

Aus dem Institut für Anatomie I
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. pol. S. Caspers

Fasersysteme der Metakarpophalangealregion

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Cynthia Carolina Pinto Perez

2021

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Timm J. Filler

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Meinen lieben Eltern und Geschwistern gewidmet.

Kurzfassung

Einleitung: Die Metakarpophalangealregion (MCP-Region) befindet sich am Übergang zwischen Handfläche und Fingern und beinhaltet Muskeln, Sehnen und Gefäß-Nerven-Straßen, die zu den Fingern ziehen und für deren Bewegung und Versorgung zuständig sind. Hier befindet sich ein komplexer Bandapparat der bei der Stabilisierung der Mittelhandplatte, dem Auffangen, der Aufteilung und Brechung von Kräften bei Überstreckung der Finger und beim Greifen von Gegenständen eine Rolle spielt [10, 18, 40, 48, 59, 69]. Die makroskopische Anatomie und die einzelnen Funktionen der Sehnen, Bänder und Muskeln in dieser Region gelten als bekannt, doch gibt es keine Studien zu dem Verhalten der Fasersysteme in diesen Strukturen. Es ist bekannt, dass Fasersysteme einerseits die Antwort auf Belastungen sind und andererseits die biomechanischen Eigenschaften einer Region steuern. Ziel dieser Arbeit ist es die Kartierung von elastischen und kollagenen Fasersystemen und deren Einordnung in der funktionellen Bedeutung der MCP-Region.

Material und Methode: In dieser Arbeit wurden 240 Proben von 12 Körperspenden (Durchschnittsalter: 84 Jahre) mit einer *Elastika van Gieson* Färbung angefärbt und mikroskopisch ausgewertet. Bezogen auf das *Ligamentum metacarpale transversum profundum* (LMTP) wurde die MCP-Region 2. – 5. von 12 Händepaaren in 2 Ebenen analysiert (Ebene A: proximaler Beginn des LMTP und Ebene B: 5 mm distal davon). Es wurden in insgesamt 12 Strukturen der Verlauf, die Beschaffenheit und der Zustand der kollagenen Fasern, sowie der Verlauf der elastischen Fasern analysiert. Es erfolgte die statistische Auswertung sowie die grafische Darstellung der Ergebnisse und somit die Bestimmung von den am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für jede Struktur und deren Bindegewebeeinheiten.

Auswertung: Es konnte ein Gesamtbild zur Morphologie der Fasern in der MCP-Region erstellt werden. Die verschiedenen Strukturen in dieser Region bilden ein Gerüst das für das Auffangen, die Brechung und die Verteilung der bei Überstreckung der Finger entstehenden Kräften dient [11, 18]. Mit den erzielten Ergebnissen dieser Dissertation, kann diskutiert werden, dass das elastische und kollagene Fasersystem der MCP-Region eine wichtige Rolle in der Wahrnehmung und Weiterleitung von propriozeptiven Veränderungen entlang der Ligamente spielen kann [11, 18]. So bestätigen die in dieser Dissertation beobachtete Fasersysteme in den *Musculi lumbricales* deren bekannte propriozeptive und sensorische Eigenschaften [11, 85]. Dieses System dient der Erzeugung einer optimalen Antwort für den Schutz der Gelenke bei Extrempositionen in der Bewegung der Finger [11, 18]. Vor diesem Hintergrund sind die Strukturanteile des Fasersystems dieser Region bei medizinischen Eingriffen in Bezug zu ihrer jeweiligen Funktion zu berücksichtigen.

Abstract

Introduction: The Metacarpophalangeal region (MCP region) is located between the palmar area and the fingers of the hand. It includes muscles, tendons and neurovascular roads that lead into the fingers and are responsible for their movements and supply. Here we can find a complex ligamentous apparatus that plays a role in the stabilization of the metacarpal plate, the collection and distribution of forces generated during the hyperextension of the fingers and the determination of the grip strength [10, 18, 40, 48, 59, 69]. The macroscopic anatomy and individual functions of the tendons, ligaments and muscles in the MCP region are known so far, but there are no studies describing the appearance and behavior of the fiber systems in this region. Aim of this study is to create a mapping of the elastic and collagenous fiber systems and deduce their influence in the functional importance of the MCP region.

Methods: In this study 240 samples from 12 body donators (average age: 84 years) were stained with an *Elastica van Gieson* Method and evaluated microscopically. The *ligamentum metacarpale transversum profundum (LMTP)* was defined as the reference structure in this area. The MCP region 2-5 of 12 pairs of hands were analyzed in 2 levels (level A: proximal beginning of the *LMTP* and level B: 5 mm distal to it). The course, arrangement (lose or dense) and structure (wavy or stretched) of the collagen fibers and the course of the elastic fibers were analyzed in 12 structures. The most frequent behavior of the collagen and elastic fibers in the different structures and connective tissue units of the MCP region were defined by statistics and graphics. The results were presented in an overall picture of the MCP region.

Results and Conclusion: With the generated results of this work, it can be discussed, that the different ligaments and muscles in the MCP region form a framework and build a system for the collection and distribution of the forces generated during the hyperextension of the fingers [11, 18]. As well it can be discussed, that this system plays an important role in the perception and distribution of proprioceptive changes along the fibers of the ligaments in this region [11, 18]. The behavior of the fibers observed in the connective tissue units of the lumbricales muscles, confirm the known proprioceptive and sensory properties of these muscles[11, 85]. This framework is designed to produce an optimal response to guarantee the protection of the joints during unphysiological movements of the fingers[11, 18]. The fibers patterns and their influence in the functional pattern of the MCP region should be taken into consideration in further medical interventions.

Abkürzungsverzeichnis

Abb. Abbildung

abd. abductor

bzw. beziehungsweise

dest. destillata

d.h. das heißt

DIP Distales Interphalangealgelenk

EvG-Färbung Elastica van Gieson Färbung

g Gramm

HE-Färbung Hämatoxylin-Eosin-Färbung

ID Interdigital

IDR Interdigital rechts

IDL Interdigital links

Lig. Ligamentum

Ligg. Ligamenta

LMTP Ligamentum metacarpale transversum profundum

MCP Metakarpophalangeal

ml Milliliter

M. Musculus

M. FDS Musculus flexor digitorum superficialis

M. FDP Musculus flexor digitorum profundum

Mm. Musculi

PIP Proximales Interphalangealgelenk

rad. radial

s.o. siehe oben

s.u. siehe unten

u. und

uln. ulnar

z.B. zum Beispiel

Inhaltsverzeichnis

Abkuerzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Bandapparat der Metakarpophalangealregion 2.-5.	2
1.1.1 Ligamente	4
1.1.2 Die Palmaraponeurose, Aponeurosis palmaris	5
1.1.3 Ligamentum metacarpale transversum profundum, Interglenoid li- gament	6
1.1.4 Palmare Platten, Ligamenta palmaria	7
1.1.5 Kollateralbandkomplex	8
1.1.6 Legueu und Juvara Septen	9
1.2 Muskeln und Sehnenscheiden der Metakarpophalangealregion 2.-5.	10
1.2.1 Bindegewebe im Muskel	10
1.2.2 Musculi lumbricales und Musculi interossei dorsales	11
1.2.3 Sehnenscheiden der langen Fingerbeuger	14
1.3 Fasersysteme im Bewegungsapparat	15
1.3.1 Elastische Fasersysteme	15
1.3.2 Kollagene Fasersysteme	16
1.4 Zielsetzung	17
2 Körperspenden, Material und Methodik	19
2.1 Chemikalien, Geräte und Materialien	19
2.1.1 Chemikalien	19
2.1.2 Geräte	20
2.1.3 Materialien	21
2.2 Körperspenden	21
2.3 Makroskopische Präparation	21
2.4 Mikroskopische Präparation	23
2.4.1 Herstellung der histologischen Feinschnitte	23
2.4.2 Histochemische Färbung nach der Elastica van Gieson Methode	24
2.4.3 Immunhistochemische Färbung für Elastin bei menschlichem Gewebe	26
2.5 Mikroskopische Auswertung	27
2.5.1 Definition der zu untersuchenden Strukturen	28
2.5.2 Definition der zu untersuchenden Kriterien	30

2.6	Immunhistochemie	33
2.7	Statistische Auswertung	34
3	Ergebnisse	36
3.1	Statistische Auswertung	38
3.1.1	Statistische Auswertung der Hände untereinander	39
3.1.2	Statistische Auswertung der Regionen untereinander	40
3.1.3	Statistische Auswertung der Strukturen untereinander	40
3.1.4	Statistische Auswertung der Bindegewebeeinheiten untereinander	40
3.1.5	Statistische Auswertung jeder einzelnen Strukturart	40
3.2	Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika	41
3.2.1	Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Regionen	41
3.2.2	Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnenscheiden	42
3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	46
4	Diskussion	58
4.1	Einordnung in die funktionelle Anatomie	58
4.1.1	Bandapparat der Metakarpophalangealregion 2. – 5.	58
4.1.2	Muskeln der Metakarpophalangealregion 2. – 5.	63
4.1.3	Fasercharakteristika in den Sehnenscheiden der langen Fingerflexoren	68
4.2	Limitierung der Studie	68
4.3	Schlussfolgerung	70
	Abbildungsverzeichnis	73
	Tabellenverzeichnis	77
	Literaturverzeichnis	78

KAPITEL 1

Einleitung

Die Metakarpophalangealregion (MCP-Region) befindet sich am Übergang zwischen Handfläche und Fingern. Hier befinden sich die Metakarpophalangealgelenke (MCP – Gelenke), zahlreiche Ligamente und Muskeln, Sehnen, Gefäße und Nerven, die zu den Fingern ziehen. Gleichzeitig ändert sich hier die Mechanik von einer Weichteilverbundenen Platte (Handfläche) zu Einzelkonstruktionen (ohne Muskeln) wobei es an dieser Stelle zu einer Kopplung der dorsalen und palmaren mechanischen Elemente über die bindegewebige Elemente kommt.

Der Bandapparat besteht aus einem dreidimensionalen Bandgeflecht, das aus längs-, schräg- und querverlaufenden Fasern aufgebaut ist und hauptsächlich das *LMTP* (*Ligamentum metacarpale transversum profundum*), die *Legueu und Juvara Septen*, die *Ligg. (ligamenta) collateralia*, die palmaren Platten und die Palmaraponeurose umfasst (siehe Abb. 1.1). Dieses Geflecht zeigt Verbindungen zu dem Periost der MCP-Knochen (Metakarpophalangealknochen), dem Kapselbandapparat der MCP-Gelenke, den Muskeln und der Haut dieser Region auf [1, 48, 69]. Es dient der Stabilisierung der Mittelhandplatte, dem Auffangen und der Aufteilung von Kräften bei Überstreckung der Finger und der Führung von Muskeln und Sehnen. Zusätzlich verhindert der Bandapparat unphysiologische Bewegungen der Gelenke, spielt in der Bestimmung der Griffestigkeit und beim Greifen von Gegenständen eine Rolle und dient als Schutz für verschiedene Strukturen in dieser Region [10, 18, 33, 40, 48, 59, 69].

In der MCP-Region sind Muskeln für die Bewegung der Fingergelenke zu finden, zwischen denen sich die *Mm. (Musculi) lumbricales*, die *Mm. interossei dorsales* sowie die Hypothenarmuskulatur und die Sehnen der langen Fingerflexoren befinden.

In dieser Doktorarbeit wird das *LMTP* als Orientierungsstruktur definiert. Die Sehnen der langen Fingerflexoren, die Gefäßnervenbündel, die *Mm. lumbricales*, die *Legueu und Juvara Septen* befinden sich palmar in Bezug zu dem *LMTP*, während sich die *Mm. interossei dorsales* und die *Ligg. collateralia* dorsal befinden [1, 5, 69]. Die palmaren Platten

breiten sich über die Sehnen der langen Fingerflexoren nach jeweils lateral und medial des *LMTP* aus (siehe Abb. 1.1)[18]. Der gemeinsame Knotenpunkt des *LMTP*, der palmaren Platte, des A1-Ringbandes, der *Ligg. collateralia* und des *Legueu und Juvara Septum* wird als *Zancolli-Komplex* beschrieben [69].

Es finden sich nur wenige Studien, welche bis dato elastische Fasersysteme im menschlichen Gewebe untersucht haben. Es liegen Studien von Fasersystemen in der Haut, den *Anulus fibrosus*, den *Ligg. interspinalia*, den Arterien und den Venen vor [3, 36, 39, 67, 73, 74, 94]. Das Verteilungsmuster und das Erscheinungsbild von kollagenen- und elastischen Fasersystemen wurden in der MCP-Region so gut wie garnicht beschrieben. Daher zielt diese Arbeit darauf ab, das Verteilungsmuster und das Erscheinungsbild elastischer- und kollagener Fasern in dieser Region zu veranschaulichen.

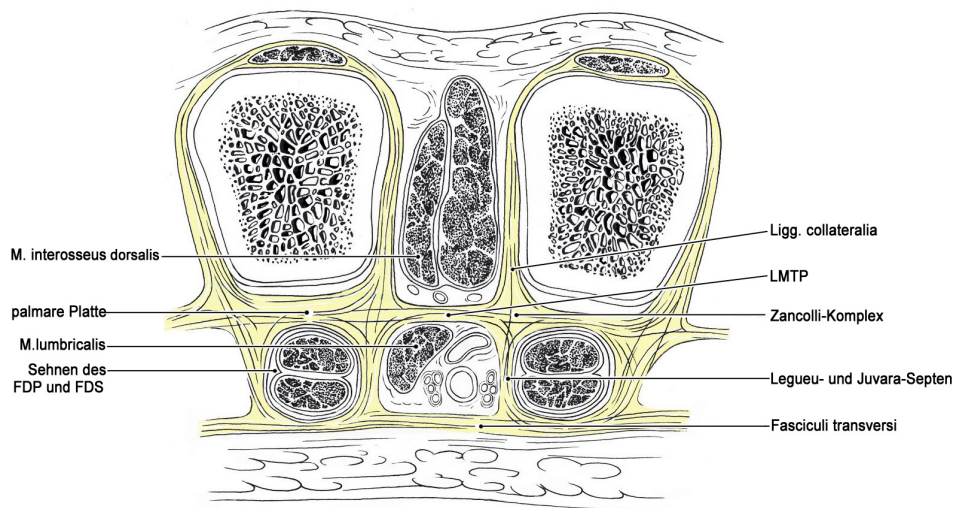


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Metakarpophalangealregion im Querschnitt auf Höhe der Metakarpalköpfe, Ansicht von proximal. *FDP*= *M. flexor digitorum profundus*, *FDS*= *M. flexor digitorum superficialis*, *LMTP*=*Lig. metacarpale transversum profundum*. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler [11].

1.1 Bandapparat der Metakarpophalangealregion 2.-5.

Gratzer et al. erläuterten 2001, dass die Streckbremse im Bereich der MCP-Gelenke nicht nur von den palmaren Platten, sondern auch von dem Zusammenwirken verschiedener Mechanismen und Strukturen dieser Region, gewährleistet wird [18].

Von der palmaren Platte aus verlaufen im Bereich der *Mm. interossei dorsales*, bilateral nach proximal, sehnige Septen, die die palmare Platte im palmaren karpalen Bandapparat fixieren. Diese Septen werden von *Gratzer et al.* als *Fasciculi metacarpales longitudinales*

profundi beschrieben [18].

