, D) Höhe 4.

3.5.1.1.2 Interlaminärer Abstand (transversaler Durchmesser des Duralsacks)

Für den interlaminären Abstand (transversaler Durchmesser der Duralsäcke) liegt ein Kendall's tau Wert von $\tau -0,011$ vor. Zusätzlich wurde ein p-Wert von 0,881 bestimmt. Dieser p-Wert zeigt somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den transversal gemessenen Durchmessern.

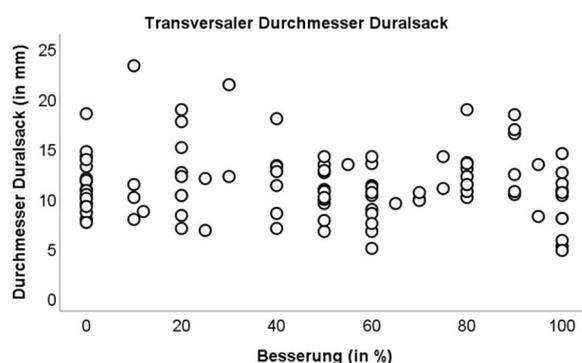


Abbildung 50: Darstellung des interlaminären Abstandes in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Über ein Streudiagramm ist die postinfiltrative Schmerzbesserung zu dem jeweiligen gemessenen interlaminären Abstand (transversaler Durchmesser des Duralsacks) abgebildet.

3.5.1.1.3 Fläche des Duralsacks

Die gemessenen Flächen der Duralsäcke zeigen ein Kendall's tau Wert von $\tau -0,012$ auf. Zusätzlich wurde ein p-Wert von 0,869 bestimmt. Dieser p-Wert zeigt somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den gemessenen Flächen der einzelnen Duralsäcke.

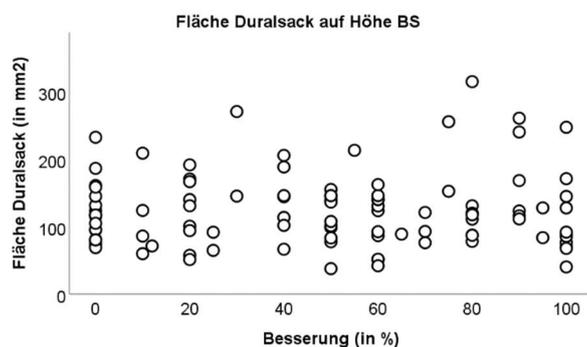


Abbildung 51: Darstellung der Duralsackflächen in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Über ein Streudiagramm ist die postinfiltrative Schmerzbesserung zu der jeweiligen gemessenen Duralsackfläche abgebildet.

3.5.1.1.4 Posteriore Bandscheibenhöhe

Bei der Bestimmung der posterioren Bandscheibenhöhen in Bezug auf die Schmerzbesserung liegt der Kendall's tau Wert bei $\tau -0,187$. Des Weiteren zeigt sich ein p-Wert von 0,009, sodass hier von einer signifikanten Korrelation gesprochen werden kann.

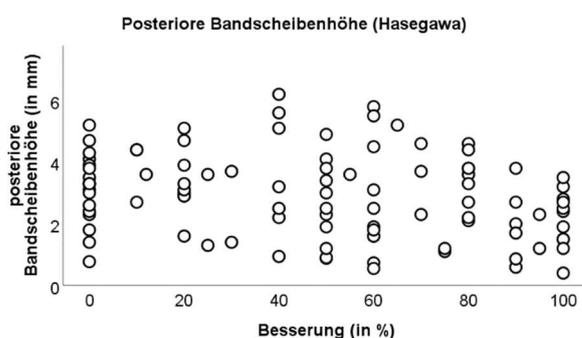


Abbildung 52: Darstellung der posterioren Bandscheibenhöhen in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Über ein Streudiagramm ist die postinfiltrative Schmerzbesserung zu der jeweiligen gemessenen posterioren Bandscheibenhöhe abgebildet.

3.5.1.1.2 Qualitative Messparameter

3.5.1.1.2.1 Klassifikation der Spinalkanalstenose (Schizas)

Bei der qualitativen Klassifikation der Spinalkanalstenose nach Schizas in Bezug auf die Schmerzbesserung liegt der Kendall's tau Wert bei $\tau -0,087$. Des Weiteren zeigt sich ein p-Wert von 0,283, sodass hier von keiner signifikanten Korrelation gesprochen werden kann.

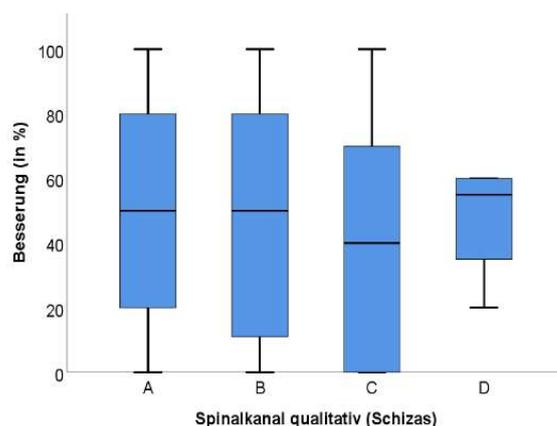


Abbildung 53: Klassifikation der Spinalkanalstenose (Schizas) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Die Boxplot-Darstellung zeigt die Einteilung der Spinalkanalstenose nach Schizas im Vergleich zu der postinfiltrativen Schmerzverbesserung. Die Subgruppen A1 bis A4 wurden in eine Gruppe A zusammengefasst. Die Besserung ist bei der Boxplot-Darstellung in Prozent angegeben.

3.5.1.2 Messergebnisse der Foraminalstenose bei der epiduralen Infiltration

3.5.1.2.1 Quantitative Messparameter

3.5.1.2.1.1 Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe

Die gemessenen Durchmesser der Foramen zeigen ein Kendall's tau Wert für rechts von $\tau -0,012$ und links $\tau -0,063$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,874$ und links

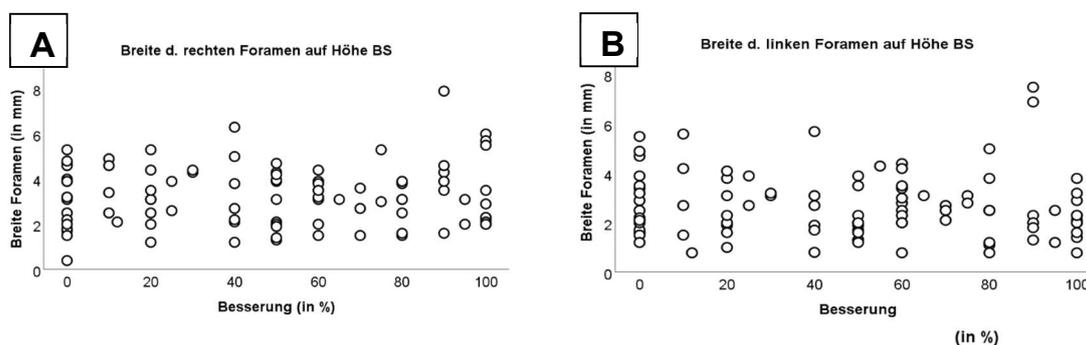


Abbildung 54: Darstellung der Durchmesser der Foramen auf Höhe BS in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Über zwei Streudiagramme sind die postinfiltrativen Beschwerdesymptomatiken zu den jeweilig gemessenen Durchmessern der Foramen abgebildet. Abbildung A zeigt die Durchmesser der rechten Foramen und Abbildung B die der linken Foramen.

von $p=0,384$. Diese p-Werte zeigen somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den gemessenen Durchmessern der einzelnen Foramen.

3.5.1.2.1.2 Durchmesser der Foramen (Beers)

Die gemessenen Durchmesser der Foramen nach Beers zeigen ein Kendall's tau Wert für rechts von $\tau -0,028$ und links von $\tau -0,024$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,700$ und links von $p=0,741$. Diese p-Werte zeigen somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den gemessenen Durchmessern der einzelnen Foramen.

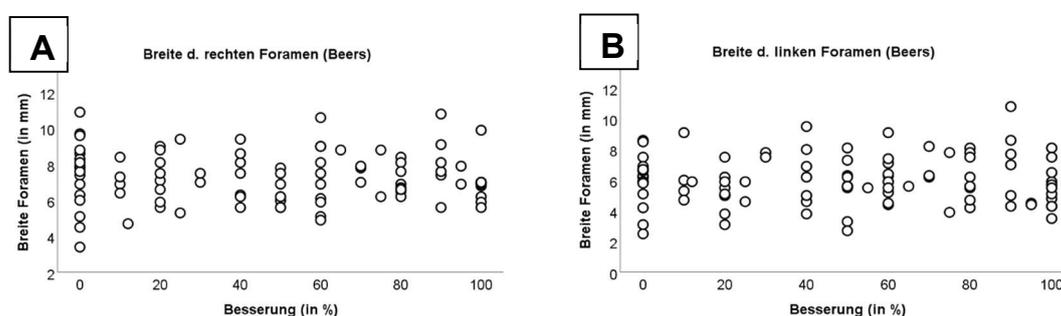


Abbildung 55: Darstellung der Durchmesser der Foramen (Beers) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Streudiagramm-Darstellung der Besserung zu den verschiedenen Durchmesserwerten. Bei diesen beiden Abbildungen ist die gemessene Fläche der Foramen (A rechte Foramen, B linke Foramen) und die Besserung (in %) gegeneinander aufgetragen.

3.5.1.2.1.3 Fläche der Foramen

Die Flächen der rechten und linken Foramen wurden nach der Studie nach Sipola gemessen. Der Kendall's tau beträgt für die rechten Foramen $\tau -0,018$ und für die linken Foramen $\tau -0,051$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,801$ und links von $p=0,474$. Diese p-Werte zeigen somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den gemessenen Flächen der einzelnen Foramen.

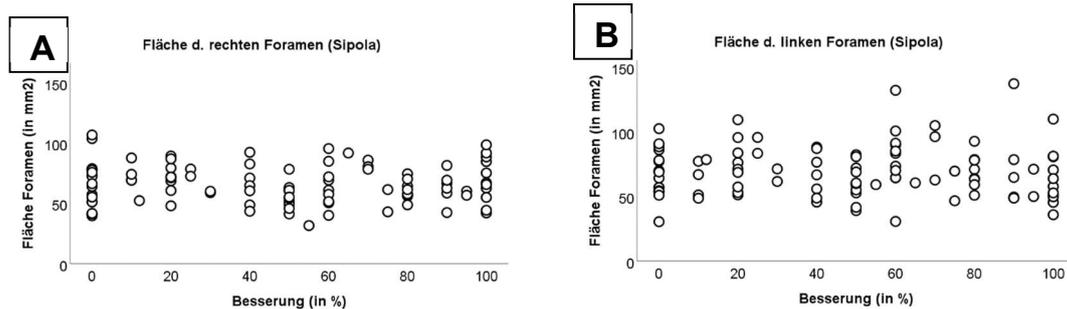


Abbildung 56: Darstellung der gemessenen Flächen der Foramen (Sipola) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Streudiagramm-Darstellung der Besserung zu den verschiedenen Flächenmessungen nach Sipola. Bei diesen beiden Abbildungen ist die gemessene Fläche der Foramen gegen die Besserung (in %) gegeneinander aufgetragen. Abbildung A zeigt die Durchmesser der rechten Foramen und Abbildung B die der linken Foramen.

3.5.1.2.2 Qualitative Messparameter

3.5.1.2.2.1 Klassifikation der Foramen (Lee)

Der Kendall's tau beträgt für die rechten Foramen τ 0,028 und für die linken Foramen τ 0,031. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,743$ und links von $p=0,702$ erzielt. Diese p-Werte zeigen somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den qualitativen Einteilungen der einzelnen Foramen.

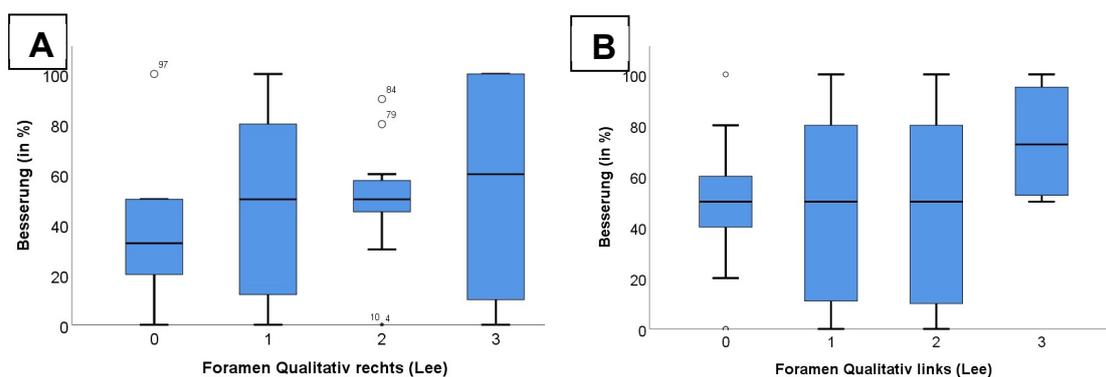


Abbildung 57: Darstellung der Klassifikation der Foramen (Lee) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Die Boxplot Darstellung zeigt die Einteilung der Foramenstenose nach Lee im Vergleich zu der postinfiltrativen Schmerzverbesserung auf. A) Ergebnisse für die rechten Foramen, B) Ergebnisse für die linken Foramen

3.5.1.2.2.2 Klassifikation der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt)

Die Einteilung der Facettengelenkdegeneration wurde anhand der Klassifikation nach Weißhaupt erzielt. Der Kendall's tau beträgt für die rechten Gelenke τ 0,032 und für die linken Gelenke τ 0,017. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,694$ und links von $p=0,874$ erzielt.