Die Theorie von *Gratzer et al.* besagt, dass bei Überstreckung der Finger, die Streckkräfte über die *Fasciculi longitudinales* der Palmaraponeurose und deren Fortsetzungen in die Finger, über die *Legueu und Juvara Septen*, an die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundus*, nach proximal weitergeleitet werden. Diese Kräfte werden anschließend an die Faszien der *Mm. interossei dorsales* und die Mittelhandknochen und den palmaren karpalen Bandapparat weitergegeben. Das *LMTP* fungiert hier als ein Kraftverteiler [18].

Ein ähnlicher Kraftfluss erfolgt bei Überstreckung der MCP-Gelenke eine Ebene tiefer von der Fingergrundgliedbasis. Wirken Kräfte im Sinne einer Überstreckung auf einen MCP-Gelenk, werden diese zunächst auf die palmare Platten übertragen. Im Anschluss werden die Streckkräfte bilateral über die *Ligg. phalangogleinodalia* und dem *Zancolli-Komplex* an das *LMTP* weitergeleitet, das dann in die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundus* mündet. Diese geben die Kräfte an den palmaren karpalen Bandapparat, an die Muskelfaszien der *Mm. interossei dorsales* und die Hypothenarmuskulatur weiter. Die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundus* lassen sich als gemeinsame mechanische Endstrecke zusammenfassen [18].

Dieses System dient dem Auffangen und der Verteilung der bei Überstreckung auftretenden Kräften. Es wird eine große wirksame Kraft in viele kleine Komponenten aufgeteilt und einem festen Fundament zugeführt. Mit zunehmender Streckung werden zunehmend mehr Elemente der Streckbremse zugeschaltet, bis bei Endstellung alle Elemente einen hochfesten Komplex bilden [18].

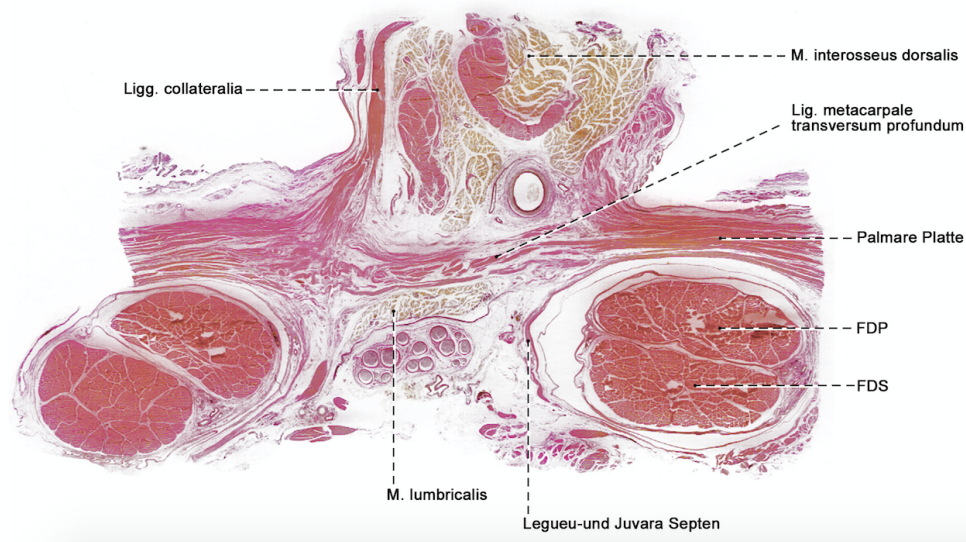


Abbildung 1.2: Mikroskopische Darstellung der Metakarpophalangealregion zwischen dem 3. und 4. Metakarpalkopf. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre. FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*.

1.1.1 Ligamente

Definitionsgemäß sind Bänder im Bewegungsapparat Strukturen, die Gelenke überspannen und mit jeder ihrer Enden an Knochen verankert sind [13]. Sie variieren an Größe, Form, Ausrichtung und Lage und bestehen überwiegend aus Kollagen und Elastin [13, 75]. Die charakteristische Anordnung dieser Fasern und der hohe Wassergehalt (70%) gewährleisten die erforderliche Lubrikation dieser Strukturen [75]. Ligamente haben eine faserige Struktur, die hierarchisch in Gruppen von parallel angeordneten Faserbündeln organisiert ist. Die dicht gepackten Kollagenfasern sind undulierend oder spiralförmig entlang der Faserachse gelagert und durch kurze quer verlaufende Fibrillen miteinander verbunden [75]. *Henninger et al.* postulieren, dass obwohl Elastin nur 4% des Trockengewichts des Gewebes ausmacht, es einen überproportional hohen Grad an mechanischer Integrität bei multiaxialer Verformung bereitstellt [23]. Auf mikroskopischer Ebene sind in den Ligamenten auch Fibroblasten zu finden, die über zytoplasmatische Ausläufer miteinander verbunden und für die Matrixsynthese verantwortlich sind [4, 13, 43].

Die Hauptfunktion der Bänder ist die Gelenkstabilisierung. Sie können sich an unterschiedliche Belastungen und Bewegungsausmaße eines Gelenks anpassen und sind gleichzeitig der Anatomie des Gelenks optimal angepasst [75]. Ihre Anpassungsfähigkeit wird je nach Belastungsausmaß und Erholungszeit durch Ab- oder Zunahme ihrer Größe und Kollagengehalt gewährleistet [75, 77, 82–84, 90, 91, 95].

Zusätzlich sind den Bändern auch wichtige sensorische Funktionen zugeschrieben. Es wurde nachgewiesen, dass Bänder an Extremitätsgelenken mit Mechanorezeptoren ausgestattet sind. Diese Eigenschaft kann auf einen Beitrag dieser Strukturen an der Propriozeption und der Kinästhesie hinweisen und somit auf eine Beteiligung der Bänder bei der Reflexaktivierung oder -inhibierung von muskulären Aktivitäten hindeuten [8, 14, 20, 22, 27, 57, 58, 60, 71, 75, 76, 92, 93, 96].

1.1.2 Die Palmaraponeurose, Aponeurosis palmaris

Die Palmaraponeurose ist eine bindegewebige Struktur die aus längs-, schräg- und querverlaufenden Fasern besteht [69]. Diese dreieckförmige Faserplatte spannt sich in der Handinnenfläche zwischen Thenar- und Hypothenarfaszie aus (siehe Abb. 1.3) [12, 48]. Ihr spitzes proximales Ende ist mit dem distalen Rand des *Retinaculum flexorum* verwachsen [69]. Hier strahlen oberflächige Fasern der Sehne des *M. palmaris longus* in die Aponeurose ein [69]. Nach distal teilt sich diese Platte in 4 prä tendinalen Stränge (*Fasciculi longitudinales*) auf, die sich im Bereich der distalen Hohlhandfaltefurche über tiefer liegende *Fasciculi transversi* miteinander verbinden (siehe Abb. 1.3) [48]. Distal der proximalen Hohlhandbeugefalte setzt die *Aponeurosis palmaris* mittels sagittal und vertikal verlaufenden Septen nach *Legueu und Juvara* an dem Periost der MCP-Knochen und dem *LMTP* an und wird somit mit der tiefen Hohlhand verbunden [48, 69]. Zusätzlich zeigt diese bindegewebige Platte Verbindungen zu der Haut, den Sehnen der langen Fingerflexoren und den Grundgelenkscapseln der MCP-Gelenke [48, 69].

Ihr spezieller dreidimensionaler Aufbau gewährleistet der palmaren Haut eine gute Resistenz gegen Scherkräften und Avulsionen. Sie garantiert die Sicherung des Gleitens der unterschiedlichen Gewebeschichten dieser Region, wirkt abflachenden Kräften entgegen, unterstützt die Wölbung der Hand und dient somit der Sicherung der Hand beim Greifen von Gegenständen [48, 59, 69].

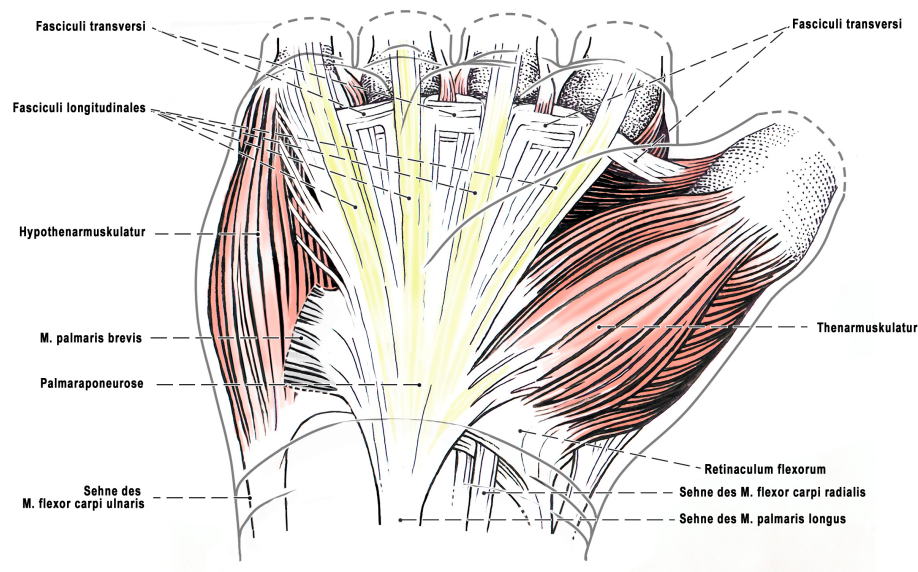


Abbildung 1.3: Darstellung der Palmaraponeurose mit deren *Fasciculi longitudinales* und *transversi*. Ansicht von palmar. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler [11].

1.1.3 Ligamentum metacarpale transversum profundum, Interglenoid ligament

Das *Ligamentum metacarpale transversum profundum* (LMTP) spannt sich in radioulnarer Richtung palmar aus und verbindet mit seinen drei interdigitalen Abschnitten die Köpfe der 2. – 5. Mittelhandknochen sowie die *Ligg. palmaria* der MCP-Gelenke des 2. – 5. Fingers untereinander (siehe Abb. 1.4) [1, 40, 69]. Das Ligament verfügt an der radialen Seite des 2. Fingers, an der ulnaren Seite des 5. Fingers und nach dorsal über Faserverbindungen zu den *Ligg. collateralia* der MCP-Gelenken der 2.-5. Fingern [1]. Nach palmar gehen vom LMTP die *Legueu und Juvara Septen* ab, die das LMTP mit den *Fasciculi transversi* der Palmaraponeurose verbinden [5, 69]. An der Palmarseite inserieren die A1-Ringbänder in das Ligament ein und bilden somit Verknüpfungen zu der Palmaraponeurose. Proximal strahlt das LMTP in die Faszien der *Mm. interossei dorsales* ein. *Al-Qattan et al.* beschrieben 1993 Insertionen des *M. abductor digiti minimi*, des *M. flexor digiti minimi brevis* und des *M. opponens digiti minimi* in das LMTP, weswegen diesen Muskeln eine Rolle bei der Mobilisierung des queren Mittelhandbogens zugeschrieben werden kann [1]. Die langen Fingerflexoren, die Gefäßnervbündel und die *Mm. lumbricales* befinden sich palmar in Bezug zu dem LMTP, während sich die *Mm. interossei dorsales* dorsal befinden [1].

Das Band limitiert ein Auseinanderweichen der Metakarpalia sowie der carpo-metacarpo-

phalangealen Beweglichkeit, sodass die Mittelhandplatte wirksam stabilisiert wird [10]. Weiterhin spielt das Ligament für die Stabilisierung des queren Mittelhandbogens und für die Griffestigkeit eine Rolle [40]. *Al-Qattan et al.* beschrieben 1993, dass der zweite und der dritte MCP-Knochen relativ gut durch das Ligament fixiert sind und die Bewegung des queren Mittelhandbogens hauptsächlich von den medial gelegenen Mittelhandknochen getragen wird [1, 17]. Zusätzlich schrieben *Gratzner et al.* dem *LMTP* die Funktion eines Kraftverteilers, während Überstreckung der Finger, zu [18]. Bei Verletzungen des *LMTP* werden Symptome wie Minderung der Griffestigkeit, Schmerzen an der betroffenen Hand und ein Abweichen des betroffenen Fingers bei der Flexion der Finger beobachtet. [40].

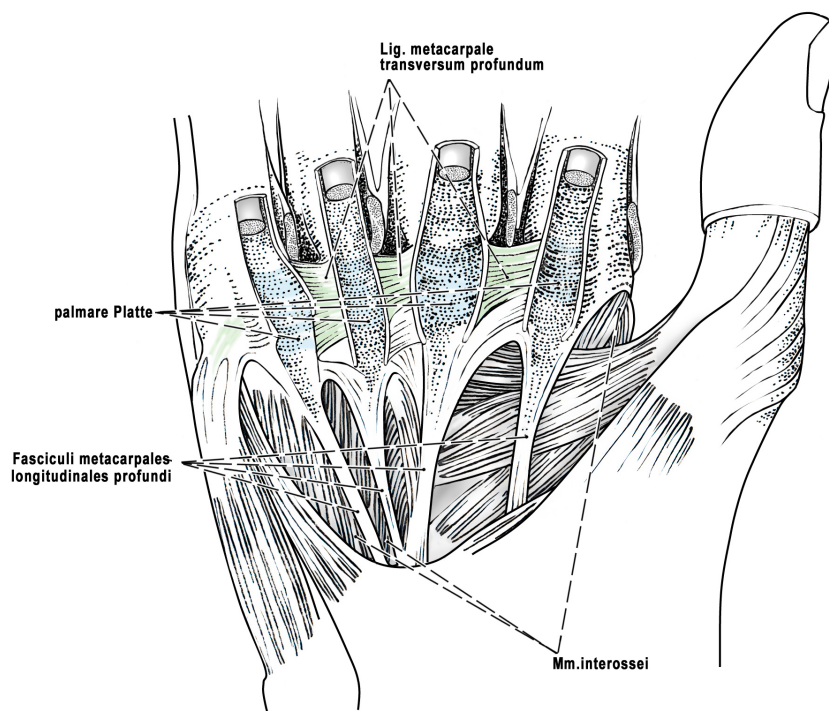


Abbildung 1.4: Darstellung des *Lig. metacarpale transversum profundum*, der *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* sowie der palmaren Platten. Ansicht von palmar. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler [11].

1.1.4 Palmare Platten, Ligamenta palmaria

Die *Ligg. palmaria* bestehen aus zwei Anteilen: einen distalen faserknorpeligen Anteil, der solide an den Grundphalangen befestigt ist und einen proximalen bindegewebigen Anteil,

der weniger massiv an den Köpfen der MCP-Knochen befestigt ist [48, 78]. Lateral ist der fibröse Anteil mit den *Ligg. collateralia accessoria*, dem A1-Ringbändern und dem *LMTP* verbunden [35, 41, 69, 89]. Die palmaren Platten bilden palmar ein Lager für die gleitenden Sehnen der langen Fingerbeuger und beteiligen sich an der Bildung der fibrösen Anteile der Sehnenscheiden dieser Muskeln [78].

Sie sind nicht längenkonstant und variieren ihre Länge in Anpassung an die Flexion und Extension der MCP-Gelenke. Bei maximaler Beugung bewirkt das Zusammenrücken der Fasern der palmaren Platten ein analoges Zusammenrücken der A1-Ringbändern, wodurch die Führung der Sehnen der langen Fingerbeuger begünstigt und ein Zerreißen der A1-Ringbändern verhindert wird [18]. In Extension verschaffen die *Ligg. palmaria* günstigere Hebelverhältnisse für die erste Phase der Flexion (sie erweitern den Abstand der Sehnen der langen Fingerbeuger zu der Beugeachse) [78]. Die palmaren Platten verstärken die palmare Kapsel der MCP-Gelenke und verhindern somit, in Zusammenarbeit mit den *Ligg. collateralia accessoria*, eine übermäßige Hyperextension dieser Gelenke [78]. Zusätzlich wirken sie der lateralen Verlagerung und der Torsion der MCP-Gelenke entgegen. Sie agieren wie ein Meniskus zwischen den *Ossa metacarpalia* und den Grundphalangen und sind eine Art „Labrum gleinoidale“ die dem Metakarpalköpfen eine erweiterte Unterstützungsfläche liefern [6, 7, 41, 87]. Zusätzlich wirken die palmaren Platten als Schutz gegen mechanische Schäden zwischen Gelenkknorpel/Knochen und den Sehnen der langen Fingerflexoren [18].

1.1.5 Kollateralbandkomplex

Die stabilisierenden Strukturen der ulnaren und radialen Seiten der MCP-Gelenke werden als sog. Kollateralbandkomplex zusammengefasst. Dieser beinhaltet das Kollateralband, den lateralen Anteil der palmaren Platte und den lateralen Anteil der dorsalen Gelenkkapsel (siehe Abb. 1.5) [78]. *Landsmeer et al.* gliedert den Kollateralbandkomplex in einen metakarpophalangealen- und einen metakarpogleinoidalen Anteil ein [38, 69].

Das eigentliche *Lig. collaterale* ist nahe dem Metakarpalkopf am *Os metacarpale* befestigt und verläuft schräg nach palmar an die Basis des zugehörigen Grundphalanxs. Nach palmar schließt sich das *Lig. collaterale accessorium* dem *Lig. collaterale* an. Es entspringt proximal von der Befestigung des *Lig. collaterale* und zieht fächerförmig in den seitlichen Rand der palmaren Platte ein [69]. Am weitesten oberflächlich gelegen befindet sich das *Lig. phalangogleinoidale* [21, 69].

Das *Lig. collaterale* ist bei Extension entspannt, während das *Lig. collaterale accessorium* und das *Lig. phalangogleinoidale* angespannt sind und somit die Extension begrenzen. Zusätzlich wirkt das *Lig. phalangoglenoidale* und das *Lig. collaterale accessorium* pal-

margenrichteten Zugkräften, die bei der Flexion zustande kommen, entgegen. Durch den angespannten Zustand des *Lig. collaterale accesorium* bei extendiertem und flektiertem Finger wird die Fixierung der palmaren Platte und des an ihr befestigten A1-Ligaments gewährleistet. Der steilere Verlaufswinkel erlaubt die seitliche Beweglichkeit des extendierten Fingers und verhindert die seitliche Abweichung der Sehnen der langen Fingerbeuger in diesem Zustand. Die *Ligg. phalangogleinoidea* sind für die Umlenkung der Sehnen der langen Fingerbeuger auf Höhe der Grundgelenke zuständig und gewährleisten ein flächendeckendes Gleiten beider Gelenkkörper, die das MCP-Gelenk bilden [78].

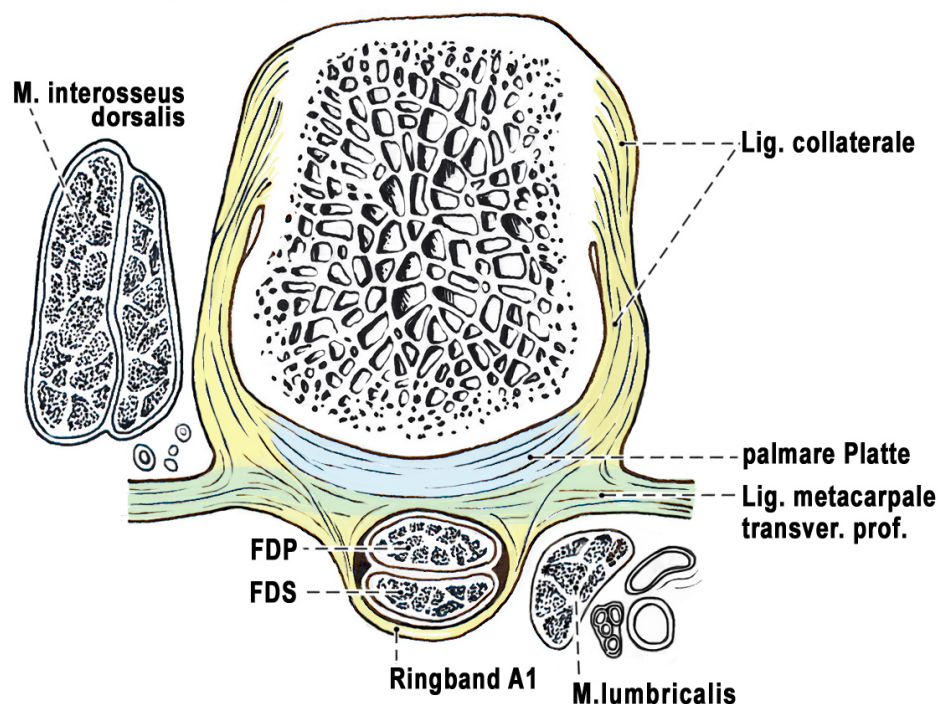


Abbildung 1.5: Querschnitt auf Höhe eines Metakarpalkopfes mit Darstellung der umliegenden Muskulatur sowie des Kapselbandapparates. *FDP*=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, *FDS*=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis* [11]. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

1.1.6 Legueu und Juvara Septen

Die *Legueu und Juvara Septen* wurden zum ersten Mal 1892 von den französischen Anatomen Legueu und Juvara beschrieben und nach diesen benannt [5]. Es sind acht Septen (für jeden Finger ein radiales und ein ulnares) bekannt, die 7 Zwischenräume begrenzen. Diese Kompartimente enthalten abwechselnd die Sehnen der langen Fingerbeuger (4 Zwischenräume) und die Gefäß-Nerven-Straßen der Finger mit den *Mm. lumbricales* (3

Zwischenräume) [5, 48].

Die radialen Septen scheinen als Trennwände zwischen den Sehnen der langen Fingerbeuger und den *Mm. lumbricales* zu fungieren. Die ulnaren Septen trennen dagegen die Gefäß-Nerven-Straßen von den Sehnen der langen Fingerflexoren [5]. *Bilderback et al.* schrieben 2004 jedem Septum eine proximale und eine distale Komponente zu. Das distale Ende des Septums war dicker als das proximale Ende und bestand aus organisiertem Bindegewebe. Es scheint so zu sein, dass der proximale Teil des Septums als eine Trennwand zwischen den Sehnen der langen Fingerflexoren und den *Mm. lumbricales* fungiert, während das distale Ende eher eine schützende Funktion gegenüber den digitalen Nerven und den digitalen Gefäßen aufweist [5].

1.2 Muskeln und Sehnenscheiden der Metakarpophalangealregion 2.–5.

1.2.1 Bindegewebe im Muskel

Das Muskelbindegewebe wird in drei Regionen eingeteilt: das Endomysium (umhüllt die einzelnen Muskelfasern), das Perimysium (umhüllt eine Gruppe von Muskelfasern) und das Epimysium (umhüllt den gesamten Muskel). Diese bilden zusammen eine Einheit [47, 68]. Das Bindegewebe im Muskel stellt ein dreidimensionales verbundenes Netzwerk aus fibrösen longitudinalen und spiralförmigen Schläuchen dar. Diese sind aus dem Endomysium heraus bis hin zum Epimysium miteinander verbunden und spielen bei den mechanischen Eigenschaften des Muskels eine große Rolle [47, 61, 66, 68, 79]. Die Kollagenfaserbündel im Perimysium und Endomysium bilden eine helikale gekreuzte Anordnung, die longitudinalen und zirkumferentielle Spannungen während Veränderungen der Muskelform balancieren und koordinieren [68]. Das Elastin ist ein wichtiger Bestandteil der extrazellulären Matrix im Muskel, es gewährleistet die Geweberesilienz, die Ausdehnung und die Anpassungsfähigkeit des Muskels und wirkt der verursachten Steifigkeit der kollagenen Fasern entgegen [47, 81]. Es ist bekannt, dass bei der Kontraktion eines Muskels, die generierte Kontraktionskraft nicht nur über die Sehnen an die Sehnenansätze und den Knochen weitergeleitet wird, sondern auch lateral über das Endomysium, das Perimysium und das Epimysium in die Nachbarstrukturen [24, 34, 47, 61].

Das Endomysium besteht aus einem zartem Bindegewebe, das aus einem dreidimensionalen Netzwerk aus gewellten Kollagenfasern besteht, das hauptsächlich Kollagen Typ III und IV beinhaltet [19, 24, 51, 68, 80]. Es ist mit den Myofibrillen der Muskelfasern verbunden und breitet sich längs und quer über den gesamten Muskel aus [19, 24, 68, 80]. Es gewährleistet die bessere Verformung der Muskelfasern bei Kontraktion und Relaxation und spielt in der Weiterleitung der Kontraktionskräfte in die Nachbarstrukturen eine

große Rolle [62, 64, 68].

Das Perimysium ist ein komplexes Gewebe, das aus lockerem Bindegewebe besteht und hauptsächlich Kollagen Typ I, III, IV, V, VI, XII und XIV, Proteoglykane und auch elastische Fasern enthält [37, 56, 80]. Die Kollagenfasern variieren stark in Dicke, Länge, Ausrichtung und Befestigung [16, 54, 68]. Das Perimysium weist zusätzlich direkte Verbindung zu den Muskelfasermembranen, deren Endomysium und dem Epimysium auf [26, 68, 86]. Das Perimysium umhüllt mehrere Muskelfasern, die in sogenannten primär (enthalten eine Gruppe an Muskelfasern mit deren Endomysium) und sekundär Faszikeln (enthalten Gruppen von primären Faszikeln) verlaufen und zeigt hier einen zwei- oder mehrschichtigen Aufbau auf. Diese Faszikel bestehen hauptsächlich aus langen abgeflachten und gewellten Kollagenfasern Typ I, die eine gekreuzte helikale Anordnung aufweisen und Verbindungen zu den Muskelfasermembranen zeigen [55, 68]. Das Perimysium erleichtert die Veränderung der Muskelform, spielt bei der Weiterleitung von Kontraktionskräften eine Rolle, gewährleistet die Befestigung von Muskelfasern, die nicht entlang der gesamten Muskellänge verlaufen und erleichtert das Gleiten des Muskelgewebes bei Formänderungen [68, 80].

Das Epimysium ist ein noch dickeres myofasiales Gewebe, das den gesamten Muskel bedeckt und in das Perimysium, die Sehnen und andere Faszienstrukturen übergeht [68, 80]. Es besteht aus einem lockeren Bindegewebe, das hauptsächlich Kollagen Typ I enthält [44, 68, 80]. Die Fasern sind hier auch gewellt, haben einen noch größeren Durchmesser als die des Perimysiums und weisen auch eine helikale gekreuzte Anordnung auf [16, 63, 68, 80]. Das Epimysium ist für die Übertragung von Zugkräften, die Eindämmung des Muskels während der Kontraktion und eine Verschiebung der Muskeloberfläche gegenüber benachbarten Strukturen bei Formänderungen zuständig [25, 46, 55, 68, 80]. In pennaten Muskeln kann das Epimysium die Funktion einer Sehne annehmen und für den Ansatz der Muskelfasern dienen [80].

1.2.2 Musculi lumbricales und Musculi interossei dorsales

Die *Mm. lumbricales* werden als Abspaltungen des *M. FDP* (*Musculus flexor digitorum profundus*) beschrieben, weswegen diese, wie auch der *M. FDP*, eine doppelte Innervation aufweisen (siehe Tabelle 1.1) [69, 85]. Die *Mm. lumbricales* werden zu den stärksten variierenden Muskeln des menschlichen Körpers gezählt. Die Variationshäufigkeit nimmt von dem *Mm. lumbricale I* bis hin zu dem *M. lumbricale IV* zu. Der *M. lumbricale II* ist am wenigstens variierend, während der *M. lumbricale III* am häufigsten variiert [69]. Sie verlaufen palmar des *LMTP* in bindegewebigen begrenzten Kanälen und haben deren Ursprung an den Sehnen der langen Fingerbeuger (siehe Tabelle 1.1), die ihnen eine

bewegliche Befestigung bieten [69, 85]. Die *Mm. lumbricales I* und *II* haben eine einfach-gefiederte Form, während die *Mm. lumbricales III* und *IV* eine doppelt gefiederte Form aufweisen [69, 85].

Die vier *Mm. interossei dorsales* entspringen zweiköpfig von den jeweils zugewandten Seiten der Mittelhandknochen I – V (siehe Tabelle 1.1). Der *M. interosseus dorsalis I* befindet sich zwischen den MCP-Knochen I und II, während die übrigen *Mm. interossei dorsales* die restlichen metakarpalen Zwischenräume von dorsal abschließen und füllen [69, 78]. Sie ziehen dorsal des *LMTP* und palmar der Beugeachse zu ihren Ansätzen (siehe Tabelle 1.1) und weisen nach Gratzner *et al.* Insertionen in das *LMTP* auf [18, 78]. Diese Insertionen sprechen für die Beteiligung dieser Muskeln an der aktiven Bewegung des *LMTP* und der palmaren Platten nach proximal, um somit eine Einklemmung der palmaren Platten im MCP-Gelenkspalt während der Flexion zu verhindern [18].

Es wurde nachgewiesen, dass die *Mm. lumbricales* für die Extension der PIP (proximale Interphalangealgelenke) und DIP (distale Interphalangealgelenke) und nur in geringen Maßen für die Flexion der MCP-Gelenke zuständig sind [85]. Die *Mm. interossei dorsales* sind hauptsächlich für die Streckung der Zwischenfingerelken, bei gebeugten Grundgelenken zuständig [69]. Die *Mm. lumbricales* weisen eine viel schwächere Wirkung auf die Extension der PIP, DIP und auf die Flexion der MCP-Gelenken in Vergleich zu den *Mm. interossei dorsales* auf [42, 69, 85]. Es wird beschrieben, dass die *Mm. lumbricales* eher eine sensorische Funktion als eine motorische Funktion haben. Viele Autoren stellen die Theorie auf, dass die *Mm. lumbricales* die Kontrolle über die Spannungsverhältnisse von der Beuge- und Streckmuskulatur der Finger haben und eher eine propriozeptive Funktion für die PIPs und DIPs aufweisen [42, 69, 85]. Jacobson *et al.* kamen zur Schlussfolgerung, dass die *Mm. lumbricales* eher für schnelle und präzise Bewegungen der Finger zuständig sind [28, 42, 53, 85]. Die hohe Dichte an Muskelspindeln in den ersten zwei Lumbrikalmuskeln sprechen für eine große Rolle dieser Muskeln bei dem präzisen Pinzettengriff [85]. In der Tabelle 1.1 sind der Ansatz und Ursprung, sowie die Innervation und die Funktion der untersuchten Muskeln in dieser Arbeit dargestellt.

Tabelle 1.1: Tabellarische Zusammenfassung des Ursprungs, Ansatzes, Funktion und Innervation der Muskulatur in der MCP-Region nach *Drenckhahn* [10][11].