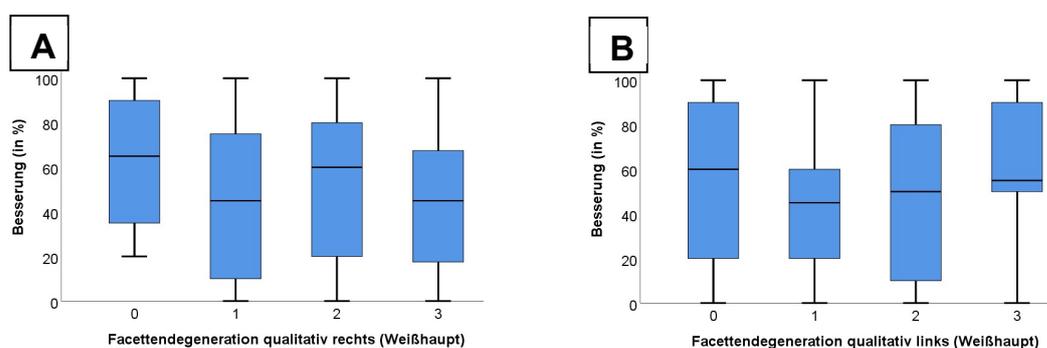


Abbildung 58: Darstellung der Klassifikation der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) in Bezug auf die Beschwerdensymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Die Besserung ist bei der Boxplot Darstellung in Prozent angegeben. A) Ergebnisse für die rechten Foramen, B) Ergebnisse für die linken Foramen

3.5.1.2.2.3 Intraartikuläre Flüssigkeit in den Facettengelenken

Bei der Bestimmung des Vorhandenseins eines Ergusses (intraartikuläre Flüssigkeit) in den Facettengelenken in Bezug auf die Schmerzbesserung liegt der Kendall's tau Werte für die rechten Facettengelenke bei τ -0,085 ($p=0,325$) und für die linken Facettengelenken bei τ -0,097 ($p=0,257$).

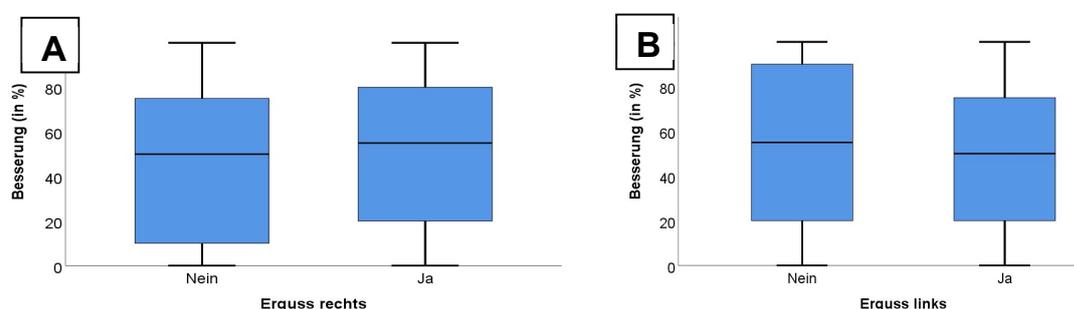


Abbildung 59: Darstellung der Klassifikation der intraartikulären Flüssigkeit in Bezug auf die Beschwerdensymptomatik bei der epiduralen Infiltration

Die Boxplot Darstellung zeigt das Vorhandensein von intraartikulären Flüssigkeit (Erguss) im Vergleich zu der postinfiltrativen Schmerzbesserung.

A) Ergebnisse für das rechte Facettengelenk B) Ergebnisse für das linke Facettengelenk

3.5.2 Ergebnisse bei der Facetteninfiltration

Von 2005 bis 2016 konnten 50 Patienten (30 Frauen und 20 Männer) in die Studie eingeschlossen werden. Der Durchschnittszeitraum zwischen der MRT Aufnahme und der durchgeführten Facetteninfiltration betrug 54 Tage (0-295 Tage). Die präinfiltrative Beschwerdeangaben anhand der NRS Skala betrug im Durchschnitt 4 (3-9). Die postinfiltrative Schmerzverbesserung durch die Injektion bewerteten die Patienten durchschnittlich mit 30% (0-100%). Wenn man die Patienten bezüglich der postinfiltrativen Schmerzverbesserung in 3 Gruppen einteilt, zeigten 27 Patienten keine Besserung (0-30%), 16 Patienten eine gute (31-74%) und 7 Patienten eine ausgezeichnete Besserung (75-100%).

3.5.2.1 Messergebnisse der Spinalkanalstenose bei der Facetteninfiltration

Mittels Kendall's tau (τ) wurde untersucht, wie hoch die Übereinstimmung zwischen dem gemessenen Durchmesser und der subjektiven Besserung der Beschwerdesymptomatik nach der Facetteninfiltration ist.

3.5.2.1.1 Quantitative Messparameter

3.5.2.1.1.1 Sagittaler Durchmesser des Duralsackes

Die folgende Tabelle zeigt die Korrelationen zwischen den Durchmessern und der Beschwerdeverbesserung. Ebenso wie bei den Messergebnissen der epiduralen Infiltration ist bei den Ergebnissen der Facetteninfiltration keine signifikante Korrelation zwischen den untersuchten Parametern erkennbar.

Tabelle 35 Sagittale Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

| Messparameter | n | Kendall's tau | p-Wert |
|---|----|---------------|--------|
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 1 | 50 | -0,141 | 0,170 |
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 2 | 50 | -0,002 | 0,986 |
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 3 | 50 | 0,031 | 0,765 |
| Sagittale Durchmesser der Duralsäcke Höhe 4 | 50 | 0,030 | 0,767 |

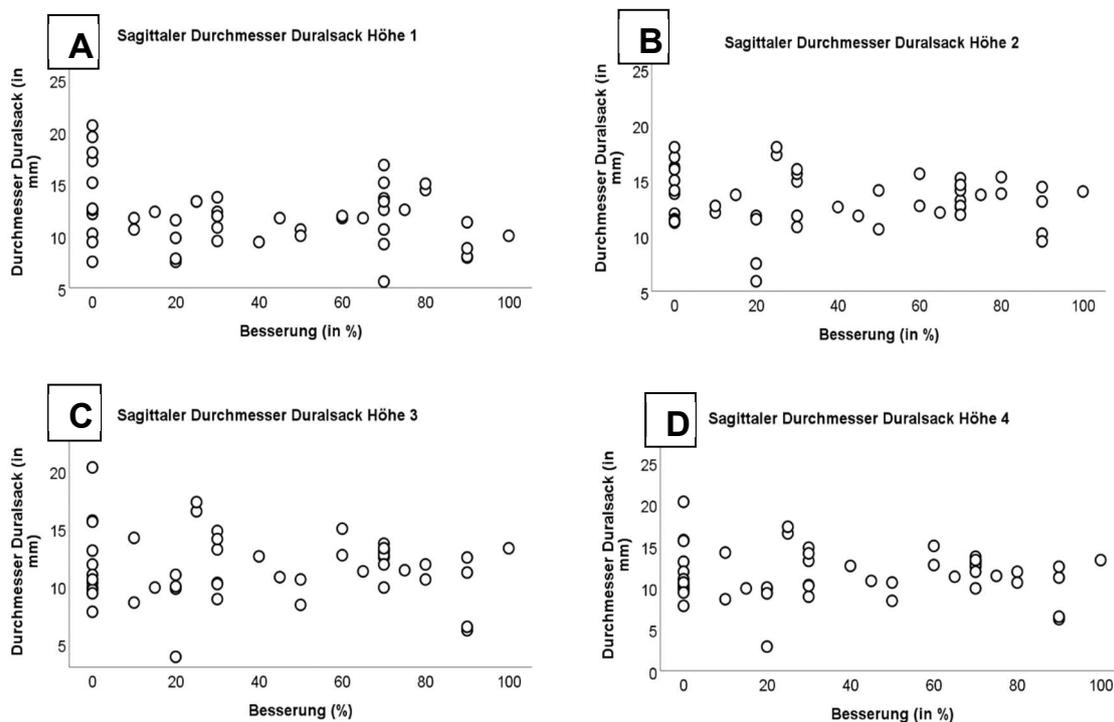


Abbildung 60: Darstellung der sagittalen Durchmesser in Bezug auf die Besserung der Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

Über Streudiagramme ist die Besserung zu den verschiedenen sagittalen Durchmesserwerten dargestellt. In den einzelnen Abbildungen A-D werden die unterschiedlichen Messhöhen dargestellt. In diesen Abbildungen sind nur Patienten abgebildet, die an dem ersten Tag des stationären Aufenthaltes eine Facetteninfiltration erhalten haben.

3.5.2.1.1.2 Transversaler Durchmesser des Duralsacks

Bei den transversal gemessenen Durchmessern liegt ein Kendall's tau Wert von $\tau -0,026$ vor. Zusätzlich wurde ein p-Wert von 0,799 bestimmt. Dieser p-Wert zeigt somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den Messwerten.

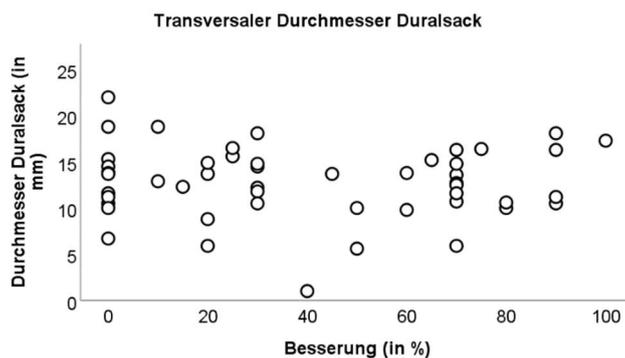


Abbildung 61: Darstellung der transversalen Durchmesser in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung bei der Facetteninfiltration

Über ein Streudiagramm ist die Korrelation zwischen den postinfiltrativen Verbesserungen mit dem jeweilig gemessenen transversalen Durchmesser abgebildet.

3.5.2.1.1.3 Fläche des Duralsacks

Bei den Flächenmessungen der Duralsäcke liegt ein Kendall's tau Wert von $\tau -0,022$ vor. Zusätzlich wurde ein p-Wert von 0,826 bestimmt. Dieser p-Wert zeigt somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdeverbesserungen und den Flächenmessungen.

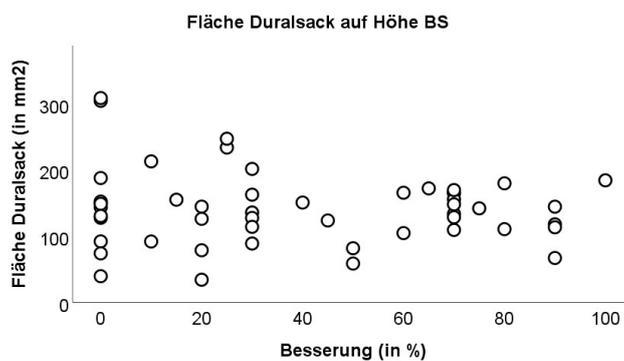


Abbildung 62: Darstellung der Flächen der Duralsäcke in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung bei der Facetteninfiltration

Über ein Streudiagramm ist die postinfiltrative Schmerzbesserung zu der jeweiligen gemessenen Duralsackfläche abgebildet.

3.5.2.1.1.4 Posteriore Bandscheibenhöhe

Zwischen der posterioren Bandscheibenhöhe der infiltrierten Segmente und der postinfiltrativen Beschwerdebesserung wird ein Kendall's tau von τ 0,133 ermittelt. Zusätzlich wurde ein p-Wert von 0,195 bestimmt.

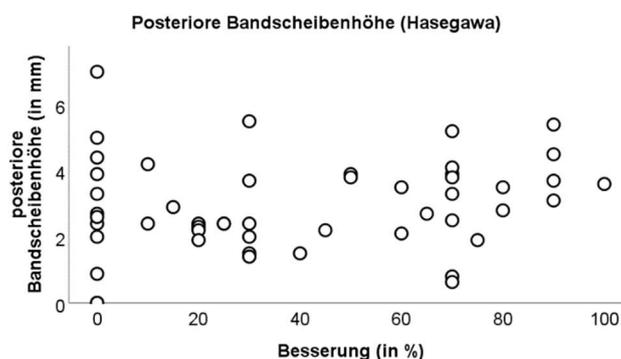


Abbildung 63: Darstellung der posterioren Bandscheibenhöhe in Bezug auf die Beschwerdebesserung bei der Facetteninfiltration

Über ein Streudiagramm ist die postinfiltrative Schmerzbesserung zu der jeweiligen gemessenen Duralsackfläche abgebildet.

3.5.2.1.2 Qualitative Messparameter

3.5.2.1.5 Klassifikation der Spinalkanalstenose (Schizas)

Bei der Klassifikation der Spinalkanalstenose nach Schizas liegt ein Kendall's tau Wert von τ 0,036 vor. Des Weiteren zeigt sich ein p-Wert von 0,767, sodass hier von keiner signifikanten Korrelation gesprochen werden kann.