	Ursprung	Ansatz	Funktion	Innervation
M. flexor digitorum superficialis	Epicondylus medialis Processus coronoideus ulnae Caput radiale	Mittelphalanx II-V	Flexion der Mittel- u. Grundgelenke II-V Flexion des Handgelenkes	N. medianus
M. flexor digitorum profundum	Vorderfläche der Ulna Fascia antebrachii Membrana interossea antebrachii	Basis der Endphalanx II-V	Flexion des Handgelenkes u. der Fingergelenke II-V	II+III: N. medianus III+IV: N. ulnaris
Mm. lumbricales I-IV	Sehnen des M. flexor digitorum profundum	Dorsalaponeurose der Finger II-V	Extension der Mittel- u. Endgelenke II-V schwache Flexion der Grundgelenke II-V	I, evtl. II: N. medianus II-IV: N. ulnaris
Mm. interossei dorsales	Metakarpalknochen I-V	Dorsalaponeurose der Finger II-V Basis der Grundphalanx II-V	Flexion der Grundgelenke II-V Extension der Mittelgelenke II-V Abduktion der Finger II-IV Adduktion des Fingers III	N. ulnaris
M. abductor digiti minimi	Os pisiforme Lig. pisohamatum	Grundphalanx u. Dorsalaponeurose des Fingers V palmare Platte Sesambein	Finger V: Flexion des Grundgelenkes Extension des Mittel- u. Endgelenkes Abduktion	N. ulnaris
M. flexor digiti minimi brevis	Hamulus ossis hamati Retinaculum flexorum	palmar an Basis der Grundphalanx des Fingers V	Flexion des Grundgelenkes V	N. ulnaris

1.2.3 Sehnenscheiden der langen Fingerbeuger

Die Sehnenscheide der langen Fingerbeuger besteht aus einer ununterbrochenen synovialen Membran, die ihren Ursprung proximal am A1-Ringband hat und sich bis zu dem Ansatz des *M. FDP* (*Musculus flexor digitorum profundus*) ausbreitet. Diese besteht aus einem parietalen (äußeren) und einem viszeralem (inneren) Blatt (siehe Abb.1.6). Beide Blätter sind morphologisch sehr ähnlich; sie unterscheiden sich durch die Anzahl der Synoviadeckzellen und die Membrandicke. Diese Eigenschaften variieren entlang der Sehnen der langen Fingerflexoren [9].

Das parietale Synovium ist ein ununterbrochenes Blatt, das in Intervallen an den Ring-, den Kreuzbändern und den palmaren Platten befestigt ist. Das viszerale Synovium konstituiert das Epitendon über den Sehnen der langen Fingerflexoren und besteht aus einer dünnen lamellierten Kollagenfaserschicht. Beide Blätter stützen sich auf eine lamelläre Kollagenschicht. Auf Höhe des A1 Ringbandes sind das parietale und das viszerale Blatt nur diskret und unvollständig voneinander getrennt, während diese zwischen dem 1. und dem 2. Ringbandes eindeutig voneinander getrennt sind [9].

Auf Höhe des Ursprungs der zwei synovialen Blätter und auf Höhe des Ansatzes des *M. FDP* sind beide Blätter miteinander verbunden und bilden jeweils den proximalen und distalen *Cul-de-sac*. Das viszerale und das parietale Synovium sind kontinuierlich an den sogenannten *Cul-de-sacs*, den Ursprüngen der *Vincula* und den Ansätzen der Sehnen der langen Fingerflexoren miteinander verbunden. Unter den Ringbändern und entfernt von den *Vincula* und den *Cul-de-sacs* ist das innere Blatt dünner und das unterstützende Kollagen spärlich und lammellenförmig angeordnet. Kapillaren sind hier kaum vorhanden. Das parietale Blatt ist in der Nähe der *Vincula* und den *Cul-de-sacs* eher dicker. Es ist eine variabel gefaltete Membran, die viele Blutgefäße und locker angeordnete Kollagenfasern enthält.

Klinische und experimentelle Studien haben bestätigt, dass die Sehnenscheiden eine Rolle in der Heilung, der Biomechanik und der Physiologie von Sehnen spielen [9].

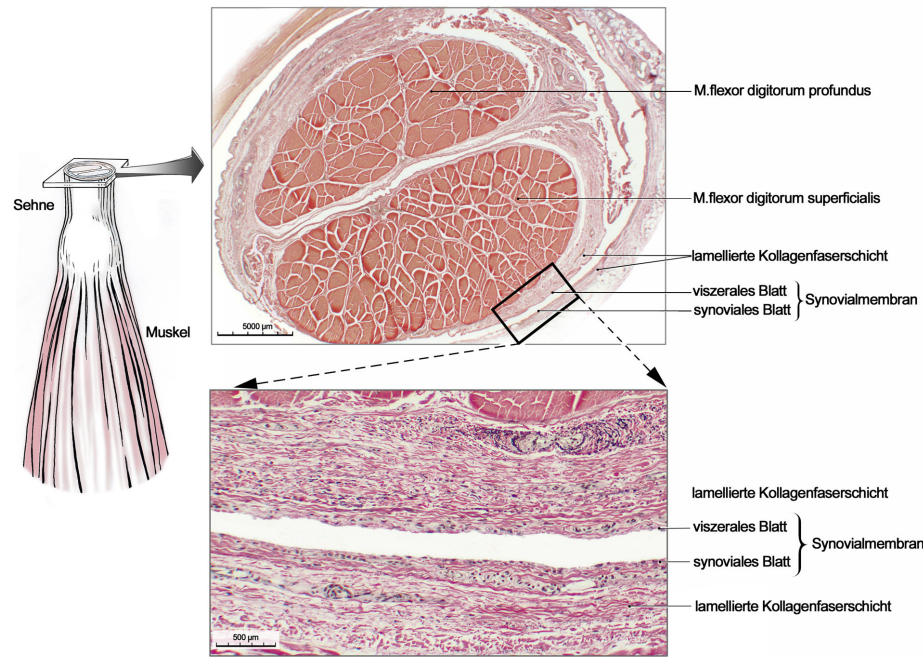


Abbildung 1.6: Dargestellt ist ein Querschnitt auf Höhe der Sehnen eines *M. flexor digitorum profundus* und *M. flexor digitorum superficialis* sowie die mikroskopische Darstellung deren Synovialmembran und lamellierten Kollagenfaserschichten. Interdigitalregion 2.-3., linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 94 Jahre. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

1.3 Fasersysteme im Bewegungsapparat

1.3.1 Elastische Fasersysteme

Elastin ist ein stark dehnbares, strukturelles Proteinnetzwerk, das der Verformung von biologischen Geweben einen nahezu elastischen Widerstand verleiht [23]. Es ist dazu fähig, sich bis zu 150% dessen Ausgangslänge zu dehnen und dabei Energie zu speichern [31]. Es besteht aus einem zentralen Elastinkern, der aus Tropoelastinmolekülen besteht, und von einem fibrillinreichen Mikrofibrillengerüst (hauptsächlich Fibrillin-1 und -2) umgeben ist [2, 23, 32, 45, 49, 73, 74]. Elastische Fasern sind in Geweben vorhanden, die die funktionelle Eigenschaft der Elastizität und des Rückstoßes erfordern [39]. Sie spielen bei der Gewebearchitektur eine große Rolle und verleihen den Geweben Elastizität und Resilienz. Sie spielen in der Wundheilung eine Rolle, zeigen strukturelle degenerative Veränderungen mit dem Alter, scheinen eine autokrine Funktion zu haben und eine wichtige Rolle in der arteriellen Morphogenese zu spielen [3, 36, 39, 65]. Fibrillinen wurde zusätzlich eine Funktion bei der Regulierung der Aktivierung und der Verfügbarkeit von TGF- β s zuge-

schrieben [39]. Es wurde angenommen, dass elastische Fasern eine entscheidende Rolle bei der Verstärkung der mechanischen Integrität der Kollagenmatrix und bei der Aufrechterhaltung des lamellaren Zusammenhalts der Kollagenfasern spielen [73, 74].

Elastische Fasern wurden in Blutgefäßen, Herzklappen, Lungen, Haut, Bandscheiben, Bändern und im elastischen Knorpel des Ohres nachgewiesen. Der Elastingehalt variiert in den verschiedenen Geweben des menschlichen Körpers, von 40% des Trockengewichts in der aufsteigenden Brustorta bis zu wenigen Prozenten in der Haut. Die räumliche Organisation von elastischen Fasern in der extrazellulären Matrix ist in den verschiedenen Geweben sehr variabel [39]. Im Gewebe des Menschen wurden elastische Fasersysteme nur selten beschrieben. Es liegen Studien von Fasersystemen in der Haut, dem *Anulus fibrosus*, den *Ligg. interspinalia*, den Arterien und den Venen, unter anderem, vor [3, 36, 39, 67, 73, 74, 94]. In Arterien und Venen sind elastische Fasern als dicke Lamellen organisiert, während sie von *Smith et al.* im *Anulus fibrosus* als ein dichtes, elastisches Fasernetzwerk beschrieben werden, das parallel zu den Kollagenfaserlamellen verläuft [39, 73, 74]. *Barros et al.* beschrieben 2002 in den *Ligg. interspinalia* parallel und in zickzack verlaufende Kollagenfaserbänder, die mit parallel verlaufenden elastischen Fasern durchsetzt waren [3, 67, 94].

1.3.2 Kollagene Fasersysteme

Kollagene machen ca. 30% aller Proteine im menschlichen Körper aus und spielen im Aufbau, in der Organisation und den Eigenschaften der Bindegewebe und anderer Geweben eine große Rolle. Der häufigste Kollagentyp im menschlichen Körper ist der Typ I. Dieser ist in der Dermis, den Faszien, den Knochen, den Ligamenten, den Sehnen, den Gefäßen und der Sclera zu finden. Zwischen den anderen wichtigen Kollagentypen befinden sich der Typ II (in Knorpel und Glaskörper zu finden), der Typ III (wie der Typ I, auch in Dermis und Gefäßen vorhanden) und der Typ IV (in der Basallamina vorhanden) [19]. Frische Kollagenfasern sind farblos und variieren in jedem Organ und Gewebe in Form und Größe [81]. Sie haben in Geweben eine band- oder kabelförmige Form mit einem welligen Verlauf, eine Länge von ca. 1-20 μm und einen Durchmesser von 1 – 100 μm [66, 81]. Kollagenfasern bestehen aus eng gepackten parallel verlaufenden Kollagenfibrillen, die mit flexiblen Proteoglykane gebündelt sind und ein dreidimensionales Netzwerk bilden [70, 81]. Diese Strukturform gewährleistet ihre mechanische Eigenschaften. Kollagenfaser sind flexibel, können aber Zugkräfte mit einer hohen Resistenz entgegenwirken. Die wellenförmige Anordnung dient als ein Polster gegen direkte Spannungen [81]. Es ist bekannt, dass parallel angeordnete elastische Fasern zu den kollagenen Fasern, diese in eine gewellte Form bringen und somit eine größere Längenveränderung des kollagenen

Fasersystems ermöglichen [23, 52]. *Smeets et al.* entwickelten die Theorie, dass das Fehlen einer scheinbaren Organisation von kollagenen und elastischen Fasern, auf ein geringes Potenzial des Gewebes hindeutet, Zugbelastungen zu widerstehen [72].

1.4 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Kartierung von elastischen- und kollagenen Fasersystemen in den Bändern und Muskeln der MCP-Region.

Dadurch, dass sich die MCP-Region am Übergang zwischen Handfläche und Fingern befindet, enthält sie wichtige Sehnen, Muskeln und Gefäß-Nerven-Straßen die zu den Fingern ziehen und für deren Bewegung und Versorgung zuständig sind. Zusätzlich befinden sich hier die MCP – Gelenke. Der Bandapparat der MCP-Region besteht aus einem dreidimensionalen Bandgeflecht, das Verbindungen zu dem Periost der MCP-Knochen, dem Kapselbandapparat der MCP-Gelenke, den Muskeln und der Haut dieser Region aufweist [1, 48, 69]. Es ist hauptsächlich für die Stabilisierung der Mittelhandplatte, die Führung von Muskeln und Sehnen, dem Auffangen und der Verteilung von Kräften bei Überstreckung der Finger, die Sicherung der Hand beim Greifen sowie für die Regulierung der Grifffestigkeit zuständig [10, 18, 40, 48, 59, 69]. In der Studie 5202 des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf wurden den Bändern und Muskeln in dieser Region eine wichtige sensorische und propriozeptive Funktion zugeschrieben, da Mechanorezeptoren um und in diesen Strukturen nachgewiesen werden konnten [11]. Es kann diskutiert werden, dass diese Region eine wichtige Rolle bei Ziel- und feinmotorischen Bewegungen der Hand spielt, um ein optimales und präzises Greifen zu ermöglichen [11, 30]. Zu dem Verteilungsmuster und das Erscheinungsbild von kollagenen- und elastischen Fasersystemen in der MCP-Region liegen, nach unserem aktuellen Wissensstand, noch keine Studien vor. Es liegen aber Studien von Fasersystemen, unter anderem in der Haut, dem *Anulus fibrosus*, den *Ligg. interspinalia* und den Arterien und den Venen vor [3, 36, 39, 67, 73, 74, 94]. In Arterien und Venen sind elastische Fasern als dicke Lamellen organisiert, während sie von *Smith et al.* im *Anulus fibrosus* als ein dichtes, elastisches Fasernetzwerk beschrieben werden, das parallel zu den Kollagenfaserlamellen verläuft [39, 73, 74]. *Barros et al.* beschrieben 2002 in den *Ligg. interspinalia* parallel und in zickzack verlaufende Kollagenfaserbänder, die mit parallel verlaufenden elastischen Fasern durchsetzt waren [3, 67, 94]. Elastische Fasern sind in Geweben vorhanden, die die funktionelle Eigenschaft der Elastizität und des Rückstoßes erfordern [39]. Sie spielen bei der Gewebearchitektur eine große Rolle und verleihen den Geweben Elastizität und Resilienz [3, 36, 39, 65]. Es wurde beschrieben, dass elastische Fasern eine entscheidende Rolle bei der Verstärkung der mechanischen Integrität der Kollagenmatrix und bei der

Aufrechterhaltung des lamellaren Zusammenhalts der Kollagenfasern spielen [73, 74]. Parallel angeordnete elastische Fasern zu den kollagenen Fasern bringen diese in eine gewellte Form und ermöglichen somit eine größere Längenveränderung des kollagenen Fasersystems [23, 52].

In dieser Doktorarbeit wurde das *Ligamentum metacarpale transversum profundum (LMTP)* als Orientierungsstruktur definiert und Nachbarstrukturen (insgesamt 12 Strukturen), die Muskeln, Sehnen und Bänder dieser Region beinhalten, zusammen mit deren Bindegewebeinheiten, lichtmikroskopisch ausgewertet. Dafür wurden 12 Händepaare in 2 Ebenen (Ebene A: proximaler Beginn des *LMTP* und Ebene B: 5 mm distal der Ebene A) analysiert. Es wurde der Verlauf, der Zustand (gewellt oder gestreckt) und die Beschaffenheit (locker oder straff) der kollagenen Fasern, sowie der Verlauf und die Beziehung der elastischen Fasern zu den kollagenen Fasern analysiert.

Die makroskopische Anatomie und einzelnen Funktionen der Sehnen, Bänder und Muskeln der MCP-Region sind bekannt, doch gibt es keine Studien zu dem Verlaufsmuster und Erscheinungsbild der Fasersysteme in diesen Strukturen. Ziel dieser Arbeit ist es, die Faserarchitektur in den verschiedenen Strukturen der MCP-Region und deren Einordnung in der funktionellen Bedeutung der MCP-Region zu definieren. Zusätzlich stellen wir die Theorie auf, dass elastische Fasern und deren Anordnung, einen Einfluss auf die propriozeptiven Eigenschaften der Ligamente und Muskeln in dieser Region aufweisen. Diese Studie soll dazu dienen, die Fasersysteme in den Strukturen der MCP-Region bei alltäglichen medizinischen Eingriffen in Bezug zu ihrer jeweiligen Funktion zu berücksichtigen und ggf. zu schonen.

KAPITEL 2

Körperspenden, Material und Methodik

Für die Studie 5202 [11] wurde die MCP-Region von 12 Händepaaren entnommen. Bei jeder MCP-Region erfolgte ein von proximal nach distal verlaufender Schnitt auf Höhe der *Ligg. palmaria*, wodurch fünf Gewebeproben für die Herstellung der Feinschnitte entstanden. Die mikroskopische Auswertung der jeweiligen Gewebeproben fand in 2 Ebenen (Ebene A: proximaler Beginn des *LMTP*, Ebene B: 5 mm distal der Ebene A) statt. Jedes Präparat wurde für die mikroskopische Auswertung in weitere Kompartimente unterteilt, die anhand der Muskeln, der Ligamente und der Sehnenscheiden definiert wurden. In der mikroskopischen Analyse untersuchte man den Verlauf, die Beschaffenheit und den Zustand der kollagenen Fasern, sowie den Verlauf der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern. Hierfür wurden die Feinschnitte mit einer *EvG-Färbung* angefärbt. Für die histologische Methodenkontrolle erfolgte die Anfärbung von drei willkürlich gewählten Feinschnitten mit einer immunhistochemischen Färbung für Elastin.

2.1 Chemikalien, Geräte und Materialien

2.1.1 Chemikalien

- 2-Propanol >99,5% (Carl Roth[®] GmbH & CoKG, Karlsruhe, Deutschland)
- AEC Peroxidase (AEC Peroxidase (HRP) Substrate Kit, 3-amino-9-ethylcarbazole SK-4200, VECTOR)
- Biotinyliertes Pferde Anti-Maus IgG (Biotinylated Horse Anti Mouse IgG Antibody BA-2000, VECTOR)
- Chlorwasserstoff (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland)

- Eisen-III-Chlorid (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland)
- Ethanol (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland)
- Hämatoxylin (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland)
- HRP Streptavidin BioLegend[®]
- Intermedium (Roth, Roticlear, Carl Roth[®] GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
- Lithiumcarbonat Lösung (Merck, Darmstadt, Deutschland)
- Paraffin (McCormick Scientific, Paraplast plus, St. Louis, Missouri, USA)
- Paraffin-Einbettssystem (Medit[®], Tes ValidTM, Burgdorf, Germany)
- Pferdeserum gelöstes Maus IgG1 (Purified Mouse IgG1, κ Isotype Ctrl, BioLegend[®])
- Pferdeserum gelöstes monoklonales Anti-Elastin-Antikörper (Elastin (BA-4): sc-58756, SANTA CRUZ BIOTECHNOLOGY, INC.)
- Pikrinsäurekristalle (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland)
- Resorcin-Fuchsin (Carl Roth[®] GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
- Säurefuchsinlösung (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland)
- VECTOR Antigen Unmasking Solution H-3300 pH 6.0
- Xylol (Carl Roth[®] GmbH & Co. KG, Karlsruhe)

2.1.2 Geräte

- Mikroskop Leitz[®] Wetzlar (Mikroskop-Objektive: 4x, 10x, 40x)
- Mikroskop ZEISS Axioplan (Mikroskop-Objektive: 2,5x, 10x, 40x), Kamera Axio-cam MRc, Software AxioVision 4.8.2
- Mikroskop Motic[®] BA410E, Kamera Moticom 10.0 MP, Software Motic[®] Images Plus 3.0 ML
- Rotationsmikrotom (Leica RM2155, Wetzlar, Germany)
- Wärmeschrank (Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach)

2.1.3 Materialien

- Objektträger (Paul Marienfeld, Lauda-Königshofen, Deutschland)
- Super Pap, Pen Liquid Blocker, Kisker

2.2 Körperspenden

Für diese Dissertation wurden 240 histologische Schnitte von 12 Körperspenden (5 weibliche, 7 männliche) der Studie 5202 [11] angefertigt und ausgewertet. Das Alter der Körperspenden liegt zwischen dem 60. und 94. Lebensjahr, mit einem Durchschnittsalter von 83 Jahren und einem Altersmedian von 85,5 Jahren. Die Körperspenden wurden vor Beginn der Studie von Studenten im Präparierkurs des Anatomischen Instituts der Heinrich-Heine-Universität präpariert. Es liegt von allen Körperspendern eine Einwilligung zur Verwendung des Körpers oder seiner Teile zu Lehr-, Ausbildungs-, Studien- und Forschungszwecken vor. Die Körperspender willigten ebenfalls ein, dass für diese Körperteile auf eine Beisetzung verzichtet wird. Ein Ethikvotum liegt ebenso vor (Studiennummer 5202 [11]). Als Ausschlusskriterien galten Voroperationen, von der Norm abweichende, relevante makroskopische Varianten, sowie sichtbare im Präparier-Kurs entstandene Verletzungen der Palmaraponeurose. Makroskopische Verletzungen des *LMTP* und den umgebenen Strukturen während der Probeentnahme galten ebenfalls als Ausschlusskriterium. Jede Körperspende wurde vor der Präparation in 4 %igem Formaldehyd fixiert. Zur histologischen Methodenkontrolle erfolgte die Fixierung einer Körperspende erst nach der Probeentnahme.

2.3 Makroskopische Präparation

Nach der Entnahme der MCP-Region erfolgte in der makroskopischen Präparation der Studie 5202 ein von proximal nach distal verlaufender Schnitt auf Höhe der *Ligg. palmaria* und damit die Einteilung jeder MCP-Region in fünf Regionen (Gewebeproben), die wie folgt definiert wurden (siehe Abb. 2.1, 2.2) [11]:

Rechte Hand:

- 2. radial rechts
- IDR 2-3 (Interdigital rechts 2-3)
- IDR 3-4 (Interdigital rechts 3-4)

- IDR 4-5 (Interdigital rechts 4-5)
- 5. ulnar rechts

Linke Hand:

- 2. radial links
- IDL 2-3 (Interdigital links 2-3)
- IDL 3-4 (Interdigital links 3-4)
- IDL 4-5 (Interdigital links 4-5)
- 5. ulnar links



Abbildung 2.1: Metakarpophalangealregion 2.-5., ursprüngliche Lage des präparierten Gewebes, Ansicht von palmar. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre [11]

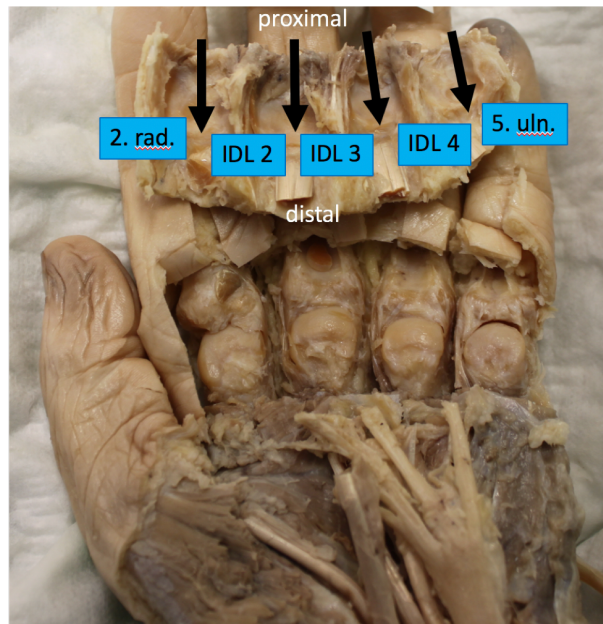


Abbildung 2.2: Metakarpophalangealregion 2.-5., Mobilisierung des präparierten Gewebes nach distal, Ansicht auf die Metakarpalköpfe. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre [11]

2.4 Mikroskopische Präparation

Von jeder Gewebeprobe wurden jeweils zwei Feinschnitte angefertigt, je ein Feinschnitt pro Ebene (Ebene A: proximaler Beginn des *LMTP*, Ebene B: 5 mm distal der Ebene A). Für die Beurteilung und die Auswertung der elastischen- und kollagenen Fasern wurden die Präparate mit einer histochemischen Färbung nach der *EvG*-Methode angefärbt.

2.4.1 Herstellung der histologischen Feinschnitte

Zur Anfertigung der histologischen Feinschnitte wurde zunächst das Fixierungsmittel Formaldehyd von den Gewebeproben mit Wasser ausgewaschen und dann anschließend mit aufsteigender Alkoholreihe dehydriert. Folgend legte man die Präparate in ein Intermedium, um diese dann in Paraffin einbetten zu können. Zum Schluss erfolgte die Anfertigung von 7 µm dicken Schnitten mit einem Rotationsmikrotom. Folgend ist die Herstellung der histologischen Feinschnitte detailliert beschrieben:

- Gewebeprobe für 7 Tage in H₂O legen
- Mit aufsteigender Alkoholreihe, für jeweils 48 Stunden dehydrieren: 70%, 90%, 96%, 100 % Isopropanol (Carl Roth® GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)

- Gewebeproben in ein Intermedium (Roth, Roticlear, Carl Roth® GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland) für 3 Tage legen
- Gewebeproben 4 mal in flüssigem Paraffin (McCormick Scientific, Paraplast plus, St. Louis, Missouri, USA) legen, bei 60 Grad Celsius, für jeweils 24 Stunden
- Mit einem Paraffin-Einbettssystem (Medite®, Tes ValidatTM, Burgdorf, Germany) aushärten
- 7 µm Schnitte mit einem Rotationsmikrotom (Leica RM2155, Wetzlar, Germany) anfertigen

2.4.2 Histochemische Färbung nach der Elastica van Gieson Methode

Für die Anfärbung der Präparate nach der *EvG*-Methode wurde ein modifiziertes Protokoll nach dem Romeis angewendet [50]. In dieser Färbemethode stellen sich die Zellkerne schwarzblau/schwarzbraun, die elastische Fasern dunkel-violett, die kollagenen Fasern rot und das Cytoplasma bzw. die Muskelzellen gelb, dar.

Nachfolgend ist die Herstellung der verschiedenen Färbelösungen detailliert beschrieben:

Resorcinfuchsinlösung

- Lösung A: 0,5 g basisches Fuchsin und 1,0 g Resorcin in 50 ml Aqua dest. erwärmen und lösen (Carl Roth® GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
- Lösung B: 2 g Eisen-III-Chlorid (VWRTM International GmbH, Darmstadt, Deutschland) in 10 ml Aqua dest. lösen
- Lösung C: Lösung A und B zusammengeben
- Lösung C erhitzen und 5 Minuten kochen lassen, dann abkühlen und filtrieren
- Den Niederschlag mit 70 - 100 ml 96 % Ethanol übergießen und filtern
- Niederschlag unter Erhitzen auflösen
- Abkühlen lassen
- 0,7 ml konzentriertes Chlorwasserstoff (VWRTM International GmbH, Darmstadt, Deutschland) zugeben
- Lösung filtrieren

Hämatoxylin nach Weigert

- Lösung A: 1 g Hämatoxylin (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland) in 100 ml 96 % Ethanol lösen
- Lösung B: 1,16 g Eisen-III-Chlorid in 99 ml Aqua dest. lösen und 1 ml 25% Chlorwasserstoff zugeben
- Gleiche Mengen von Lösung A und B mischen

Pikrofuchsin-Lösung nach van Gieson:

- Pikrinsäurekristalle (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland) in 1000 ml Aqua dest. lösen bis sich ein Sediment bildet
- Lösung filtrieren
- Zu 100 ml Lösung, 5ml 1% wässrige Säurefuchsinlösung (VWRTM Internation GmbH, Darmstadt, Deutschland) geben

Protokoll der *EvG*-Färbung

- Schnitte in Xylol (Carl Roth[®] GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Deutschland) entparaffinieren
- Mit absteigender Ethanolreihe rehydrieren: 100%, 90%, 70% für je 2 Minuten
- Färben mit Resorcinfuchsinlösung für 15 Minuten
- Spülen mit Aqua dest.
- Färben mit Hämatoxylin nach Weigert für 5 Minuten
- Spülen mit Aqua dest.
- Bläuen unter Leitungswasser für 10 Minuten
- Spülen mit Aqua dest.

- Färben mit Pikrofuchsin-Lösung für 1 Minute
- 2 mal mit Aqua dest. spülen
- Dehydrieren: 2 mal in 96% Ethanol, dann 2 mal in 100% Ethanol, für jeweils 2 Minuten
- Entfernung des Alkohols: 2 mal in Xylol für jeweils 2 Minuten
- Eindecken mit DePeX

2.4.3 Immunhistochemische Färbung für Elastin bei menschlichem Gewebe

Für die Methodenkontrolle der zuvor angefärbten Feinschnitte nach der *EvG* Methode erfolgte die immunhistochemische Färbung für Elastin von drei willkürlich ausgewählten Präparaten (nach eigenem Protokoll des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität). Als Ergebnis stellt sich das elastinreiche Gewebe rot-rosa und das elastinarme Gewebe blau-grau dar.

- Fixierung der Feinschnitte auf dem Objektträger im Wärmeschrank (Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach) bei 70 Grad Celsius für 2 Stunden
- Entparaffinieren in Xylol 2 x 3 Minuten
- Rehydrieren mit absteigender Ethanolreihe: 100%, 90 %, 50 % für jeweils 3 Minuten
- Mit Aqua dest. spülen
- Hochtemperatur-Antigen-Demaskierung mit VECTOR Antigen Unmasking Solution H-3300 pH 6.0 in einem Schnellkochtopf für 5 Minuten
- Objektträger beschriften und Pap Kreise um das Gewebe zeichnen
- Objektträger mit Phosphatgepufferter Kochsalzlösung (PBS) für 3 Minuten spülen
- In 0,6 % H₂O₂-PBS Lösung bei Raumtemperatur für 10 Minuten inkubieren lassen
- Objektträger mit PBS für 2 x 5 Minuten spülen
- Primärantikörper: In 3-5% Pferdeserum gelöstes monoklonales Anti-Elastin-Antikörper (Elastin (BA-4): sc-58756, SANTA CRUZ BIOTECHNOLOGY, INC.) 2 µg/ml für 20 Stunden bei Raumtemperatur inkubieren lassen

- Isotypkontrolle: In 3-5% Pferdeserum gelöstes Maus IgG1 (Purified Mouse IgG1, κ Isotype Ctrl, BioLegend®) 2 $\mu\text{g}/\text{ml}$ für 20 Stunden bei Raumtemperatur inkubieren lassen
- Mit PBS 3 x 5 Minuten spülen
- Sekundärantikörper: Biotinyliertes Pferde Anti-Maus IgG (Biotinylated Horse Anti Mouse IgG Antibody BA-2000, VECTOR) in PBS 1:250 für 45 Minuten bei Raumtemperatur inkubieren lassen
- Mit PBS 2 x 5 Minuten spülen
- Immunmarkierung: HRP Streptavidin (1:700) (HRP Streptavidin BioLegend®) für 45 Minuten bei Raumtemperatur inkubieren lassen
- Mit PBS 2 x 5 Minuten spülen
- Reporterenzym AEC Peroxidase (AEC Peroxidase (HRP) Substrate Kit, 3-amino-9-ethylcarbazole SK-4200, VECTOR) 5 - 40 Minuten bei Raumtemperatur einwirken lassen (5 ml Aqua dest., 2 Tropfen Puffer, 3 Tropfen AEC Peroxidase, 2 Tropfen H_2O_2)
- Mit PBS oder Wasser spülen
- Präparate mit Hämatoxylin 1 Sekunde gegenfärben
- 5 x 1 Minute mit Wasser spülen
- Gesättigte Lithiumcarbonat Lösung (Merck, Darmstadt, Deutschland) 1 – 10 Minuten einwirken lassen
- 5 x 1 Minute mit Wasser spülen
- Objektträger mit Aqua/Poly/mount eindecken

2.5 Mikroskopische Auswertung

Für die mikroskopische Auswertung der elastischen und kollagenen Fasern wurde das Mikroskop Axioplan von ZEISS (Mikroskop-Objektive: 2,5x, 10x, 40x) verwendet.