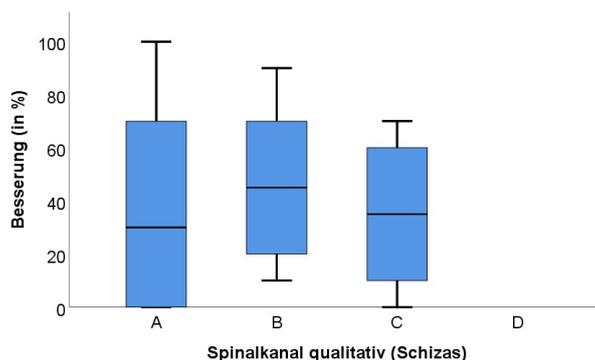


Abbildung 64: Klassifikation der Spinalkanalstenose (Schizas) in Bezug auf die Beschwerdebesserung Facetteninfiltration

Der Boxplot zeigt die Einteilung der Spinalkanalstenose nach Schizas im Vergleich zu der postinfiltrativen Schmerzbesserung auf. Die Besserung ist bei der Boxplot Darstellung in Prozent angegeben.

3.5.2.2 Messergebnisse der Foraminalstenose

3.5.2.2.1 Quantitative Messparameter

3.5.2.2.1.1 Durchmesser der Foramen auf Höhe der Bandscheibe

Die gemessenen Durchmesser der Foramen zeigen ein Kendall's tau Wert für rechts von $\tau -0,110$ und links $\tau 0,127$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,919$ und links von $p=0,222$. Diese p Werte zeigen somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den gemessenen Durchmessern der einzelnen Foramen.

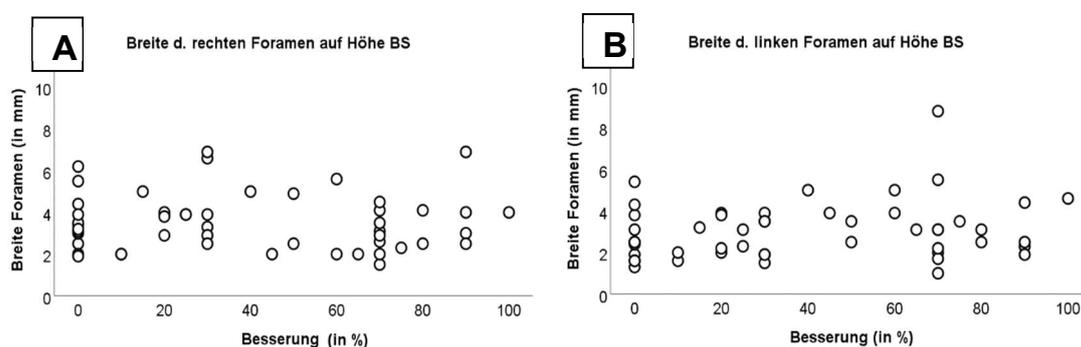


Abbildung 65: Darstellung der Durchmesser der Foramen auf Höhe BS in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

Über zwei Streudiagramme sind die postinfiltrative Beschwerdesymptomatik zu den jeweilig gemessenen Durchmessern der Foramen abgebildet. Abbildung A zeigt die Durchmesser der rechten Foramen und Abbildung B die der linken Foramen.

3.5.2.2.1.2 Durchmesser der Foramen nach Beers

Die gemessenen Durchmesser der Foramen nach Beers zeigen ein Kendall's tau Wert für rechts von $\tau -0,053$ und links von $\tau -0,024$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,612$ und links von $p=0,812$. Diese p-Werte zeigen somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den gemessenen Durchmessern der einzelnen Foramen.

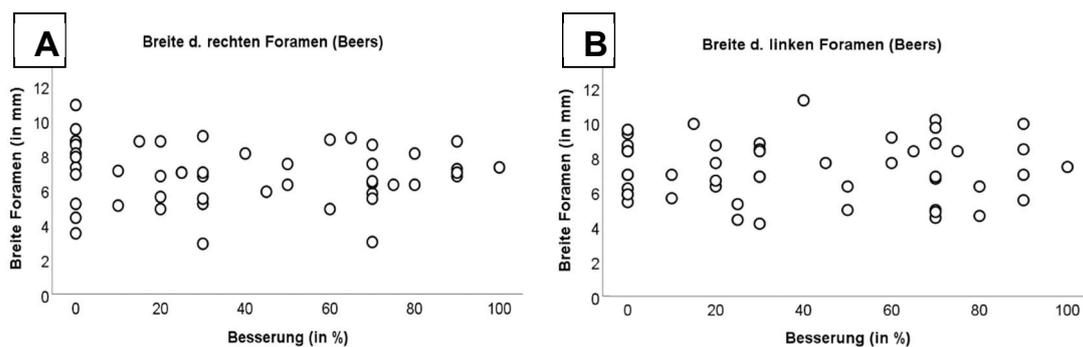


Abbildung 66: Darstellung der Durchmesser der Foramen (Beers) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

Streudiagramm-Darstellung der Besserung zu den verschiedenen Durchmesserwerten. Abbildung A zeigt die Durchmesser der rechten Foramen und Abbildung B die der linken Foramen.

3.5.2.2.1.3 Fläche der Foramen in Bezug auf die Beschwerdebesserung

Die Flächen der rechten und linken Foramen wurden nach der Studie nach Sipola gemessen. Der Kendall's tau beträgt für die rechten Foramen $\tau -0,059$ und für die linken Foramen $\tau -0,086$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,565$ und links von $p=0,397$. Diese p-Werte zeigen somit keine signifikante Korrelation zwischen den Beschwerdebesserungen und den gemessenen Flächen der einzelnen Foramen.

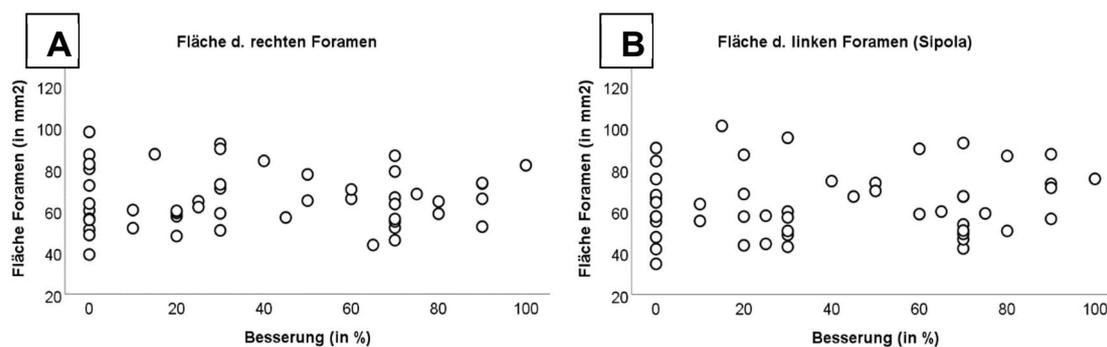


Abbildung 67: Darstellung der Fläche der Foramen (Sipola) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

Über zwei Streudiagramme sind die postinfiltrative Beschwerdesymptomatik zu den jeweilig gemessenen Durchmessern der Foramen abgebildet. Abbildung A zeigt die Durchmesser der rechten Foramen und Abbildung B die der linken Foramen.

3.5.2.2.2 Qualitative Messparameter

3.5.2.2.2.1 Klassifikation der Foramen in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung

Die Einteilung der Foramen wurde anhand der Klassifikation nach Lee erzielt. Der Kendall's tau beträgt für die rechten Foramen $\tau -0,037$ und für die linken Foramen $\tau -0,115$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,760$ und links von $p=0,322$ erzielt.

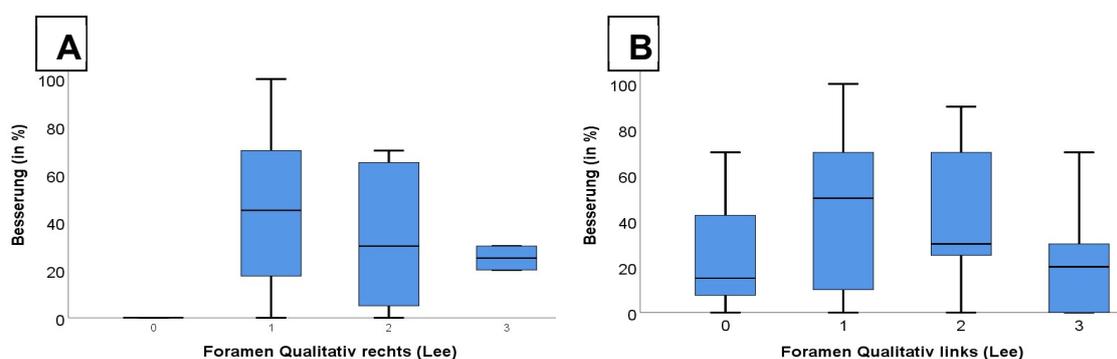


Abbildung 68: Darstellung der Klassifikation der Foramen (Lee) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

Die Boxplot Darstellung zeigt die Einteilung der Foramenstenose nach Lee im Vergleich zu der postinfiltrativen Schmerzverbesserung. A) Ergebnisse für die rechten Foramen, B) Ergebnisse für die linken Foramen

3.5.2.2.2.2 Klassifikation der Facettengelenkdegeneration in Bezug auf die Beschwerdeverbesserung

Die Einteilung der Gelenkdegeneration erfolgte anhand der Klassifikation nach Weißhaupt. Der Kendall's tau beträgt für die rechten Gelenke $\tau 0,051$ und für die linken Gelenke $\tau -0,066$. Zusätzlich wurde ein p-Wert rechts von $p=0,663$ und links von $p=0,578$ erzielt.

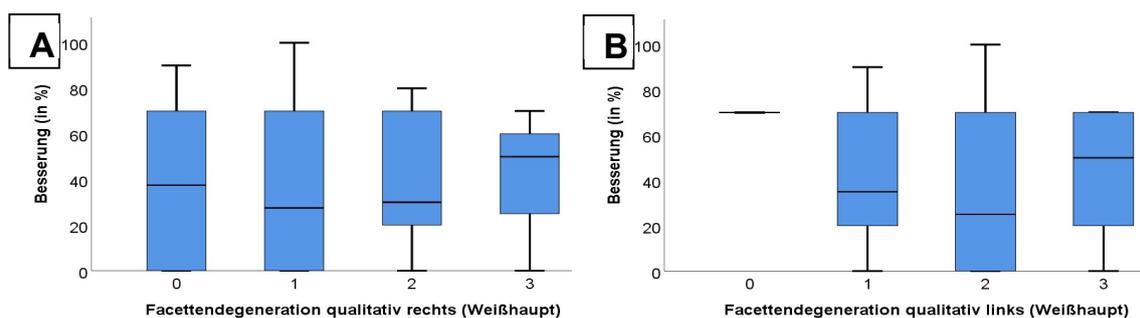


Abbildung 69: Darstellungen der Facettengelenkdegeneration (Weißhaupt) in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

Die beiden Boxplot Diagramme zeigen die Klassifikation der Facettengelenkdegeneration im Vergleich zu den postinfiltrativen Besserungen. A) Ergebnisse für die rechten -, B) Ergebnisse für die linken Foramen

3.5.2.2.3 Intraartikuläre Flüssigkeit in den Facettengelenken in Bezug auf die Beschwerdebesserung

Bei der Bestimmung des Vorhandenseins eines Ergusses (intraartikuläre Flüssigkeit) in den Facettengelenken in Bezug auf die Schmerzbesserung liegt der Kendall's tau Wert für die rechten Facettengelenke bei τ 0,075 und für die linken Facettengelenken bei τ 0,022. Des Weiteren zeigen sich p-Werte von $p=0,859$ für die linken und $p=0,540$ für die rechten Facettengelenke.

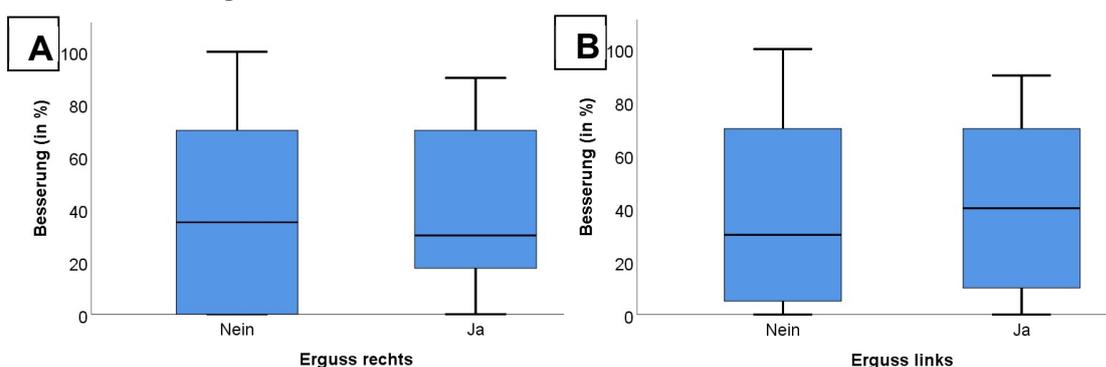


Abbildung 70: Darstellung intraartikulären Flüssigkeit in Bezug auf die Beschwerdesymptomatik bei der Facetteninfiltration

Die beiden Boxplot Diagramme zeigen das Vorhandensein von intraartikulärer Flüssigkeit (Erguss) im Vergleich zu den postinfiltrativen Beschwerdebesserung.