Zur histologischen Nachkontrolle des Epimysiums der zu untersuchenden Muskeln und des Stratum synoviale der Sehnenscheiden des *M. FDS* und *M. FDP* wurde das Mikroskop Leitz® Wetzlar (4x, 10x, 40x) verwendet.

Die Fotodokumentation für die immunhistochemisch angefärbten Präparate erfolgte mit dem Mikroskop Axioplan von Zeiss, Kamera Axiocam MRc mit der Software AxioVision 4.8.2.

Die Fotodokumentation für die in dieser Arbeit verwendeten Bilder erfolgte mit dem Mikroskop Motic[®] BA410E, Camera Moticom 10.0 MP und der Software Motic[®] Images Plus 3.0 ML.

2.5.1 Definition der zu untersuchenden Strukturen

Jedes Präparat wurde für die mikroskopische Auswertung in folgende Kompartimenten unterteilt, die anhand der Muskeln, der Ligamente und der Sehnenscheiden des *M. FDP* und *M. FDS* festgelegt und jeweils in der folgenden Reihenfolge analysiert wurden (siehe Abb. 2.3):

2.rad. (radial)

- *M. lumbricalis*
- *M. interosseus dorsalis*
- *Ligg. collateralia*

Interdigitalraum 2-4

- *Stratum synoviale* (bindegewebige Schicht) der Sehnenscheiden des *M. FDS* und *M. FDP*
- *M. lumbricalis*
- *M. interosseus dorsalis*
- *LMTP*
- *Ligg. palmaria*
- *Legueu u. Juvara Septen*
- *Ligg. collateralia*

5.uln.(ulnar)

- *M. abductor digiti minimi*

- *M. flexor digiti minimi brevis*
- *Ligg. collateralia*

Es wurde bei jedem Muskel die kollagenen- und elastischen Fasern des Epimysiums, Perimysiums und Endomysiums analysiert. Da die *Ligg. palmaria*, die *Ligg. collateralia* und die *Legueu u. Juvara Septen* häufig paarweise in den einzelnen Präparaten vorhanden sind, erfolgte die mikroskopische Auswertung dieser Ligamente zusammen und somit ergab sich für jedes untersuchte Kriterium ein Wert pro mehrfach vorhandenem Ligament. Die Analyse und Dokumentation der einzelnen Kriterien der kollagenen- und elastischen Fasern des *Stratum synoviale* der Sehnen der langen Fingerbeuger von mehrfach vorhandenen Fingerbeugergruppen erfolgte separat.

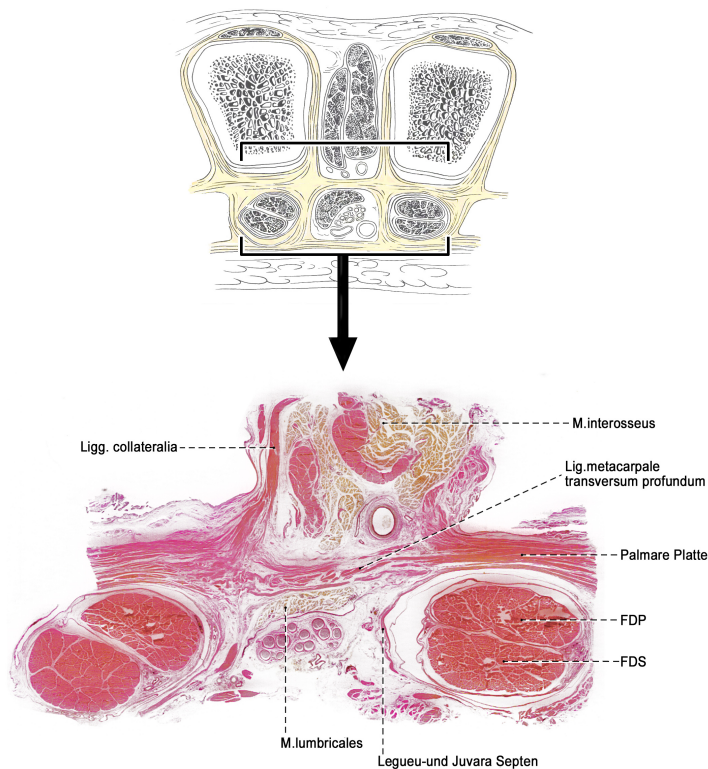


Abbildung 2.3: Schematische sowie mikroskopische Darstellung der Metakarpophalangealregion (zwischen dem 3. und 4. Metakarpalkopf) im Querschnitt, Ansicht von proximal. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre. FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*. Zeichnung: Frau C. Opfermann-Rüngeler.

2.5.2 Definition der zu untersuchenden Kriterien

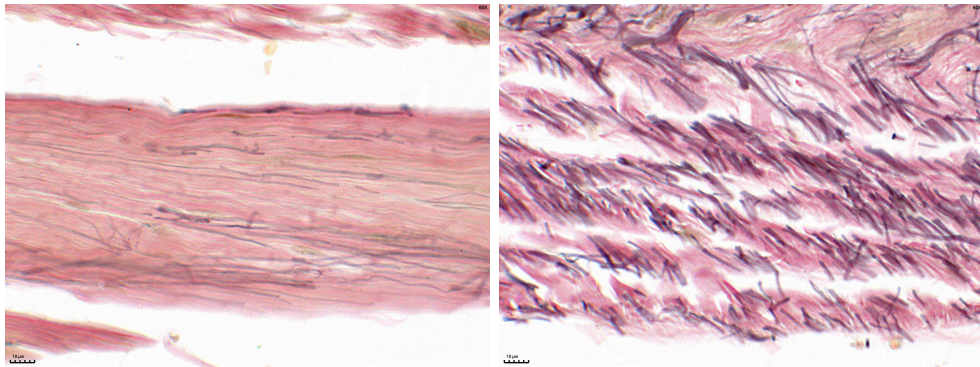
Für die histologische Auswertung erfolgte die Analyse der kollagenen Fasern in ihrem Verlauf, Beschaffenheit und Zustand, sowie die Analyse der elastischen Fasern in ihrem Verlauf in Bezug zu den kollagenen Fasern. Es wurden die Eigenschaften der Fasern dokumentiert, die am dominantesten in den jeweiligen Strukturen zu sehen waren. In den Ligamenten, im Gegensatz zu dem *Stratum synoviale* der Sehnen der langen Fingerbeuger und den Muskeln, konnten die längs angeschnittene kollagenen Fasern auch in Bezug zu der Palmarfläche (vertikal, transversal) bestimmt werden. Folgende Faserkriterien wurden definiert:

Kollagene Fasern:

- Faserverlauf in Bezug zu der Schnittebene:
 - längs angeschnittene Fasern (siehe Abb. 2.4)
 - * vertikal verlaufend (Faserverlauf vertikal zu der Palmarfläche)
 - * transversal verlaufend (Faserverlauf parallel zu der Palmarfläche)
 - quer angeschnittene Fasern (siehe Abb. 2.4)
 - quer und längs angeschnittene Fasern
 - quer angeschnittene und vertikal verlaufende Fasern
 - quer angeschnittene und transversal verlaufende Fasern
- Beschaffenheit:
 - locker angeordnete Fasern (siehe Abb. 2.5)
 - straff angeordnete Fasern (siehe Abb. 2.5)
 - locker und straff angeordnete Fasern
- Faserzustand:
 - gewellte Fasern (siehe Abb. 2.6)
 - gestreckte Fasern (siehe Abb. 2.6)
 - gewellte und gestreckte Fasern
- nicht eindeutig definierbar

Elastische Fasern

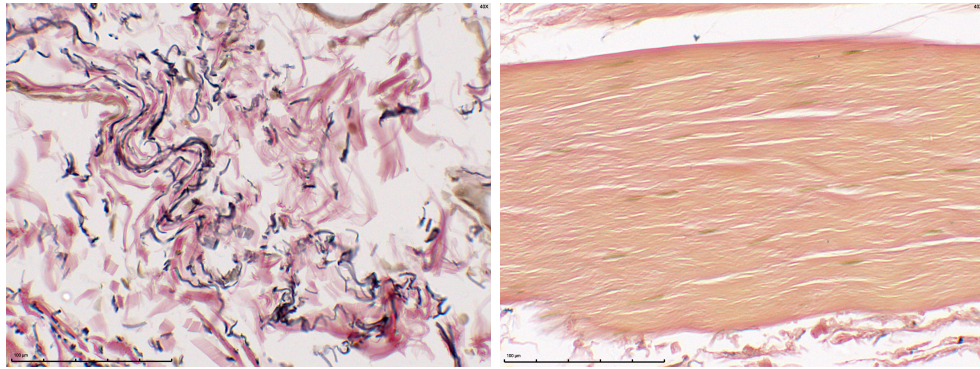
- Faserverlauf in Bezug zu den kollagenen Fasern:
 - parallel verlaufend zu den kollagenen Fasern (siehe Abb. 2.7)
 - senkrecht verlaufend zu den kollagenen Fasern (siehe Abb. 2.7)
 - parallel und senkrecht verlaufend zu den kollagenen Fasern
 - quer angeschnittene Fasern
- nicht eindeutig definierbar



(a) längs angeschnittene kollagene Fasern (b) quer angeschnittene kollagene Fasern

Abbildung 2.4: Unterschiedliche Verlaufsmuster der kollagenen Fasern, 60x Vergrößerung, *EvG-Färbung*:

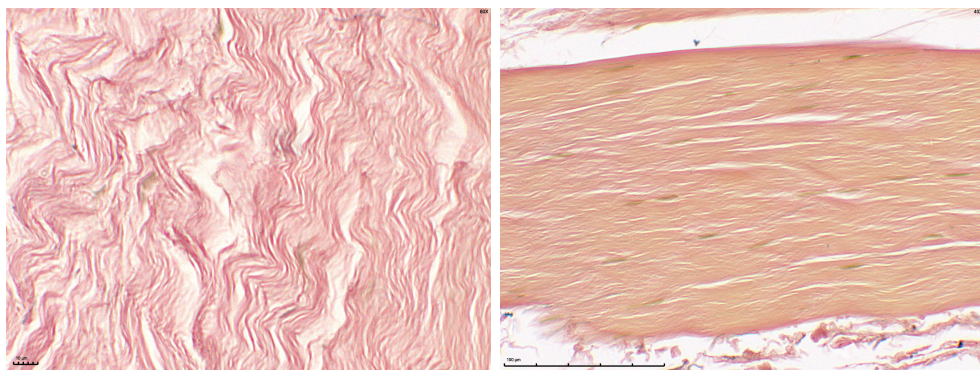
- (a) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: *Legueu u. Juvara Septen*, Ebene A;
(b) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: Gefäßwand (Bereich zwischen den *Legueu u. Juvara Septen*), Ebene A.



(a) locker angeordnete kollagene Fasern (b) straff angeordnete kollagene Fasern

Abbildung 2.5: Unterschiedliche Strukturanordnung (Beschaffenheit) der kollagenen Fasern, 40x Vergrößerung, *EvG* Färbung:

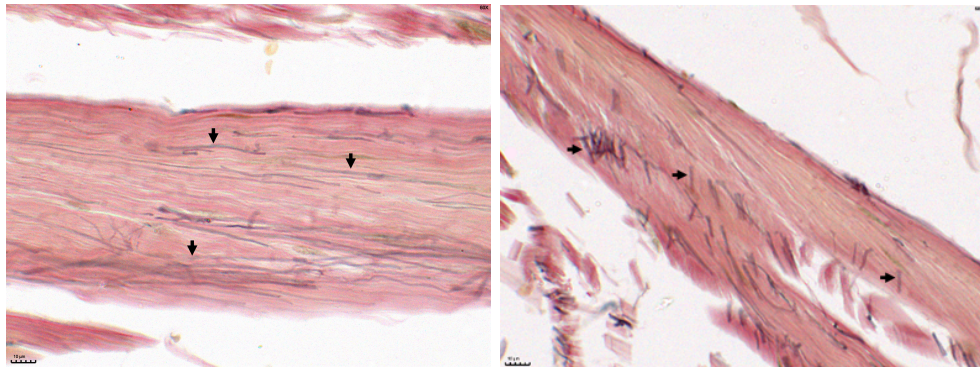
- (a) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 76 Jahre, Bereich: Bindegewebe zwischen den *Legueu u. Juvara Septen*, Ebene A;
 (b) ID 3-4 rechte Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre, Struktur: *Ligg. palmaria*, Ebene B.



(a) gewellte kollagene Fasern (b) gestreckte kollagene Fasern

Abbildung 2.6: Unterschiedlicher Erscheinungszustand der kollagenen Fasern, *EvG* Färbung:

- (a) 60x Vergrößerung, 5. uln., linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 85 Jahre, Struktur: *Ligg. collateralia*, Ebene A;
 (b) 40x Vergrößerung, ID 3-4, rechte Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre, Struktur: *Ligg. palmaria*, Ebene B.



(a) parallel verlaufende elastische Fasern zu den kollagenen Fasern (b) senkrecht verlaufende Fasern zu den kollagenen Fasern

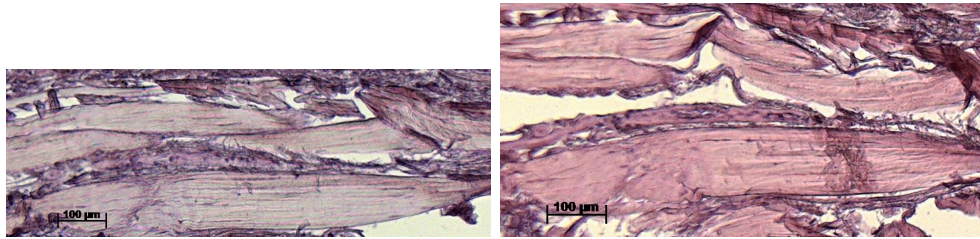
Abbildung 2.7: Unterschiedlicher Verlaufsmuster der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern, 60x Vergrößerung, *EvG* Färbung:

- (a) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: *Legueu u. Juvara* Septen, Ebene A;
(b) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: *Legueu u. Juvara* Septen, Ebene A.