4. Diskussion

In dieser Studie sollte untersucht werden, ob es eine Korrelation zwischen der MRT-Diagnostik bei degenerativen Lendenwirbelsäulenerkrankungen und der von den Patienten subjektiv empfundenen Schmerzlinderung nach Infiltrationen gibt. Für die Beurteilung der MRT-Scans werden in der Literatur zahlreiche Klassifizierungssysteme vorgeschlagen. Diese Studien stützen sich hauptsächlich auf die Schlussfolgerung erfahrener Experten/Kliniker. Ziel dieser Studie war es zudem, den Einfluss eines Messtrainings auf die Messgenauigkeit bei Befundungen von MRT Scans an der Wirbelsäule zu untersuchen.

Um den Einfluss eines Messtrainings zu bestimmen, wurden eine Übungsmessung sowie eine anschließende Vergleichsmessung durchgeführt. Der Versuchsleiter (VL), eine zahnmedizinische Studentin (initial keine Erfahrung in der MRT Diagnostik), und zwei erfahrene Wirbelsäulenchirurgen (Exp1 und Exp2) werteten 30 Patienten anhand beschriebener MRT Messtechniken aus. Zuvor erfolgte ein Messtraining (Übungsmessung) zwischen dem VL und Exp1. Nach abgeschlossener Übungsmessung erfolgte ein Feedbackgespräch, in dem Messfehler und Unklarheiten besprochen wurden.

Die Studienmessung unterteilte sich in 2 Patientengruppen, wie in den vorherigen Abschnitten erwähnt. Aus dem aktuellen Studienkollektiv wurden insgesamt 10 quantitative Messtechniken und 4 qualitative Messklassifikationen ausgesucht. Unmittelbar nach der Infiltration wurde die Schmerzlinderung von den Patienten in Prozent angegeben.

Nachfolgend wurden die Messergebnisse der Übungs-, Vergleichs- und Studienmessung diskutiert und Fehlerquellen erörtert. Zudem wurden ähnliche Studien aus der Literatur mit den Ergebnissen dieser Studie verglichen.

4.1 Übungs- und Vergleichsmessung

In den letzten Jahren haben sich nur wenige Arbeiten mit dem Einfluss eines Messtrainings auf die Messgenauigkeit bei der MRT-Bildgebung im Bereich der lumbalen Wirbelsäule beschäftigt.

Carrino et al. untersuchte die Inter- und Intraobserver Variabilität zwischen vier erfahrenen Ärzten bei der Befundung von MRT-Scans an der lumbalen Wirbelsäule. Drei der Untersucher waren Radiologen. Der vierte Untersucher war ein Wirbelsäulenchirurg mit mehr als 25 Jahren Erfahrung auf dem Gebiet der MRT Diagnostik. Ähnlich wie in unserer durchgeführten Studie erhielten die Studienteilnehmer ein Handbuch mit Definitionen und informativem Bildmaterial. Messtechniken und Klassifizierungssysteme zur Befundung der Facettengelenksdegeneration und Bestimmung der Spinalkanalstenose waren nicht Bestandteil der Carrino-Studie. Vergleicht man die Ergebnisse von Carrino mit unserer Studie, so zeigt sich in der Carrino-Studie nur bei der Betrachtung der Bandscheibendegeneration eine gute Interobserver-Übereinstimmung ($\kappa = 0,66$). Bei allen anderen Parametern in der Carrino-Studie wurden lediglich moderate Interobserver Übereinstimmungen erzielt. In unserer Studie waren ebenfalls einzelne mittelmäßige Übereinstimmungen zwischen den erfahrenen Experten erzielt worden, wie beispielsweise bei der Bestimmung der Facettengelenkdegeneration nach Weißhaupt ($\kappa = 0,47$). Dennoch zeigten sich in unserer Studie auch „beachtliche“ (substantial) Interobserver Übereinstimmungen, beispielsweise bei der Bestimmung der Spinalkanalstenose nach Schizas (Exp1/Exp2 $\kappa = 0,780$). Der Einfluss eines spezifischen Messtrainings wurde in der Arbeitsgruppe um Carrino nicht untersucht. Carrino et al. kam abschließend zu der Schlussfolgerung, dass eine Übereinstimmung der MRT Befundung nur mit ausreichendem Training und verfügbarem Hilfetool, wie Bild- und Lehratlanten, sichergestellt werden kann (Carrino et al. 2009).

Die Arbeitsgruppe von Lurie befasste sich ebenfalls mit dieser Thematik. Neben qualitativen Messparametern wurden die MRT-Bilder auch auf bestimmte quantitative Parameter untersucht. Allerdings wurden nicht die gleichen Parameter wie in unserer Studie verwendet. Zusammenfassend wurden bei der Lurie-Studie moderate bis beachtliche Übereinstimmungen erzielt. Beispielsweise wurde eine moderate

Interobserver Übereinstimmung ($\kappa = 0,58$) bei der Bestimmung der Foramenstenose erzielt. Eine beachtliche Übereinstimmung mit $\kappa = 0,73$ zeigte sich bei der Lurie Studie beispielsweise bei Betrachtung der Spinalkanalstenose. Wie bei der Carrino Studie wurden in der Studie um Lurie die Messungen von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen mit unterschiedlicher kernspintomographischer Erfahrung erhoben. Aufgrund dessen konnte auch hier keine klare Aussage über die Wirksamkeit eines Messtrainings gemacht werden. Ähnlich wie in unserer Studie wurde bei der Lurie-Studie vor der Vergleichsmessung eine Probemessung, mit einer Reihe von MRT-Bildern, durchgeführt. Allen teilnehmenden Untersuchern war bewusst, dass die zu untersuchenden MRT-Bilder ausschließlich von Patienten mit schweren Wirbelsäulenpathologien stammten. Des Weiteren lag den Untersuchern in der Lurie-Studie bereits die Diagnose des Patienten vor. Diese Tatsachen können aus unserer Sicht einen Einfluss auf die Interpretation der MRT-Bilder gehabt haben. Zudem wurde in der Studie von Lurie, ebenfalls wie bereits bei der Studie um Carrino, kein Normalkollektiv untersucht (Lurie et al. 2008).

Die Studie von Winklhofer et. al untersuchte ebenfalls die Zuverlässigkeit von verschiedenen Messtechniken für die kernspintomographische Diagnostik der Lendenwirbelsäule. Hierbei wurden insgesamt 19 Messparameter, darunter 5 qualitative Parameter zur Bewertung der lumbalen Spinalkanalstenose, untersucht. Die Studie um Winklhofer ist nur eingeschränkt mit unserer Studie zu vergleichen, da lediglich zwei identische Messparameter in beiden Studien verwendet wurden. Als zusammenfassendes Ergebnis wurden moderate ($\kappa = 0,42$) bis beachtliche ($\kappa = 0,77$) Übereinstimmungen in der Winklhofer Studie erzielt. Hierbei zeigten sich einige Schwächen im Studiendesign auf. Beispielsweise wurden die MRT-Aufnahmen der einzelnen untersuchten Patienten an unterschiedlichen Einrichtungen mit verschiedenen MRT-Geräten angefertigt. Zudem werteten die MRT-Bilder zwei Radiologen mit unterschiedlicher Erfahrung in der Kernspintomographie aus. Auch in dieser Studie wurde beiden Untersuchern Informationsmaterial über die Messparameter zu Verfügung gestellt. Ein Messtraining oder Austausch über mögliche Messfehler oder Unklarheiten fand in dieser Studie, wie in den zuvor beschriebenen Studien, nicht statt (Winklhofer et al. 2017).

Zusammenfassend ist zu der Thematik bezüglich des Einflusses eines Messtrainings durch die bisherigen Studien nur eine eingeschränkte Aussage zu treffen. In den vorgestellten Studien wurden lediglich die Messergebnisse zwischen einzelnen Experten untersucht. Ihr Expertenwissen, sowie ihre Messfähigkeit beruht auf jahrelanger beruflicher Erfahrung. Hier stellt sich aus unserer Sicht die Frage, ob eine hohe Verlässlichkeit/Genauigkeit bei der Bestimmung der Messparameter durch eine jahrelange Berufserfahrung gegeben ist. Deshalb müssen aus unserer Sicht Bedingungen erfasst werden, die eine MRT-Befundung anhand gewählter Messmethoden zuverlässig gestalten.

Im Folgenden werden die Messergebnisse der Übungs- und Vergleichsmessung näher erläutert. Insgesamt zeigt sich bei der Übungsmessung eine exzellente Übereinstimmung von VL und Exp1 nach erfolgtem Messtraining. So waren wie im Abschnitt 3.3.1 bereits beschrieben, der ICC bei Untersuchungen des sagittalen Durchmessers des Duralsacks vor den Übungen schon sehr hoch. Dennoch zeigten sich nach den Übungen nahezu identische Übereinstimmungen, mit beispielsweise einem ICC von 0,996 auf den Messhöhen 2 und 3.

Die Messung des transversalen Durchmessers war einer der Parameter, welcher initial vor der Übung eine der niedrigsten Übereinstimmungen aller quantitativen Messparameter erreichte. Hierbei lag die Schwierigkeit darin, dass der Versuchsleiter initial nicht die richtige Höhe zur Bestimmung der Messwerte gewählt hat. Wie in dem Textabschnitt 2.2.1.1.2 beschrieben, wird dabei der Abstand der Ligg. Flavaa bestimmt. Aufgrund der anatomischen Gegebenheiten ist oftmals die exakte Höhenbestimmung schwierig. Dies kann zu unterschiedlichen Messwerten führen. Dies wurde zwischen Exp1 und VL detailliert anhand mehrerer Beispiele besprochen, sodass bei der zweiten Messung des VL eine extrem hohe Übereinstimmung erzielt werden konnte.

Die größte Abweichung der quantitativen Messparameter trat bei der Bestimmung der Breite des Foramen nervale auf. Hierbei wurde vor dem Messtraining eine mittelmäßige Übereinstimmung erzielt. Die Abweichung der Messungen kann verschiedene Gründe gehabt haben. Zum einen kann sich die Bestimmung der engsten Stelle, wie in Abschnitt 2.2.2.1.1 dargestellt, schwierig gestalten. Vor allem eine schlechte Bildqualität erschwert die Abgrenzung des Foramen nervale zu den angrenzenden Strukturen. Zudem kann die

sagittale Höhenbestimmung mithilfe des Lokalizers Probleme bereiten. Aufgrund mehrerer axialen Bilder auf der die Bandscheibe abgebildet ist, kann hier eine unterschiedliche Wahl des Bildes zu einer Fehlerquelle führen.

Ein Vergleich der quantitativen mit den qualitativen Messparametern ergab, dass die Übereinstimmung vor dem Messtraining bei allen qualitativen Messtechniken deutlich niedriger war. So war bei der Beurteilung der Spinalkanalstenose nach Schizas zu Beginn nur eine geringfügige Übereinstimmung (κ 0,133) zu verzeichnen. Eine ebenso geringe Übereinstimmung wurde bei der Klassifikation der Facettengelenkdegeneration nach Lee (κ 0,152) erzielt. Nach den Übungsmessungen des VL wurde auch bei der Bestimmung der Facettengelenkdegeneration nach Lee eine beachtliche Übereinstimmung (κ 0,761) erreicht. Eine perfekte Übereinstimmung (κ 1) lag nach den Übungsmessungen bei den qualitativen Parametern für die Spinalkanalstenose und die Neuroforaminalstenose vor.

Somit lässt sich aus unserer Sicht unsere Hypothese klar bestätigen, dass ein gezieltes Messtraining einen deutlich positiven Einfluss auf die Messgenauigkeit bei Befundung von MRT-Bildern hat, da bei nahezu allen Messparametern eine hervorragende Übereinstimmung zwischen dem Studenten (VL) und dem Experten 1 aufgezeigt werden konnte.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung bestätigen unsere Hypothese und zeigen deutlich den positiven Einfluss eines Messtrainings. Für den Studenten (VL) und den Wirbelsäulenchirurgen (Exp1) konnten bei der Vergleichsmessung in fast allen Bereichen hervorragende Übereinstimmungen erzielt werden. Dagegen zeigte der zweite Chirurg (Exp2) obgleich mit dem Studenten (VL) oder mit dem Chirurgen (Exp1) in praktisch allen Bereichen deutlich niedrigere Übereinstimmungen. So waren, wie im Abschnitt 3.4.1 beschrieben, die Interobserver-Reliabilität der sagittalen Durchmesser des Duralsackes auf allen 4 Höhen bei VL und Exp1 exzellent (z.B. sag. D. Duralsack Höhe 1 ICC (3.1) = 0,979). Beim Vergleich der Übereinstimmungen von Exp2 zu den beiden anderen Messteilnehmer zeigt sich eine höhere Übereinstimmung zwischen Exp2 und Exp1. Für die Messung des sagittalen Durchmessers des Duralsackes auf Höhe 4 konnte zwischen Exp1 und Exp2 eine gute Übereinstimmung (ICC = 0,638) erzielt werden. Die Messergebnisse zwischen Exp2 und VL bezüglich des gleichen Messparameters stimmten dagegen nur mittelmäßig (ICC = 0,568) überein. Abgesehen von einzelnen

quantitativen Messparameter der Spinalkanalstenose, blieb die Interobserver-Reliabilitäten bei Exp2 durchgehend mittelmäßig bis gut. Bei der Flächenmessung des Duralsackes konnte Exp2 eine sehr hohe Übereinstimmung mit beiden Messteilnehmern erreichen (Exp1Exp2 ICC = 0,863, VLExp2 ICC = 0,842). Eine exzellente Reliabilität konnte allerdings auch VL und Exp1 bei diesem Parameter aufweisen, mit einem etwas höheren ICC von 0,972. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei der Messung des transversalen Durchmessers. Aufgrund der Ergebnisse dieser beiden Parameter könnte man daraus schließen, dass eine spezifische Messschulung den Erfahrungsschatz eines langjährig tätigen Arztes lediglich gleichzusetzen ist. Wie zuvor bereits erwähnt, untersuchte Winklhofer in seiner Studie sowohl quantitative, als auch qualitative Messparameter. Einzig und allein die Flächenmessung des Duralsacks wurde von dieser und unserer Studie nach denselben Kriterien gemessen. Die Messteilnehmer konnten hierbei eine ebenfalls exzellente Übereinstimmung (ICC = 0,81) erzielen. Ebenso wie in dieser Studie erhielten sie Informationsmaterial zu den Parametern und besprachen zuvor Unstimmigkeiten. Die Auswirkung des Messtrainings ist in dieser Studie nur bedingt zu beurteilen. Im Gegensatz zu unserer Studie werteten die MRT-Bilder zwei Radiologen mit einer Berufserfahrung von 13 und 6 Jahren aus (Winklhofer et al. 2017). Unklar bleibt inwiefern die Berufserfahrung einen Einfluss auf die Auswirkung des Messtrainings hatte. In unserer Studie konnte der Medizinstudent keinerlei MRT-Erfahrung vorweisen und erreichte mit dem Chirurgen, der mit ihm das Messtraining leitete, durchschnittlich bessere Übereinstimmungen. Aufgrund dessen könnte man daraus schließen, dass eine gezielte Messschulung einen positiven Effekt auf die Fehlerquote bei der Beurteilung der MRT-Bilder hat.

Insgesamt zeigten die quantitativen Messparameter der Foraminalstenose schwächere Korrelationen aller drei Messteilnehmer. Beispielsweise wurde für die Bestimmung des Durchmessers des Neuroforamen nach Beers eine mittelmäßig gute Übereinstimmung (ICC = 0,557) erzielt. Bei den quantitativen Messparametern der Foraminalstenose stimmten die Messergebnisse von VL und Exp1 wiederum nahezu perfekt überein. Eine Ausnahme war die Bestimmung des Durchmessers der Foramen auf Bandscheibenhöhe. Hierbei konnte nur eine gute Übereinstimmung erzielt werden (ICC = 0,611). Die Übereinstimmung des Studenten mit Exp2, konnte bei diesem Messparameter nur als gering verzeichnet werden (ICC = 0,302). Auch die beiden Chirurgen untereinander

erzielten hierbei nur eine geringe Übereinstimmung mit dem geringsten erzielten ICC von 0,240. Ein möglicher Grund für die Abweichung der Messungen könnte die Schwierigkeit der sagittalen Bandscheibenhöhenbestimmung mit dem Lokalizier sein. Im Grunde müsste diese exakt mittig parallel durch die Bandscheibe verlaufen. Dabei kann es vorkommen, dass zwischen zwei Höhen gewählt werden muss. Ist dies der Fall, sollte das Bild mit dem geringsten Durchmesser gewählt werden. Eine vergleichsweise geringe Übereinstimmung wurde bei der Durchmesserbestimmung des Foramen nach Beers zwischen VL und Exp2 (ICC = 0,362) erzielt. Demgegenüber konnten beide Chirurgen eine mittelmäßige Übereinstimmung (ICC = 0,530) erreichen. Ein Fehler der bei genauer Betrachtung dieser Messergebnisse auffällt ist, dass VL dazu neigte, die Foramina breiter zu messen als dies Exp1 und Exp2 getan haben. Möglicherweise beurteilte VL die Messgrenze großzügiger, indem diese beispielsweise den Rand der Facettengelenkkapsel weiter posterior bestimmte.

Bei der Betrachtung der qualitativen Parameter, die in den früheren Studien häufiger in Bezug zu einem Messtraining untersucht wurden, zeigte sich die größte Übereinstimmung bei der Klassifikation der Spinalkanalstenose nach Schizas. Alle drei Messteilnehmerkombinationen erzielten hierbei eine fast perfekte Übereinstimmung. Diese Ergebnisse werden auch in der Studie von Winklhofer unterstützt. Hierbei konnte zwar nur eine beachtliche Übereinstimmung erreicht werden, allerdings zählte der Messparameter ebenfalls zu denen mit der stärksten Korrelation (Winklhofer et al. 2017). Eine derart fast perfekte Übereinstimmung könnte aufgrund unserer Vereinfachung der Klassifikation gelegen haben. Nach Schizas wurde die Kategorie A der Spinalkanalstenose in 4 Untergruppen eingeteilt. Aufgrund der Schwierigkeiten und Unklarheiten, die bereits bei der Einführung in die MRT-Messungen von VL mit Exp1 beobachtet wurde, wurde für diese Studie die Untergruppen der Kategorie A in eine Kategorie zusammengefasst.

Das Merkmal, das im Allgemeinen bei allen Messungen eine bessere Übereinstimmung zwischen VL und Exp1 erreicht wurde, machte sich am deutlichsten bei der Bestimmung der Facettengelenksdegeneration nach Weishaupt bemerkbar. Hierbei erhielten VL und Exp1 eine fast perfekte Übereinstimmung, während bei den anderen

Messteilnehmerkombinationen nur moderate Übereinstimmungen erzielt werden konnten.

Aufgrund dessen könnte man daraus schließen, dass eine gezielte Messschulung die Fehlerquote bei der Beurteilung der MRT-Bilder deutlich senkt. Zusammenfassend sollen diese Ergebnisse Einrichtungen ermutigen, einen Schwerpunkt auf ein gezieltes Messtraining zu legen. Außerdem betont dies die Notwendigkeit nach einer einheitlichen Empfehlung von Messparametern für die MRT-Diagnostik.

4.2 Studienmessung

Bezüglich unserer Studienmessung konnten wir keine wesentlichen Korrelationen zwischen den verschiedenen Messparametern und der subjektiven Schmerzlinderung, sowohl bei der epiduralen Infiltration als auch bei der Facetteninfiltration, feststellen (siehe Abschnitt 3.5). Bei der epiduralen Infiltration bildet lediglich die Bandscheibenhöhe als einziger Parameter eine schwache Übereinstimmung (von $\tau = -0,187$, $p = 0,009$) mit der berichteten Schmerzverbesserung. Die Ergebnisse unserer Studie decken sich hierbei auch mit dem aktuellen Stand der Literatur. Auch hier sind nur in seltensten Fällen wesentliche Korrelationen aufgezeigt worden.

Die Arbeitsgruppe um Goni untersuchte beispielsweise die Korrelation zwischen dem anterior-posterior Durchmesser des Spinalkanals, sowie der Duralsack-Querschnittsfläche und den klinischen Symptomen der Patienten unter Verwendung des Oswestry Disability Index (ODI). Der sogenannte ODI ist ein Hilfstool, womit die Patienten ihr Beschwerdesymptomatik klassifizieren können. Im Gegensatz zur NRS-Skala werden hierbei Alltagsaktivitäten, wie beispielsweise das Schlafen miteinbezogen (Goni et al. 2014).

Kim et al. untersuchte ebenfalls die Korrelation zwischen den oben genannten Messparametern und der Beschwerdesymptomatik bei Patienten mit einer zentralen lumbalen Spinalkanalstenose. Neben dem ODI wurden die Symptome zusätzlich mit der visuellen Analogskala (VAS) erfasst. Des Weiteren wurde die Gehstrecke der einzelnen Patienten eruiert. Obwohl beide Studien nur die klinischen Symptome und andere Messinstrumente für die Darstellung der Schmerzwahrnehmung der Patienten verwendeten, sind die Ergebnisse mit denen aus unserer Studie vergleichbar (Kim et al. 2015).

Auch eine weitere Untersuchung der Arbeitsgruppe um Sirvanci zeigte keine signifikanten Korrelationen zwischen den quantitativen MRT-Auswertungen und den entsprechenden ODI Erfassungen bezüglich Patienten mit einer lateralen Stenose. Dies untermauert nochmals die These, dass bei der Diagnosefindung nicht allein die Magnetresonanztomographie ausschlaggebend ist. Allerdings wurden für diese Studien

ausschließlich Patienten ausgewählt, die ausgeprägte multisegmentale degenerative MRT-Befunde vorzuweisen hatten (Sirvanci et al. 2008).

Lediglich die Studie von Kuittinen zeigte eine signifikante Korrelation zwischen der qualitativen bewerteten zentralen Spinalkanalstenose und der postoperativen Beschwerdeverbesserung. Des Weiteren zeigten die postoperativen Patienten mit einer schweren zentralen Stenose weniger Bein- und Rückenschmerzen, sowie ein generell gesteigertes Wohlbefinden. Die signifikanten Korrelationen konnten aber nur bei den qualitativen Messparametern aufgezeigt werden. Im Gegensatz hierzu zeigten sich bei den quantitativen Messparameter keine Korrelation. Zusätzlich zeigten sich auch in Bezug auf das Studiendesign einige Unterschiede zwischen der Studie von Kuittinen und unserer Studie. Bei Kuittinen et al wurden nur Patienten mit einer lumbalen Spinalkanalstenose in die Studie eingeschlossen. Des Weiteren erhielten zudem alle Patienten (84 Personen) eine chirurgische Therapie. Die Erfassung der klinischen Symptomatik, sowie der Patientenzufriedenheit wurde erst nach 2 Jahren postoperativ bestimmt (Kuittinen et al. 2014).

Auch bei Betrachtung der Messergebnisse nach durchgeführter Facettengelenkinfiltration waren keine wesentlichen Korrelationen zu erkennen. Nur wenige Studien in der Literatur untersuchten die Verbindung zwischen einem positiven Outcome einer Facetteninfiltration und der MRT-Bildgebung.

Gorbach et al. verwendeten ebenfalls die Einteilung der Facettengelenksdegeneration nach Weißhaupt, um die Wirksamkeit der intraartikulären Facettengelenksinfiltration zu prüfen. Bei diesen Ergebnissen zeigte sich, dass keine wesentliche Korrelation zwischen der MRT-Auswertung und der Patientenzufriedenheit nach Facettengelenksinfiltration besteht. Zusätzlich wurden in der Studie um Gorbach zu der akuten Schmerzsymptomatik auch der Einfluss von Provokationsbewegungen, sowie des maximalen Schmerzpegels und die Schmerzperiode bestimmt. Des Weiteren wurde nicht nur die sofortige Schmerzverbesserung, sondern auch die kurzzeitige Schmerzverbesserung (1 Woche) und eine mittelfristige Schmerzverbesserung (3 Monate) untersucht. Aufgrund dieses Studiendesigns konnte eine gezieltere Schmerzbewertung auch für einen längeren Zeitpunkt erfasst werden (Gorbach et al. 2006).

Mit 14 Messparametern hat unsere durchgeführte Studie eine große Anzahl an verschiedenen einzelnen Messtechniken für die kernspintomographische Bildgebung erfasst. Keine der bisherigen Studien in der Literatur hatte so viele verschiedene Messtechniken in die Untersuchungen mit einbezogen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die in dieser Studie verwendeten MRT-Mess- und Klassifizierungssysteme nicht mit der subjektiv empfundenen Schmerzlinderung der Patienten nach Infiltration korrelieren, weder nach epiduraler Infiltration noch nach Facettengelenkinfiltration. Diese Ergebnisse und Theorien werden auch durch bisherige Studien bestätigt.

Was könnten die Ursachen für eine fehlende Korrelation zwischen der MRT-Diagnostik und den einzelnen Schmerzveränderungen vor und nach der Infiltration sein?

Einer der wesentlichen Gründe aus unserer Sicht sind die häufig multisegmentalen Pathologien an der Lendenwirbelsäule. Eine Charakterisierung des Rückenschmerzes auf ein einzelnes Bewegungssegment ist somit nur sehr selten vorzufinden. Die Degeneration der wirbelsäulennahen Strukturen ist ein natürlicher, physiologischer Prozess, der bei jedem Menschen in verschiedenem Ausmaß fortschreitet. Das Maß der altersentsprechenden Degeneration ist bisher nicht definiert und auch nicht bis ins Detail untersucht (Boden et al. 1990). Dabei hängen diese degenerativen Prozesse häufig miteinander zusammen und beeinflussen sich gegenseitig. So stellt sich die Frage, ob die Ursache der Beschwerden allein einer Struktur bzw. einem Segment zuzuordnen ist. Des Weiteren sind nicht nur die Degenerationen multifaktoriell bedingt, sondern auch der Rückenschmerz im Allgemeinen. Deshalb kann eine Beschwerdebesserung durch eine gezielte Therapie auf ein Bewegungssegment auch durch einen anderen positiven Effekt im Bereich umliegender Strukturen resultieren. Somit ist es häufig für den behandelnden Arzt schwierig, den Erfolg einer beispielsweise operativen Therapie auf eine gezielte Struktur zurückzuführen.