Jedes Präparat wurde erst mit der kleinsten Vergrößerung 2,5x durchmustert, um die anwesenden Strukturen und die Orientierung zu definieren. Anschließend wurde die Vergrößerung 10x angewendet, um einen groben Überblick über elastische und kollagene Fasern zu gewinnen. Zum Schluss hat man die zu untersuchenden Kriterien mit einer Vergrößerung von 40x endgültig untersucht und in einer von mir fertiggestellten Excel-Tabelle (Excel Microsoft 2016) dokumentiert.

2.6 Immunhistochemie

Zur histologischen Methodenkontrolle und für den Nachweis von elastischen Fasern erfolgte die immunhistochemische Färbung von drei verblindet gewählten Präparaten drei verschiedener Körperspenden. Von jedem immunhistochemisch gefärbten Präparat, sowie dessen Kontrolle, wurde ein Bild von jedem Kompartiment mit dem Mikroskop Zeiss Axioplan, Kamera AxioCam MRc und der Software AxioVision 4.8.2, angefertigt. Die Muskeln und Ligamente wurden mit einer Vergrößerung von 10x und die Sehnenscheiden des *M. FDS* und *M. FDP* mit einer Vergrößerung von 40x fotodokumentiert. In allen drei Präparaten konnte Elastin nachgewiesen werden.



(a) Kontrolle der immunhistochemischen Färbung für Elastin
(b) Immunhistochemische Färbung für Elastin

Abbildung 2.8: Beispiel für ein immunhistochemisch angefärbtes Präparat und dessen Kontrolle, 10x Vergrößerung:

- (a) ID 3-4, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 82 Jahre, Struktur: *LMTP*, Ebene B;
(b) ID 3-4, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 82 Jahre, Struktur: *LMTP*, Ebene B.

2.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Statistik-Programm SPSS Version 19.0. Dafür wurde eine Tabelle mit den Kategorien Körperspende, Geschlecht, Alter, Seite (rechte/linke Hand), Region, Ebene, Struktur (MuskelBandA1), Bindegewebeeinheit (MuskelBG), Verlauf (VerlaufKF), Beschaffenheit und Zustand (ZustandKF) der kollagenen Fasern, sowie Verlauf der elastischen Fasern (VerlaufEF) erstellt (siehe Abb.2.9).

	Name	Typ	Breite	Dezimal...	Beschriftung	Werte	Fehlend	Spalten	Ausrichtung	Messniveau	Rolle
1	Körperspende	Numerisch	2	0		Keine	Keine	13	Rechts	Nominal	Eingabe
2	Geschlecht	Numerisch	2	0		{1, weiblich}...	Keine	11	Rechts	Nominal	Eingabe
3	Alter	Numerisch	2	0		Keine	Keine	11	Rechts	Metrisch	Eingabe
4	Seite	Numerisch	1	0		{1, rechts}...	Keine	11	Rechts	Nominal	Eingabe
5	Region	Numerisch	1	0		{1, 2. Strahl radiale Seite}...	Keine	25	Rechts	Nominal	Eingabe
6	Ebene	Numerisch	1	0		{1, proximale Ebene}...	Keine	14	Rechts	Nominal	Eingabe
7	MuskelBandA1	Numerisch	2	0	Muskel/Band/A1	{1, M. lumbricalis}...	Keine	40	Rechts	Nominal	Eingabe
8	MuskelBG	Numerisch	1	0		{1, Epimysium}...	Keine	24	Rechts	Nominal	Eingabe
9	VerlaufKF	Numerisch	1	0	Verlauf KF	{0, nicht definierbar}...	Keine	15	Rechts	Nominal	Eingabe
10	BeschaffenheitStruktur	Numerisch	1	0	Beschaffenheit...	{0, nicht definierbar}...	Keine	22	Rechts	Nominal	Eingabe
11	ZustandKF	Numerisch	1	0	Zustand KF	{0, nicht definierbar}...	Keine	19	Rechts	Nominal	Eingabe
12	VerlaufEF	Numerisch	1	0	Verlauf EF	{0, nicht definierbar}...	Keine	27	Rechts	Nominal	Eingabe

Abbildung 2.9: SPSS Version 19.0, Variablenansicht der Tabelle für die statistische Auswertung.

Für alle durchgeführten Tests wurde der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test und der Chi-Quadrat-Test eingesetzt, mit denen mehrere nicht verbundene Stichproben (Charakteristika) getestet werden konnten. Für die Statistik legte man ein Signifikanzniveau von 0,01 fest. Ist der p – Wert < 0,01 muss die Nullhypothese verworfen werden, ist dage-

gen der p – Wert $\geq 0,01$ muss die Nullhypothese angenommen werden. Damit besteht ein gewisses Risiko, dass Informationen über Korrelationen übersehen werden. Die erhobenen Daten waren durchweg nominal skaliert.

Es erfolgte zunächst die statistische Auswertung und die Suche nach Unterschieden von allen Händen; anschließend von allen Regionen, dann von allen Strukturen und zuletzt von jeder einzelnen Strukturart untereinander. Es wurde hinsichtlich nach Unterschieden zwischen den Ebenen und den Seiten gesucht.

Im Anschluss erfolgte die grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten jedes Fasercharakteristikums für jede Struktur und jede Bindegewebeeinheit in gruppierten Balkendiagrammen. Somit konnte für jede Struktur und Bindegewebeeinheit die am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika abgelesen und dokumentiert werden (siehe Abb. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10). Die am häufigsten auftretenden Verhalten der verschiedenen Fasercharakteristika in den verschiedenen Bindegewebeeinheiten der untersuchten Strukturen wurden anschließend in 2D-Abbildungen der MCP-Region zusammengefasst dargestellt (siehe Abb. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4).

KAPITEL 3

Ergebnisse

In dieser Arbeit wurden 240 Proben von 12 Körperspenden mit einer *EvG*-Färbung angefärbt und mikroskopisch ausgewertet. Darüber hinaus gab es Kontrollen. Die Körperspenden waren zum Zeitpunkt des Todes zwischen 60 und 94 Jahre alt, mit einem Mittelwert von 83 Jahren und einem Median von 85,5 Jahren.

Bezogen auf das *LMTP* wurde die MCP-Region von 12 Händepaaren in 2 Ebenen analysiert (Ebene A: proximaler Beginn des *LMTP* und Ebene B: 5 mm distal des *LMTP*). Dabei wurde die MCP-Region jeder Hand in 5 weitere Regionen unterteilt, in denen wiederum 12 Strukturen betrachtet wurden. Dabei wurden insgesamt 6 Bindegewebeeinheiten untersucht. Es konnten 17 verschiedene Fasercharakteristika erfasst werden, die Verlauf, Zustand und Beschaffenheit der Kollagenfasern sowie Verlauf und Beziehung der elastischen Fasern zu den Kollagenfasern abbildeten (siehe Kapitel 2). Dazu wurden 24.564 Einzelwerte erhoben.

Es wurden folgende Fasercharakteristika für die kollagenen Fasern erfasst:

- Faserverlauf in Bezug zu der Schnittebene:
 - längs angeschnittene Fasern (siehe Abb. 2.4)
 - * vertikal verlaufend
 - * transversal verlaufend
 - quer angeschnittene Fasern (siehe Abb. 2.4)
 - quer und längs angeschnittene Fasern
 - quer angeschnittene und vertikal verlaufende Fasern
 - quer angeschnittene und transversal verlaufende Fasern
 - nicht eindeutig definierbar

- Beschaffenheit:
 - locker angeordnete Fasern (siehe Abb. 2.5)
 - straff angeordnete Fasern (siehe Abb. 2.5)
 - locker und straff angeordnete Fasern
 - nicht eindeutig definierbar
- Zustand:
 - gewellte Fasern (siehe Abb. 2.6)
 - gestreckte Fasern (siehe Abb. 2.6)
 - gewellt und gestreckte Fasern
 - nicht eindeutig definierbar

Es wurden folgende Fasercharakteristika für den Verlauf der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern erfasst:

- parallel verlaufend (siehe Abb. 2.7)
- senkrecht verlaufend (siehe Abb. 2.7)
- parallel und senkrecht verlaufend
- quer angeschnittene Fasern
- nicht eindeutig definierbar

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt und überprüft:

H1: Die Kollagenfasern verlaufen in den untersuchten Strukturen rechts und links nicht gleich.

H2: Die Kollagenfasern verlaufen in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B nicht gleich.

H3: Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen rechts und links nicht die gleiche Beschaffenheit.

H4: Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B nicht die gleiche Beschaffenheit.

H5: Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen rechts und links nicht den gleichen Zustand.

H6: Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B nicht den gleichen Zustand.

H7: Die elastischen Fasern verlaufen in den untersuchten Strukturen rechts und links nicht gleich.

H8: Die elastischen Fasern verlaufen in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B nicht gleich.

H0 (H1): Die Kollagenfasern verlaufen in den untersuchten Strukturen rechts und links gleich.

H0 (H2): Die Kollagenfasern verlaufen in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B gleich.

H0 (H3): Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen rechts und links die gleiche Beschaffenheit.

H0 (H4): Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B die gleiche Beschaffenheit.

H0 (H5): Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen rechts und links den gleichen Zustand.

H0 (H6): Die Kollagenfasern haben in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B den gleichen Zustand.

H0 (H7): Die elastischen Fasern verlaufen in den untersuchten Strukturen rechts und links gleich.

H0 (H8): Die elastischen Fasern verlaufen in den untersuchten Strukturen der Ebene A und B gleich.

3.1 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung erfolgte die quantitative Einteilung jeder Körperspende, jeder Ebene, jeder Seite, jeder Region, jeder Struktur, jeder Bindegewebeeinheit, jedes Geschlechts und jedes Fasercharakteristikums. Die Ergebnisse wurden in einer Excel-Tabelle (Excel Mikrosoft 2016) dokumentiert und mit dem Statistik-Programm SPSS Version 19.0 statistisch ausgewertet.

Für alle durchgeführten Tests wurde der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test und der Chi-Quadrat-Test eingesetzt, mit denen mehrere nicht verbundene Stichproben (Charakteristika) getestet werden konnten. Für die Statistik legte man ein Signifikanzniveau von

0,01 fest. Ist der p – Wert $< 0,01$ muss die Nullhypothese verworfen werden, ist dagegen der p – Wert $\geq 0,01$ muss die Nullhypothese angenommen werden. Damit besteht ein gewisses Risiko, dass Informationen über Korrelationen übersehen werden. Die erhobenen Daten waren durchweg nominal skaliert.

Es erfolgte zunächst die statistische Auswertung und die Suche nach Unterschieden von allen Händen; anschließend von allen Regionen, dann von allen Strukturen und zuletzt von jeder einzelnen Strukturart untereinander. Dazu wurden in jedem Fall alle Hände, dann die Seiten (rechte/linke Hand), die Ebenen und die Seiten abhängig von den Ebenen miteinander verglichen.

Im Anschluss erfolgte die grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten jedes Fasercharakteristikums für jede Region und jede Bindegewebeeinheit von jeder Struktur in gruppierten Balkendiagrammen. Somit konnte für jede Region und Bindegewebeeinheit jeder Struktur die am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika abgelesen werden.

3.1.1 Statistische Auswertung der Hände untereinander

Zunächst wurde analysiert, welche Daten sich von Ebenen, Seiten, Geschlecht und Regionen nicht unterscheiden und daher gepoolt verwendet werden dürfen.

Zuerst wurde nach Unterschieden zwischen allen Händen gesucht. Es wurden keine Unterschiede gefunden. Anschließend wurde auf Unterschiede zwischen den Seiten - rechte/linke Hand - getestet. Beide Seiten unterschieden sich nur bezüglich des Verlaufs der Kollagenfasern. Für eine genauere Analyse wurden dann die Tests wiederholt und jede der beiden Ebenen getrennt betrachtet. Es ergab sich kein Unterschied ($p = 0,016$ und $p = 0,207$).

Vor diesem Hintergrund wurden die Ebenen miteinander verglichen, wobei nur jeweils eine Seite betrachtet wurde. Bei der Betrachtung von linker und rechter Hand gemeinsam sind der Verlauf der elastischen Fasern ($p = 0,00$) und der Zustand der Kollagenfasern ($p = 0,003$) signifikant verschieden; bei Betrachtung alleine der rechten Hand zeigt sich der Unterschied zwischen den beiden Ebenen ebenfalls (Elastinverlauf $p = 0,00$ und Zustand des Kollagens $p = 0,005$); in diesem Fall sind in der linken Hand keine Unterschiede zu finden ($p = 0,032$ und $p = 0,150$). Da der Zustand der Kollagenfasern (gewellt oder gestreckt) wesentlich von Elastin bestimmt wird, sind diese gleichsinnigen Ergebnisse zwischen Elastinverlauf und Zustand der Kollagenfasern stringent.

Kollagen verhält sich gepoolt unterschiedlich im Verlauf abhängig von der Seite, aber nicht von der Ebene. Elastin (und der davon abhängige Zustand des Kollagens) verhält sich hingegen unterschiedlich abhängig von der Ebene aber nicht von der Seite.

Im Weiteren wurde nach Unterschieden zwischen den Geschlechtern gesucht. Dazu wurden die Seiten, die Ebenen und die Seiten abhängig von den Ebenen miteinander verglichen.

In keinem Fall wurden Unterschiede zwischen den Geschlechtern gefunden.

3.1.2 Statistische Auswertung der Regionen untereinander

Anschließend wurde nach Unterschieden zwischen den Regionen recherchiert. Dazu wurden zuerst alle Hände, dann die Seiten, die Ebenen und die Seiten abhängig von den Ebenen miteinander verglichen. In allen Fällen ergab sich für jedes Charakteristikum ein $p \geq 0,01$, weswegen keine Unterschiede zwischen den Regionen zu finden waren.

3.1.3 Statistische Auswertung der Strukturen untereinander

Im Anschluss wurde nach Unterschieden zwischen den Strukturen getestet. Dazu wurden zunächst alle Hände, dann die Seiten, die Ebenen und die Seiten abhängig von den Ebenen miteinander verglichen. Wie erwartet, ergab sich für jedes Fasercharakteristikum ein stark signifikanter p -Wert $< 0,01$ (in allen Fällen ein $p = 0,00$), außer für das Charakteristikum „Verlauf der elastischen Fasern“ ($p = 0,34$) für die Ebene B der linken Hände. Für das Charakteristikum „Verlauf der elastischen Fasern“ waren für die Ebene B der linken Hände zwischen den einzelnen Strukturen keine Unterschiede zu finden. Für die restlichen Fälle sind bei den Fasercharakteristika zwischen allen Strukturen Unterschiede zu sehen.

3.1.4 Statistische Auswertung der Bindegewebeeinheiten untereinander

Im Anschluss wurde nach Unterschieden zwischen den Bindegewebeeinheiten gesucht. Dazu wurden erstmal alle Hände, dann die Seiten, die Ebenen und die Seiten abhängig von den Ebenen miteinander verglichen. Es ergab sich, wie erwartet, für alle Untersuchungen ein p -Wert $< 0,01$ (für alle Fälle ein $p = 0,00$). Es bestehen folglich zwischen den einzelnen Bindegewebeeinheiten Unterschiede in dem Verlauf, der Beschaffenheit und dem Zustand der kollagenen Fasern sowie in dem Verlauf der elastischen Fasern.

3.1.5 Statistische Auswertung jeder einzelnen Strukturart

Zuletzt wurde nach Unterschieden zwischen jeder einzelnen Strukturart geprüft. Dazu wurden ebenso alle Hände, dann die Seiten, die Ebenen und die Seiten abhängig von den Ebenen miteinander verglichen.