Des Weiteren könnte ein Grund für die fehlende Korrelation zwischen der kernspintomographischen Bildgebung und der klinischen Beschwerdesymptomatik der dynamische Prozess bei degenerativen Lendenwirbelsäulenerkrankungen sein (siehe Abschnitt 1.4.3). Zudem können Patienten mit radiologisch gesicherten ausgeprägten

Degenerationen auch keine beziehungsweise nur diskrete Beschwerden haben. Besonders bei langsam fortschreitenden Degenerationen kann der Körper durch verschiedene Anpassungsmöglichkeiten die Beschwerdesymptomatik lange Zeit unterdrücken. Gleichmaßen gibt es aber auch Patienten mit nur sehr moderaten radiologisch nachweisbaren Pathologien, welche aber unter starken klinischen Beschwerden leiden. Bei akut auftretenden Rückenschmerzen liegt häufig eine direkte Verdrängung beziehungsweise Komprimierung anatomischer Strukturen vor.

Aufgrund dieser eingeschränkten Beurteilbarkeit der Rückenschmerzen ist die Auswahl der passenden Therapiemöglichkeit für den behandelnden Arzt nicht immer leicht. Beispielsweise zeigen Langzeitstudien bei operativer Dekompression von neuralen Strukturen nur bei ca. zwei Drittel der Patienten zufriedenstellende Ergebnisse (Atlas et al. 2005). Dementsprechend wird häufig unter Experten die Indikation der operativen Therapieformen kritisiert. Deshalb sind aus unserer Sicht weitere Untersuchungen notwendig, welche sich explizit auf monosegmentale Pathologien im Bereich der Lendenwirbelsäule konzentrieren.

Ein weiterer ausschlaggebender Grund der geringen Korrelationen unserer Untersuchungen liegt aus unserer Sicht an der schwierigen Objektivierbarkeit des Schmerzempfindens einzelner Patienten. „Schmerz ist, was der Patient als Schmerz erlebt“ (Sohn 2002). Jeder Mensch empfindet Schmerzen sehr individuell. Dabei können einzelne Schmerzcharakteristiken, wie beispielsweise die Frequenz (z.B. andauernd, morgens, akut), gut verglichen werden. Dagegen zeigen sich andere Faktoren, wie beispielsweise die Schmerzstärke oder Schmerzintensität, als nur sehr eingeschränkt beurteilbar beziehungsweise vergleichbar. Denn diese Charakteristika obliegen einer starken Subjektivität. Zudem werden durch verschiedene Einflussfaktoren, beispielsweise emotionaler Zustand des Patienten, die Objektivierbarkeit noch erschwert.

Die unterschiedlichen Schmerzskaleten sind eine Möglichkeit, um die Schmerzintensität besser einteilen zu können. Allerdings unterliegen diesen Schmerzdarstellungen ebenfalls reine subjektive Empfindungszustände. Aus unserer Sicht sind deshalb ausgewählte Schmerzskaleten, wie die NAS, besonders zur Darstellung des Schmerzverlaufes geeignet. In unserer Studie wurde die Schmerverbesserung von den Patienten in Prozentangaben

nach der Infiltration angegeben. Allein diese anamnestiche Angabe lag dem Versuchsleiter für die Auswertung vor.

Wie bereits im Abschnitt zuvor dargestellt, sind mehrere Faktoren für die Schmerzentstehung beziehungsweise Chronifizierung verantwortlich. Soziale und psychische Faktoren beeinflussen wesentlich die subjektive Schmerzwahrnehmung. Vor allem psychosomatische Beschwerden oder Depressionen spielen bei dem individuellen Schmerzerleben eine entscheidende Rolle. Beispielsweise gibt es zahlreiche Studien die eine Korrelation zwischen einer depressiven Grunderkrankung und einhergehenden schlechteren postoperativen Ergebnissen aufzeigen (Chaichana et al. 2011, Trief et al. 2006)

Die Arbeitsgruppe um Kim konnte in einer kürzlich veröffentlichten Studie zeigen, dass depressive Patienten nach einer lumbalen epiduralen Infiltration ein schlechteres Outcome bezüglich der Beschwerdesymptomatik aufweisen, als die untersuchte Kontrollgruppe. Das Schmerzempfinden wurde in dieser Studie unter anderem mit dem NRS und dem ODI vor und nach der Infiltration bestimmt (Kim et al. 2017). Dieses Ergebnis unterstreicht den Einfluss von emotionalen Gegebenheiten auf das Schmerzempfinden. Abschließend kann man zur Kim-Studie sagen, dass ein Nutzen einer Infiltration bei depressiven Patienten mit Wirbelsäulenbeschwerden begrenzt ist. Des Weiteren sollte aus unserer Sicht bei zukünftigen Studien die Depression als Einflussfaktor gezielt in das Studiendesign mit einbezogen werden.

Zuletzt wird noch auf die Bildgebung der Kernspintomographie selbst eingegangen. Aufgrund der technischen Verbesserung in der Kernspintomographie hinsichtlich einer besseren Auflösung nimmt die Anzahl an durchgeführten MRTs stetig zu. Mit wachsendem Vertrauen in die MRT-Diagnostik stützen die Ärzte ihre Therapiewahl zunehmend auf die kernspintomographische Bildgebung. Die allgemeine Korrelation zwischen MRT-Bildgebung und klinischer Symptomatik ist allerdings begrenzt. Beispielsweise zeigte eine Studie von Maureen und Kollegen, dass 52 Prozent der Patienten, die keine Beschwerden aufzeigten eine Bandscheibenvorwölbung auf mindestens einer Ebene vorzuweisen hatten. Im Gegensatz hierzu zeigten 36 Prozent der asymptomatischen Probanden keinen pathologischen Bandscheibenbefund. Diese

Ergebnisse unterstützen die Tatsache, dass nur ein Bruchteil der radiologischen pathologischen Befunde auch mit einer entsprechenden Klinik einhergehen.

Ab dem 60. Lebensjahr liegt bei 20% aller untersuchten Probanden eine Spinalkanalstenose in der MRT-Diagnostik vor (Boden et al. 1990). Deshalb ist aus unserer Sicht umso entscheidender, dass eine therapeutische Intervention sich hauptsächlich auf die klinische Diagnostik, sowie Anamnese stützt.

Zu den Schwächen der Studie beziehungsweise als mögliche Verbesserung des Studiendesigns könnte man in zukünftigen Studien nur Patienten mit monosegmentalen lumbalen Pathologien untersuchen. Die Schmerzvisualisierung sowie die gezielte Diagnostik kann bei multisegmentalen Pathologien an der Lendenwirbelsäule nur sehr schwer differenziert werden. Ein weiterer Punkt ist die differenziertere Charakterisierung des Schmerzempfindens. Hier sollte in zukünftigen Studien die subjektive Schmerzwahrnehmung vor und nach der Infiltration mittels geeigneter Schmerzfragebögen ermittelt werden. Des Weiteren ist aus unserer Sicht der Verlauf der Schmerzwahrnehmung ebenfalls sehr interessant, um gegebenenfalls Rückschlüsse für geeignete Therapie zu ziehen. Die MRT-Diagnostik ist aktuell das wichtigste Diagnostik-Tool zur Beurteilung des Spinalkanals und seiner umliegenden Strukturen. Dennoch wäre aus unserer Sicht eine zusätzliche Diagnostik mittels Computertomographie sinnvoll, um eine verbesserte Aussagekraft über die Spinalkanalstenose sowie die Facettengelenksarthrose zu erhalten. Dies liegt vor allem an der verbesserten räumlichen Auflösung der abgebildeten knöchernen Strukturen, die ebenfalls bei den beschriebenen Krankheitsbildern essentiell sind. Die vermehrte Strahlenbelastung eines CTs ist natürlich ein Nachteil dieser zusätzlichen Untersuchung.

Des Weiteren wurden die Infiltrationen in unserer Studie mit Hilfe eines Bildwandlers durchgeführt. Auch hier ist eine mögliche 3D CT-gesteuerte Infiltration zur genaueren Positionierung der Infiltrationsnadel zu überdenken. Das Risiko einer Fehlpositionierung beispielsweise bei der Facetteninfiltration ist mit dem Bildwandler im Vergleich zur CT-gestützten Infiltration erhöht. Beispielsweise kann hier unter Durchleuchtung fälschlicherweise anstatt einer intraartikulären Facetteninfiltration eine periradikuläre Infiltration durchgeführt worden sein. Auch hier ist die vermehrte Strahlenbelastung für den Probanden und das medizinische Personal nicht zu unterschätzen.

5 Zusammenfassung

Mit stetiger Verbesserung der kernspintomographischen Bildgebung verlassen sich Ärzte bei ihrer Diagnosestellung zunehmend auf die Befunde der bildgebenden Verfahren. Zur Klassifizierung und Befundung von MRT-Scans wird in der Literatur eine Vielzahl von quantitativen und qualitativen Messinstrumenten vorgeschlagen. Die bildgebende Diagnostik nimmt einen immer größeren Stellenwert in der therapeutischen Intervention ein. Dennoch korrelieren die bildgebenden Befunde häufig nicht mit der klinischen Beschwerdesymptomatik.

Des Weiteren wird die MRT Bildgebung zumeist von Experten befundet. Die Degeneration an der Wirbelsäule tritt meist an verschiedenen anatomischen Strukturen auf. Aufgrund dessen wurde diese Studie konzipiert, um die Schmerzursache mit Hilfe von zielgerichteten Infiltrationen genau zu identifizieren unter Berücksichtigung der durchgeführten MRT Diagnostik.

Unsere Fragestellungen stellten sich wie folgt dar:

- Wie entscheidend wirkt sich ein fachspezifisches Messtraining auf die Ergebnisse aus? Ist ein Messtraining wichtiger als eine jahrelange Berufserfahrung?
- Nimmt die Schmerzlinderung mit zunehmend fortschreitender Pathologie in der MRT Diagnostik nach einer epiduralen Infiltration oder einer Facettengelenkinfiltration ebenfalls zu?

Um diese Fragestellungen beantworten zu können, wurden zahlreiche MRT-Scans von Patienten mit chronischen lumbalen Rückenbeschwerden gesichtet und mittels verschiedenen Mess- und Klassifizierungssystemen bewertet. Hierfür wurden Patienten mit epiduraler Infiltration und Facetteninfiltration separat voneinander betrachtet. In unserer Studie zeigte sich, dass ein spezifisches Messtraining eine deutliche höhere Übereinstimmung der Messgenauigkeit herbeiführt als eine standardisierte Anweisung für erfahrene Ärzte. Der unerfahrene Versuchsleiter und ein Wirbelsäulenchirurg konnten mithilfe eines gezielten gemeinsamen Messtrainings ausgezeichnete Übereinstimmungen erzielen. Bei Betrachtung der Übereinstimmungen zweier Wirbelsäulenchirurgen, bei

dem einer lediglich Informationsmaterial zur Verfügung gestellt bekommen hat, zeigen sich deutlich schlechtere Messergebnisse.

Bei den Untersuchungen der Übereinstimmung zwischen der Schmerzlinderung nach jeweiliger Infiltration und den Messparametern der kernspintomographischen Bilder zeigten sich interessante Ergebnisse. Weder bei dem Patientenkollektiv der epiduralen Infiltration, noch bei der Patientengruppe mit der Facetteninfiltration konnte eine relevante Korrelation zu der subjektiven Schmerzlinderung beobachtet werden. Alle Korrelationswerte lagen unter 0,03. Eine Ausnahme konnte bei der Patientengruppe mit epiduraler Infiltration erzielt werden. Bei dem Messparameter der posterioren Bandscheibenhöhe war eine schwache Übereinstimmung (von $\tau = -0,187$, $p = 0,009$) vorhanden.

Abschließend lässt sich sagen, dass keine Diagnosestellung beziehungsweise Therapie allein auf der MRT-Diagnostik basierend getroffen werden sollte. Die MRT-Diagnostik ist aber weiterhin die entscheidende Bildgebung für die Beurteilung von degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen. Das diagnostische Verfahren ist allerdings nur dann erfolgsversprechend, wenn eine zuverlässige einheitliche Bildgebungsinterpretation durchgeführt wird. Basierend auf den Ergebnissen unsere Studie, empfehlen wir die Anwendung von Referenzmessungen um selbst bei erfahrenen Klinikern eine einheitliche Bildgebungsinterpretation zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Studie sollen ermutigen, ein detailliertes Handbuch mit standardisierten relevanten kernspintomographischen Messparametern zur Verfügung zu stellen, um die MRT-Wirbelsäulendiagnostik ebenfalls zu verbessern. Der Erfolg dieser Hilfestellungen konnte in der Studie anhand der Ergebnisse des unerfahrenen Medizinstudenten belegt werden.

6. Literaturverzeichnis

- Ahlhelm, F., Kelm, J., Naumann, N., Shariat, K., Grunwald, I., Reith, W. and A, N. (2006) Spondylitis/Spondylodiszitis. *Radiologe*, 46, pp. 480-485.
- Andersohn, F. and Walker, J. (2016) Faktencheck Rücken. Ausmaß und regionale Variationen von Behandlungsfällen und bildgebender Diagnostik. in: Bertelsmann Stiftung, Ingef.
- Arnett, F. C., Edworthy, S. M., Bloch, D. A., McShane, D. J., Fries, J. F., Cooper, N. S., Healey, L. A., Kaplan, S. R., Liang, M. H., Luthra, H. S. and et al. (1988) The American Rheumatism Association 1987 revised criteria for the classification of rheumatoid arthritis. *Arthritis Rheum*, 31(3), pp. 315-24.
- Atlas, S. J. and Delitto, A. (2006) Spinal stenosis: surgical versus nonsurgical treatment. *Clin Orthop Relat Res*, 443, pp. 198-207.
- Atlas, S. J., Keller, R. B., Wu, Y. A., Deyo, R. A. and Singer, D. E. (2005) Long-term outcomes of surgical and nonsurgical management of lumbar spinal stenosis: 8 to 10 year results from the maine lumbar spine study. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(8), pp. 936-43.
- Aumüller, G., Aust, G., Engele, J., Kirsch, J., Maio, G., Mayerhofer, A., Mense, S. and Reißig, D. (2017) *Duale Reihe Anatomie, Duale Reihe*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Awad, J. N. and Moskovich, R. (2006) Lumbar disc herniations: surgical versus nonsurgical treatment. *Clin Orthop Relat Res*, 443, pp. 183-97.
- Battie, M. C. and Videman, T. (2006) Lumbar disc degeneration: epidemiology and genetics. *J Bone Joint Surg Am*, 88 Suppl 2, pp. 3-9.
- Battie, M. C., Videman, T., Kaprio, J., Gibbons, L. E., Gill, K., Manninen, H., Saarela, J. and Peltonen, L. (2009) The Twin Spine Study: contributions to a changing view of disc degeneration. *Spine J*, 9(1), pp. 47-59.
- Beers, G. J., Carter, A. P., Leiter, B. E., Tilak, S. P. and Shah, R. R. (1985) Interobserver discrepancies in distance measurements from lumbar spine CT scans. *AJR Am J Roentgenol*, 144(2), pp. 395-8.
- Boden, S. D., McCowin, P. R., Davis, D. O., Dina, T. S., Mark, A. S. and Wiesel, S. (1990) Abnormal magnetic-resonance scans of the cervical spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation. *J Bone Joint Surg Am*, 72(8), pp. 1178-84.
- Börm, W., Meyer, F., Bullmann, V. and Knop, C. (2017) *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, Stuttgart: Schattauer
- Carrino, J. A., Lurie, J. D., Tosteson, A. N., Tosteson, T. D., Carragee, E. J., Kaiser, J., Grove, M. R., Blood, E., Pearson, L. H., Weinstein, J. N. and Herzog, R. (2009) Lumbar spine: reliability of MR imaging findings. *Radiology*, 250(1), pp. 161-70.

- Chaichana, K. L., Mukherjee, D., Adogwa, O., Cheng, J. S. and McGirt, M. J. (2011) Correlation of preoperative depression and somatic perception scales with postoperative disability and quality of life after lumbar discectomy. *J Neurosurg Spine*, 14(2), pp. 261-7.
- Colombier, P., Clouet, J., Hamel, O., Lescaudron, L. and Guicheux, J. (2014) The lumbar intervertebral disc: from embryonic development to degeneration. *Joint Bone Spine*, 81(2), pp. 125-9.
- Cramer, J., Haase, N., Behre, I. and Ostermann, P. A. W. (2003) Spondylitis und Spondylodisitis. *Trauma und Berufskrankheit*, 5, pp. 336-341.
- Destatis (2017) Gesundheit-Krankheitskosten. in: Statistisches Bundesamt.
- Deyo, R. A., Gray, D. T., Kreuter, W., Mirza, S. and Martin, B. I. (2005) United States trends in lumbar fusion surgery for degenerative conditions. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(12), pp. 1441-5; discussion 1446-7.
- Dougados, M. and Baeten, D. (2011) Spondyloarthritis. *Lancet*, 377(9783), pp. 2127-37.
- Dougados, M., van der Linden, S., Juhlin, R., Huitfeldt, B., Amor, B., Calin, A., Cats, A., Dijkmans, B., Olivieri, I., Pasero, G. and et al. (1991) The European Spondylarthropathy Study Group preliminary criteria for the classification of spondylarthropathy. *Arthritis Rheum*, 34(10), pp. 1218-27.
- Eckardt, A. (2011) *Praxis LWS-Erkrankung: Diagnose und Therapie*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Epstein, N. E. (2013) The risks of epidural and transforaminal steroid injections in the Spine: Commentary and a comprehensive review of the literature. *Surg Neurol Int*, 4(Suppl 2), pp. S74-93.
- Feng, H., Danfelter, M., Stromqvist, B. and Heinegard, D. (2006) Extracellular matrix in disc degeneration. *J Bone Joint Surg Am*, 88 Suppl 2, pp. 25-9.
- Fick, R. (1904) *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke unter Berücksichtigung der bewegenden Muskeln, Anatomie der Gelenke Band 1*, Jena: Fischer.
- Fritz, J., Niemeyer, T., Clasen, S., Wiskirchen, J., Tepe, G., Kastler, B., Nagele, T., König, C. W., Claussen, C. D. and Pereira, P. L. (2007) Management of chronic low back pain: rationales, principles, and targets of imaging-guided spinal injections. *Radiographics*, 27(6), pp. 1751-71.
- Fu, M. C., Buerba, R. A., Long, W. D., 3rd, Blizzard, D. J., Lischuk, A. W., Haims, A. H. and Grauer, J. N. (2014) Interrater and intrarater agreements of magnetic resonance imaging findings in the lumbar spine: significant variability across degenerative conditions. *Spine J*, 14(10), pp. 2442-8.
- Genevay, S. and Atlas, S. J. (2010) Lumbar spinal stenosis. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 24(2), pp. 253-65.

- Gibson, J. N. and Waddell, G. (2007a) Surgical interventions for lumbar disc prolapse. *Cochrane Database Syst Rev*, (2), pp. CD001350.
- Gibson, J. N. and Waddell, G. (2007b) Surgical interventions for lumbar disc prolapse: updated Cochrane Review. *Spine (Phila Pa 1976)*, 32(16), pp. 1735-47.
- Goni, V. G., Hampannavar, A., Gopinathan, N. R., Singh, P., Sudesh, P., Logithasan, R. K., Sharma, A., Bk, S. and Sament, R. (2014) Comparison of the Oswestry disability index and magnetic resonance imaging findings in lumbar canal stenosis: an observational study. *Asian Spine J*, 8(1), pp. 44-50.
- Gorbach, C., Schmid, M. R., Elfering, A., Hodler, J. and Boos, N. (2006) Therapeutic efficacy of facet joint blocks. *AJR Am J Roentgenol*, 186(5), pp. 1228-33.
- Gouliouris, T., Aliyu, S. H. and Brown, N. M. (2010) Spondylodiscitis: update on diagnosis and management. *J Antimicrob Chemother*, 65 Suppl 3, pp. iii11-24.
- Graichen, H. and Putz, R. (1999) Anatomical and functional aspects of the thoracic and lumbar spine. *Orthopäde*, 28(5), pp. 424-431.
- Greitemann, B. and Stein, V. (2014) S2k-Leitlinie zur konservativen und rehabilitativen Versorgung bei Bandscheibenvorfällen mit radikulärer Symptomatik. in Chirurgie, D. G. f. O. u. o., (ed.).
- Grifka, J. and Kuster, M. (2011) *Orthopädie und Unfallchirurgie: Für Praxis, Klinik und Facharztprüfung*, Heidelberg: Springer Verlag.
- Grignon, B., Grignon, Y., Mainard, D., Braun, M., Netter, P. and Roland, J. (2000) The structure of the cartilaginous end-plates in elder people. *Surg Radiol Anat*, 22(1), pp. 13-9.
- Hamanishi, C., Matukura, N., Fujita, M., Tomihara, M. and Tanaka, S. (1994) Cross-sectional area of the stenotic lumbar dural tube measured from the transverse views of magnetic resonance imaging. *J Spinal Disord*, 7(5), pp. 388-93.
- Hammer, R. E., Maika, S. D., Richardson, J. A., Tang, J. P. and Taurog, J. D. (1990) Spontaneous inflammatory disease in transgenic rats expressing HLA-B27 and human beta 2m: an animal model of HLA-B27-associated human disorders. *Cell*, 63(5), pp. 1099-112.
- Härle, A. (1989) *Spondylitis, Orthopädische Operationslehre Band I: Wirbelsäule*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Hasegawa, T., An, H. S., Haughton, V. M. and Nowicki, B. H. (1995) Lumbar foraminal stenosis: critical heights of the intervertebral discs and foramina. A cryomicrotome study in cadavera. *J Bone Joint Surg Am*, 77(1), pp. 32-8.
- Hassett, G., Hart, D. J., Manek, N. J., Doyle, D. V. and Spector, T. D. (2003) Risk factors for progression of lumbar spine disc degeneration: the Chingford Study. *Arthritis Rheum*, 48(11), pp. 3112-7.

- Herzog, R. J., Kaiser, J. A., Saal, J. A. and Saal, J. S. (1991) The importance of posterior epidural fat pad in lumbar central canal stenosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 16(6 Suppl), pp. S227-33.
- Hofmann, U. K., Keller R.L., Walter C., Mittag F.: "Predictability of the effects of facet joint infiltration in the degenerate lumbar spine when assessing MRI scans", *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 12/2017
- Hofmann, U.K., Keller R.L., Berstorff M., Walter C., Mittag F.: "Predictability of the Effects of Epidural Injection in Lumbar Spinal Stenosis by Assessment of Lumbar MRI Scans", *Journal of Back Musculoskelet Rehabil*, 11/2019
- Hofmann, U.K., Keller R.L., Gesicki M., Walter C., Mittag F.: "Interobserver Reliability When Classifying MR Imaging of the Lumbar Spine: Written Instructions Alone Do Not Suffice", *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, 09/2019
- Jenis, L. G., An, H. S. and Gordin, R. (2001) Foraminal stenosis of the lumbar spine: a review of 65 surgical cases. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)*, 30(3), pp. 205-11.
- Kayser, R., Mahlfeld, K. and Heyde, C. E. (2008) Das Konzept der stationären Stufendiagnostik bei Patienten mit lumbalem Rückenschmerz: Orthopädische Kompetenz bei der Diagnostik und Behandlung von Rückenschmerzpatienten. *Orthopäde*, 37(4), pp. 285-299.
- Kehrer, M., Pedersen, C., Jensen, T. G. and Lassen, A. T. (2014) Increasing incidence of pyogenic spondylodiscitis: a 14-year population-based study. *J Infect*, 68(4), pp. 313-20.
- Kim, E. J., Chotai, S., Stonko, D. P., Wick, J. B., Schneider, B. J., McGirt, M. J. and Devin, C. J. (2017) Patient-reported outcomes after lumbar epidural steroid injection for degenerative spine disease in depressed versus non-depressed patients. *Spine J*, 17(4), pp. 511-517.
- Kim, Y. U., Kong, Y. G., Lee, J., Cheong, Y., Kim, S., Kim, H. K., Park, J. Y. and Suh, J. H. (2015) Clinical symptoms of lumbar spinal stenosis associated with morphological parameters on magnetic resonance images. *Eur Spine J*, 24(10), pp. 2236-43.
- Krämer, R., Matussek, J. and Theodoros, T. (2013) *Bandscheibenbedingte Erkrankungen: Ursachen, Diagnose, Behandlung, Vorbeugung, Begutachtung*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Krzysiek, R., Breban, M., Ravaud, P., Prejean, M. V., Wijdenes, J., Roy, C., Henry, Y. D., Barbey, C., Trappe, G., Dougados, M., Emilie, D. and French Ankylosing Spondylitis Infliximab, N. (2009) Circulating concentration of infliximab and response to treatment in ankylosing spondylitis: results from a randomized control study. *Arthritis Rheum*, 61(5), pp. 569-76.
- Kuittinen, P., Sipola, P., Leinonen, V., Saari, T., Sinikallio, S., Savolainen, S., Kroger, H., Turunen, V., Airaksinen, O. and Aalto, T. (2014) Preoperative MRI findings predict two-year postoperative clinical outcome in lumbar spinal stenosis. *PLoS One*, 9(9), pp. e106404.

- Landis, J. R. and Koch, G. G. (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), pp. 159-74.
- Laurencin, C. T., Lipson, S. J., Senatus, P., Botchwey, E., Jones, T. R., Koris, M. and Hunter, J. (1999) The stenosis ratio: a new tool for the diagnosis of degenerative spinal stenosis. *Int J Surg Investig*, 1(2), pp. 127-31.
- Lee, S., Lee, J. W., Yeom, J. S., Kim, K. J., Kim, H. J., Chung, S. K. and Kang, H. S. (2010) A practical MRI grading system for lumbar foraminal stenosis. *AJR Am J Roentgenol*, 194(4), pp. 1095-8.
- Linhardt, O., Madl, M. and Boluki, D. (2017) Minimal-invasive Injektionstherapie beim Lumbalsyndrom. *Orthopäde*, 36, pp. 49-58.
- Loeser, J. D. and Volinn, E. (1991) Epidemiology of low back pain. *Neurosurg Clin N Am*, 2(4), pp. 713-8.
- Lurie, J. D., Tosteson, A. N., Tosteson, T. D., Carragee, E., Carrino, J. A., Kaiser, J., Sequeiros, R. T., Lecomte, A. R., Grove, M. R., Blood, E. A., Pearson, L. H., Weinstein, J. N. and Herzog, R. (2008) Reliability of readings of magnetic resonance imaging features of lumbar spinal stenosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 33(14), pp. 1605-10.
- Lurie, J. D., Tosteson, T. D., Tosteson, A. N., Zhao, W., Morgan, T. S., Abdu, W. A., Herkowitz, H. and Weinstein, J. N. (2014) Surgical versus nonoperative treatment for lumbar disc herniation: eight-year results for the spine patient outcomes research trial. *Spine (Phila Pa 1976)*, 39(1), pp. 3-16.
- Magerl, F., Aebi, M., Gertzbein, S. D., Harms, J. and Nazarian, S. (1994) A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J*, 3(4), pp. 184-201.
- Manchikanti, L., Singh, V., Pampati, V., Falco, F. J. and Hirsch, J. A. (2015) Comparison of the efficacy of caudal, interlaminar, and transforaminal epidural injections in managing lumbar disc herniation: is one method superior to the other? *Korean J Pain*, 28(1), pp. 11-21.
- Marschall, J., Hildebrandt, S., Zich, K., Tisch, T., Sörensen, J. and Nolting, H.-D. (2018) *DAK Gesundheitsreport 2018*. Hamburg: IGES Institut
- Marschall, U., L'hoest, H. and Wolik, A. (2012) Vergleich der Kosteneffektivität von Operationen, multimodaler und interventioneller Schmerztherapie bei Rückenschmerzen: Eine Analyse mit Krankenkassendaten. in.
- Mayer, H. M. and Heider, F. C. (2016a) Der lumbale Bandscheibenvorfall. *Orthopädie und Unfallchirurgie Up2date*, Vol. 11(6), pp. 427-447.
- Mayer, H. M. and Heider, F. C. (2016b) Der lumbale Bandscheibenvorfall. *Orthopädie und Unfallchirurgie Up2date*, 11(6), pp. 427-447.
- Meyerding, H. (1932) Surgical treatment and results. *Surg Gynecol Obstet*, 54, pp. 371-377.

- Michiels, I. and Jäger, M. (2017) Spondylodiszitis: Aktuelle Strategien zur Diagnose und Therapie. *Orthopäde*, 9, pp. 785-804.
- Neuhauser, H., Ellert, U. and Ziese, T. (2005) *Chronische Rückenschmerzen in der Allgemeinbevölkerung in Deutschland 2002/2003: Prävalenz und besonders betroffene Bevölkerungsgruppen*, Gesundheitswesen, 10 ed., Thieme.
- Niethard, F. U., Pfeil, J. and Biberthaler, P. (2017) *Orthopädie und Unfallchirurgie*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Oder, B. and Thurnher, S. (2015) Periradikuläre Infiltrationstherapie: Klinische Indikationen, Technik und Ergebnisse. *Radiologe*, 55, pp. 833-839.
- Palmer, K. T., Walsh, K., Bendall, H., Cooper, C. and Coggon, D. (2000) Back pain in Britain: comparison of two prevalence surveys at an interval of 10 years. *BMJ*, 320(7249), pp. 1577-8.
- Pennekamp, W. (2013) Degenerative Veränderungen der Wirbelsäule. *Internist*, 54, pp. 818-826.
- Pfirrmann, C. W., Dora, C., Schmid, M. R., Zanetti, M., Hodler, J. and Boos, N. (2004) MR image-based grading of lumbar nerve root compromise due to disk herniation: reliability study with surgical correlation. *Radiology*, 230(2), pp. 583-8.
- Rauber, A. and Kopsch, F. (1987) *Anatomie des Menschen Band 1: Bewegungsapparat*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Reinhold, M., Eicker, S. O., Schleicher, P. and Schmidt, O. I. (2018) *Wirbelsäule kompakt*, Stuttgart: Schattauer.
- Reith, W., Nabhan, A., Kelm, J., Naumann, N. and Ahlhelm, F. (2006) [Differential diagnosis of back pain]. *Radiologe*, 46(6), pp. 443-53.
- Richard, S., Parker, F., Aghakhani, N., Allegre, G., Portier, F., David, P. and Marsot-Dupuch, K. (2005) [Von Hippel-Lindau disease: recent advances in genetics and clinical management]. *J Neuroradiol*, 32(3), pp. 157-67.
- RKI, D. u. (2015) *Häufigste Diagnosen in Prozent der Behandlungsfälle in Arztpraxen in Nordrhein* Available: http://www.gbe-bund.de/oowa921-install/servlet/oowa/aw92/dboowasys921.xwdevkit/xwd_init?gbe.isgbetol/xs_start_neu/&p_aid=3&p_aid=8266006&nummer=638&p_sprache=D&p_indsp=-&p_aid=89005192.
- Roaf, R. (1960) Spinal injuries. *Burma Med J*, 8, pp. 139-43.
- Rössler, H. and Rüter, W. (2007) *Orthopädie und Unfallchirurgie*, München: Elsevier Verlag.
- Scharf, H. P., Rüter, a., Pohlemann, T., Marzi, I. and Dieter, G. (2011) *Orthopädie und Unfallchirurgie: Facharztwissen nach der neuen Weiterbildungsordnung*, München: Urban & Fischer / Elsevier.

- Schiebler, T. H. and Korf, H.-W. (2007) *Anatomie*, Heidelberg: Steinkopff-Verlag
- Schizas, C., Theumann, N., Burn, A., Tansey, R., Wardlaw, D., Smith, F. W. and Kulik, G. (2010) Qualitative grading of severity of lumbar spinal stenosis based on the morphology of the dural sac on magnetic resonance images. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(21), pp. 1919-24.
- Schmidt, C. O., Raspe, H., Pfingsten, M., Hasenbring, M., Basler, H. D., Eich, W. and Kohlmann, T. (2007) Back pain in the German adult population: prevalence, severity, and sociodemographic correlates in a multiregional survey. *Spine (Phila Pa 1976)*, 32(18), pp. 2005-11.
- Schulte, T., Bullmann, V. and Lerner, T. (2006) Lumbale Spinalkanalstenose. *Der Orthopäde*, 35(6), pp. 675-694.
- Schünke, M. (2000) *Funktionelle Anatomie: Topographie und Funktion des Bewegungssystems*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M. and Wesker, K. (2014) *Prometheus Lernatlas der Anatomie: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*, Prometheus, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M. and Wesker, K. (2015) *Prometheus Lernatlas der Anatomie: Kopf, Hals und Neuroanatomie*, 4th ed., Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Silbergleit, R., Mehta, B. A., Sanders, W. P. and Talati, S. J. (2001) Imaging-guided injection techniques with fluoroscopy and CT for spinal pain management. *Radiographics*, 21(4), pp. 927-39; discussion 940-2.
- Sipola, P., Leinonen, V., Niemelainen, R., Aalto, T., Vanninen, R., Manninen, H., Airaksinen, O. and Battie, M. C. (2011) Visual and quantitative assessment of lateral lumbar spinal canal stenosis with magnetic resonance imaging. *Acta Radiol*, 52(9), pp. 1024-31.
- Sirvanci, M., Bhatia, M., Ganiyusufoglu, K. A., Duran, C., Tezer, M., Ozturk, C., Aydogan, M. and Hamzaoglu, A. (2008) Degenerative lumbar spinal stenosis: correlation with Oswestry Disability Index and MR imaging. *Eur Spine J*, 17(5), pp. 679-85.
- Sohn, W. (2002) Schmerz ist das, was der Patient als Schmerz erlebt. *MMW-Fortschr. Med. Sonderheft 2*, pp. 5-10.
- Theodoridis, T. (2007) Injektionstherapie an der Wirbelsäule ohne Bildsteuerung. *Orthopäde*, 36(1), pp. 73-85.
- Theodoridis, T. and Krämer, J. (2017a) *Injektionstherapie an der Wirbelsäule*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Theodoridis, T. and Krämer, J. (2017b) *Injektionstherapie an der Wirbelsäule: Manual und Atlas*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

- Theodoridis, T., Mamarvar, R., Krämer, J., Wiese, M. and Teske, W. (2009) Einstichwinkel bei der epiduralen-perineuralen Injektion an der Lendenwirbelsäule. (Angle of needle position for the epidural-perineural injection at the lumbar spine). *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 147(1), pp. 65-68.
- Trepel, M. (2017) *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*, 7th ed., München: Urban&Fischer / Elsevier.
- Trief, P. M., Ploutz-Snyder, R. and Fredrickson, B. E. (2006) Emotional health predicts pain and function after fusion: a prospective multicenter study. *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(7), pp. 823-30.
- Ullrich, C. G., Binet, E. F., Sanecki, M. G. and Kieffer, S. A. (1980) Quantitative assessment of the lumbar spinal canal by computed tomography. *Radiology*, 134(1), pp. 137-43.
- Verbiest, H. (1975) Pathomorphologic aspects of developmental lumbar stenosis. *Orthop Clin North Am*, 6(1), pp. 177-96.
- Verbiest, H. (1979) The significance and principles of computerized axial tomography in idiopathic developmental stenosis of the bony lumbar vertebral canal. *Spine (Phila Pa 1976)*, 4(4), pp. 369-78.
- Vogl, T. J., Reith, W. and Rummeny, E. J. (2011) *Diagnostische und Interventionelle Radiologie*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Vogt, M. T., Cawthon, P. M., Kang, J. D., Donaldson, W. F., Cauley, J. A. and Nevitt, M. C. (2006) Prevalence of symptoms of cervical and lumbar stenosis among participants in the Osteoporotic Fractures in Men Study. *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(13), pp. 1445-51.
- Wasmus, A., Kindel, P., Mattussek, S. and Raspe, H. H. (1989) Activity and severity of rheumatoid arthritis in Hannover/FRG and in one regional referral center. *Scand J Rheumatol Suppl*, 79, pp. 33-44.
- Weishaupt, D., Zanetti, M., Boos, N. and Hodler, J. (1999) MR imaging and CT in osteoarthritis of the lumbar facet joints. *Skeletal Radiol*, 28(4), pp. 215-9.
- Winklhofer, S., Held, U., Burgstaller, J. M., Finkenstaedt, T., Bolog, N., Ulrich, N., Steurer, J., Andreisek, G. and Del Grande, F. (2017) Degenerative lumbar spinal canal stenosis: intra- and inter-reader agreement for magnetic resonance imaging parameters. *Eur Spine J*, 26(2), pp. 353-361.
- Wittenberg, R. H., Willburger, R. E. and Krämer, J. (1998) Spondylolyse und Spondylolisthese. *Der Orthopäde*, 27(1), pp. 51-63.
- Zink, A., Minden, K. and List, S. M. (2010) Entzündlich-rheumatische Erkrankungen. in Koch-Institut, R., (ed.), Berlin.

7. Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung für Orthopädie unter Betreuung von Priv.-Doz. Dr. med Falk Mittag und Priv.-Doz. Dr. med Ulf Krister Hofmann durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte unter Mitarbeit von Priv.-Doz. Dr. med. Ulf Krister Hofmann, Oberarzt in der Orthopädie des Universitätsklinikums Tübingen.

Sämtliche Versuche bzw. Auswertungen wurden nach Einarbeitung durch Priv.-Doz. Dr. med. Ulf Krister Hofmann von mir eigenständig durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte nach Beratung durch die Statistikerin Frau Aline Naumann des Institutes für klinische Epidemiologie und angewandte Biometrie durch Priv.-Doz. Dr. med. Ulf Krister Hofmann und mir.

Ich versichere, die vorgelegte Dissertation selbstständig verfasst zu haben und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Tübingen, den

8. Veröffentlichungen

Hofmann, U. K., Keller R.L., Walter C., Mittag F.: "Predictability of the effects of facet joint infiltration in the degenerate lumbar spine when assessing MRI scans", Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 12/2017

Hofmann, U.K., Keller R.L., Berstorff M., Walter C., Mittag F.: "Predictability of the Effects of Epidural Injection in Lumbar Spinal Stenosis by Assessment of Lumbar MRI Scans", Journal of Back Musculoskeletal Rehabil, 11/2019

Hofmann, U.K., Keller R.L., Gesicki M., Walter C., Mittag F.: "Interobserver Reliability When Classifying MR Imaging of the Lumbar Spine: Written Instructions Alone Do Not Suffice", Magnetic Resonance in Medical Sciences, 09/2019

Danksagung

Ich möchte mich bei all denen bedanken, die mich bei meiner Dissertation unterstützt haben und ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Ich bedanke mich bei Priv.-Doz. Dr. med. Falk Mittag für die Unterstützung, inhaltliche Betreuung und Korrektur der Dissertation.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Priv.-Doz. Dr. med. Ulf Hofmann für die Überlassung des Dissertationsthemas, für die Unterstützung, Mühe und die stete Erreichbarkeit.

Ebenso möchte ich mich bei Frau Aline Naumann bedanken für die hilfreiche Beratung bei der statistischen Auswertung der Studie.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Freund für die wertvollen Anregungen und aufmunternden Worte. Ohne seine Kritik, Motivation und Unterstützung hätte ich die Arbeit nicht beenden können. Ebenso möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich immer und auf jede erdenkliche Weise unterstützt und begleitet haben. Insbesondere möchte ich meiner Schwester Veronika für die Korrektur der Dissertation bedanken.