Im Falle der *Mm. abductores digiti minimi* konnte bei der statistische Analyse aller Hände untereinander und der Ebenen B beider Seiten untereinander im Falle des Charakteristikums „Verlauf der elastischen Fasern“ die Null-Hypothese verworfen werden ($p = 0,00$, $p = 0,006$).

Im Falle der *Mm. flexores digiti minimi breves* konnte für die Charakteristika „Verlauf der

kollagenen Fasern“ und „Verlauf der elastischen Fasern“ bei der statistischen Auswertung aller Hände untereinander ($p = 0,00$, $p = 0,00$) und der Ebenen B beider Seiten ($p = 0,005$, $p = 0,00$) untereinander die Null-Hypothese verworfen werden. Für die Ebene A kann nur die Null-Hypothese für das Charakteristikum „Verlauf der elastischen Fasern“ verworfen werden ($p = 0,009$), für das Charakteristikum „Verlauf der kollagenen Fasern“ muss die Null-Hypothese angenommen werden.

In den restlichen Fällen ergaben sich p - Werte $\geq 0,01$, weswegen die Nullhypothese der Gleichheit angenommen werden muss.

Da in den meisten Fällen wenige Unterschiede zu finden waren und die Ergebnisse somit gepoolt verwendet werden dürfen, erfolgte die grafische Darstellung der relativen Häufigkeit jedes Fasercharakteristikums für jede Region, Struktur und deren Bindegewebeeinheiten in gruppierten Balkendiagrammen (siehe Abb. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10) und somit die Suche nach einheitlichen Mustern.

3.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika

Für jede Region und jede Bindegewebeeinheit von jeder Struktur wurde die relative Häufigkeit der Fasercharakteristika Verlauf, Zustand und Beschaffenheit der kollagenen Fasern, sowie Faserverlauf der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern, in gruppierten Balkendiagrammen dargestellt. Somit konnte für jede Region und Bindegewebeeinheit jeder Struktur die am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika abgelesen werden.

3.2.1 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Regionen

2. radial

Im 2. rad. sind bei ca. 30% der Fälle „quer und längs“, bei ca. 28% der Fälle „quer“ und bei ca. 20% der Fälle „längs“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Hier sind am häufigsten „lockere“ (ca. 58% der Fälle) und „gestreckte“ (ca. 60% der Fälle) kollagene Fasern zu finden. Die elastischen Fasern sind am häufigsten „parallel“ zu den kollagenen Fasern (ca. 70% der Fälle) verlaufend.

Interdigital 2-3

Im ID 2-3 sind bei ca. 40% der Fälle am häufigsten „quer und längs“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Bei ca. 57% der Fälle sind „lockere“ und bei ca. 50% der Fälle „gestreckte“ Kollagenfasern am häufigsten zu finden. Bei ca. 75% der Fälle sind „parallel“ verlaufende elastische Fasern zu den Kollagenfasern zu finden.

Interdigital 3-4

Im ID 3-4 sind bei ca. 35% der Fälle am häufigsten „quer und längs“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Hier sind am häufigsten „lockere“ (ca. 56% der Fälle) und „gestreckte“ (ca. 55% der Fälle) Kollagenfasern zu finden. Die „parallel“ verlaufenden elastischen Fasern zu den kollagenen Fasern sind mit ca. 78% am häufigsten zu sehen.

Interdigital 4-5

Im ID 4-5 sind am häufigsten „quer und längs“ (ca. 35% der Fälle) und am zweithäufigsten „quer“ (ca. 25% der Fälle) verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Hier sind am häufigsten „lockere“ (ca. 55% der Fälle) und „gestreckte“ (ca. 58% der Fälle) kollagene Fasern zu finden. Bei ca. 80% der Fälle sind „parallel“ verlaufende elastische Fasern zu den Kollagenfasern zu finden.

5. ulnar

Im 5. uln. sind am häufigsten bei ca. 50% der Fälle, „quer und längs“ und bei ca. 40% der Fälle „quer“ verlaufende Kollagenfasern zu finden. Hier sind am häufigsten „locker“ (ca. 62% der Fälle) und „gestreckte“ (ca. 55% der Fälle) Kollagenfasern vorhanden. Die elastischen Fasern sind am häufigsten „parallel“ zu den kollagenen Fasern verlaufend (ca. 76% der Fälle).

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnenscheiden

Ligamentum metacarpale transversum profundum

Im *LMTP* sind bei ca. 55% der Fälle „transversal“ verlaufende Kollagenfasern am häufigsten vorhanden. Hier sind bei ca. 93% der Fälle „straffe“ Kollagenfasern und bei jeweils ca. 40% der Fälle am häufigsten „gewellte“ und „gestreckte“ Kollagenfasern zu finden. „Parallel“ verlaufende elastische Fasern zu den Kollagenfasern sind bei ca. 93% der Fälle am häufigsten verlaufend. (siehe Abb. 3.5)

Ligamenta palmaria

In den palmaren Platten sind „transversal“ verlaufende Kollagenfasern am häufigsten vorhanden (ca. 70% der Fälle). Hier sind am häufigsten „straffe“ (ca. 100% der Fälle) und „gestreckte“ (ca. 55% der Fälle) Kollagenfasern zu finden. Die elastischen Fasern sind bei ca. 90% der Fälle „parallel“ zu den kollagenen Fasern zu sehen. (siehe Abb. 3.5)

Ligamenta collateralia

In den *Ligg. collateralia* sind am häufigsten „vertikal“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden (ca. 78% der Fälle). Hier sind am häufigsten „straffe“ (ca. 100% der Fälle) und „gestreckte“ (ca. 55% der Fälle) Kollagenfasern zu sehen. Bei ca. 90% der Fälle sind „parallel“ verlaufende elastische Fasern zu den kollagenen Fasern zu finden. (siehe Abb. 3.5)

Legueu und Juvara Septen

In den *Legueu und Juvara Septen* sind am häufigsten „vertikal“ verlaufende Kollagenfasern (ca. 78% der Fälle) zu finden. Mit ca. 100% der Fälle sind hier am häufigsten „straffe“ und mit ca. 40% der Fälle „gestreckte“, wie auch mit ca. 40% der Fälle „gemischte“ (gewellte und gestreckte) Kollagenfasern am häufigsten vorhanden. Bei ca. 90% der Fälle sind die elastische Fasern „parallel“ zu den kollagenen Fasern verlaufend. (siehe Abb. 3.5)

Musculi lumbricales

- Epimysium

Bei ca. 48% der Fälle und somit am häufigsten sind im Epimysium der *Musculi lumbricales* „längs“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Bei ca. 47% der Fälle sind „straff“ und bei ca. 45% der Fälle „locker“ verlaufende Kollagenfasern zu finden. Bei ca. 70% der Fälle sind hier „gestreckte“ Kollagenfasern am häufigsten zu sehen. Bei ca. 45% der Fälle und somit am häufigsten sind „parallel“ und bei 38% der Fälle „senkrecht und parallel“ verlaufende elastische Fasern zu den Kollagenfasern zu finden. (siehe Abb. 3.6)

- Perimysium

Mit ca. 53% der Fälle sind im Perimysium der *Musculi lumbricales* am häufigsten „quer“ und mit ca. 47% der Fälle am zweithäufigsten „quer und längs“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Bei ca. 98% der Fälle sind „locker“ und bei ca. 83% der Fälle „gestreckte“ Kollagenfasern zu finden. Die elastische Fasern verlaufen bei ca. 90% der Fälle „parallel“ zu den Kollagenfasern. (siehe Abb. 3.6)

- Endomysium

Bei ca. 48% der Fälle und somit am häufigsten sind im Endomysium der *Musculi lumbricales* „quer und längs“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Bei ca. 80% der Fälle sind „locker“ verlaufende Kollagenfasern zu finden. Mit ca. 55% der Fälle sind

im Falle des Zustand hier am häufigsten „nicht eindeutig definierbare“ und mit 25% der Fälle am zweithäufigsten „gewellte“ Kollagenfasern zu sehen. Die elastischen Fasern sind bei ca. 70% der Fälle „parallel“ verlaufend zu den kollagenen Fasern. (siehe Abb. 3.6)

Musculi interossei dorsales

- Epimysium

Bei ca. 44% der Fälle und somit am häufigsten sind im Epimysium der *Mm. interossei dorsales* „längs“ und bei ca. 33% der Fälle „quer und längs“ verlaufende Kollagenfasern vorhanden. Bei ca. 45% der Fälle und somit am häufigsten sind hier „locker“ und bei ca. 40% der Fälle „straff“ verlaufende Kollagenfasern zu finden. Bei 70% der Fälle sind im Epimysium die Kollagenfasern „gestreckt“ vorhanden. Bei ca. 50% der Fälle sind die elastische Fasern „parallel“ verlaufend zu den kollagenen Fasern. (siehe Abb. 3.7)

- Perimysium

Bei ca. 55% der Fälle sind im Perimysium der *Mm. interossei dorsales* „quer und längs“ und bei ca. 43% der Fälle „quer“ verlaufende Kollagenfasern zu finden. Bei ca. 98% der Fälle sind die Kollagenfasern „locker“ und bei ca. 78% der Fälle „gestreckt“ vorhanden. Mit ca. 85% der Fälle sind im Perimysium die elastische Fasern am häufigsten „parallel“ zu den kollagenen Fasern verlaufend. (siehe Abb. 3.7)

- Endomysium

Bei ca. 48% der Fälle und somit am häufigsten sind im Endomysium der *Mm. interossei dorsales* die Kollagenfasern „quer und längs“. Bei ca. 95% der Fälle sind die Kollagenfasern „locker“ und bei ca. 47% der Fälle „gewellt“ vorhanden. Bei ca. 80% der Fälle sind die elastische Fasern „parallel“ verlaufend. (siehe Abb. 3.7)

Musculi abductores digiti minimi

- Epimysium

Im Epimysium der *Mm. abductores digiti minimi* sind bei 61% der Fälle die Kollagenfasern am häufigsten „längs“ verlaufend. Bei ca. 70% der Fälle sind hier die Kollagenfasern „straff“ und bei ca. 85% der Fälle „gestreckt“ vorhanden. Im Epimysium sind bei ca. 65% der Fälle die elastischen Fasern „senkrecht und parallel“ zu

den Kollagenfasern verlaufend. (siehe Abb. 3.8)

- Perimysium

Im Perimysium der *Mm. abductores digiti minimi* sind bei ca. 79% der Fälle die Kollagenfasern „quer und längs“ verlaufend. Bei ca. 95% der Fälle sind die Kollagenfasern „locker“ und bei ca. 85% der Fälle „gestreckt“ vorhanden. Bei ca. 85% der Fälle sind die elastischen Fasern „parallel“ zu den Kollagenfasern verlaufend. (siehe Abb. 3.8)

- Endomysium

Im Endomysium der *Mm. abductores digiti minimi* sind bei ca. 60% der Fälle die Kollagenfasern „quer und längs“ verlaufend. Hier sind mit ca. 90% der Fälle die kollagenen Fasern am häufigsten „locker“ vorhanden. Bei ca. 40% der Fälle sind im Falle des Zustands die Kollagenfasern „nicht eindeutig definierbar“ und bei ca. 38% der Fälle „gewellt“ zu finden. Im Endomysium sind mit ca. 70% der Fälle die elastischen Fasern „parallel“ zu den Kollagenfasern verlaufend. (siehe Abb. 3.8)

Musculi flexores digiti minimi breves

- Epimysium

Im Epimysium der *Mm. flexores digiti minimi breves* sind bei ca. 45% der Fälle und somit am häufigsten, die Kollagenfasern „quer und längs“ und bei ca. 40% der Fälle „längs“ verlaufend. Hier sind bei ca. 75% der Fälle die kollagenen Fasern „locker“ und bei ca. 60% der Fälle „gestreckt“ vorhanden. Die elastischen Fasern verlaufen hier am häufigsten (ca. 78% der Fälle) „parallel“ zu den Kollagenfasern. (siehe Abb. 3.9)

- Perimysium

Im Perimysium der *Mm. flexores digiti minimi breves* sind bei ca. 55% der Fälle die kollagenen Fasern „quer und längs“ verlaufend. Bei ca. 100% der Fälle sind die kollagenen Fasern „locker“ und bei ca. 65% der Fälle die kollagenen Fasern „gestreckt“ vorhanden. Die elastischen Fasern verlaufen bei ca. 90% der Fälle „parallel“ zu den Kollagenfasern. (siehe Abb. 3.9)

- Endomysium

Im Endomysium der *Mm. flexores digiti minimi breves* sind mit ca. 45% der Fälle und somit am häufigsten, die kollagenen Fasern „quer und längs“ und mit ca. 35% der Fälle „quer“ verlaufend. Hier sind bei ca. 80% der Fälle die kollagenen Fasern „locker“ vorhanden. Bei ca. 45% der Fälle sind im Falle des Zustands „nicht eindeutig definierbare“ und bei ca. 35% der Fälle „gewellte“ kollagene Fasern zu finden. Die elastischen Fasern verlaufen bei ca. 60% der Fälle „parallel“ zu den Kollagenfasern. (siehe Abb. 3.9)

Sehnenscheiden der langen Fingerflexoren

- Parietales Blatt

Im parietalen Blatt der *Lamina synovialis* der Sehnenscheiden der langen Fingerflexoren sind bei ca. 90% der Fälle die Kollagenfasern „quer und längs“ verlaufend. Bei ca. 90% der Fälle sind „lockere“ und bei ca. 70% der Fälle „gestreckte“ Kollagenfasern zu finden. Die elastischen Fasern sind bei ca. 60% der Fälle „parallel“ verlaufend zu den kollagenen Fasern. (siehe Abb. 3.10)

- Inneres Blatt

Bei ca. 70% der Fälle sind die Kollagenfasern im viszeralem Blatt der *Lamina synovialis* der Sehnenscheiden „quer und längs“ verlaufend. Bei ca. 90% der Fälle sind „locker“ und bei ca. 75% der Fälle „gestreckte“ Kollagenfasern vorhanden. Die elastischen Fasern sind bei ca. 58% der Fälle „parallel“ verlaufend zu den kollagenen Fasern. (siehe Abb. 3.10)

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei der statistischen Auswertung der verschiedenen Strukturarten konnte für die Fasercharakteristika in den meisten Fällen die Nullhypothese angenommen werden ($p - \text{Wert} \geq 0,01$) (Ausnahme: *Mm. abductores digiti minimi* und *Mm. flexores digiti minimi breves* (s.o.)). Dieses spricht dafür, dass bei den meisten Fällen (Ausnahme: *Mm. abductores digiti minimi* und *Mm. flexores digiti minimi breves*) die Fasercharakteristika in einer gleichen Strukturart in den verschiedenen Regionen keine Unterschiede aufweisen. Somit kann man davon ausgehen, dass in jeder einzelnen Region eine gleiche Strukturart ähnliche oder gleiche Fasercharakteristika - wie in allen anderen Regionen - aufweist.

Für die Richtigkeit der statistischen Tests sprechen die hoch signifikanten p - Werte bei

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnenscheiden

der Suche nach Unterschieden zwischen den Strukturarten und Bindegewebeeinheiten untereinander. Bei den meisten Fällen erhielt man einen p – Wert $< 0,01$, was dafür spricht, dass sich die Fasercharakteristika zwischen den verschiedenen Strukturarten und Bindegewebearten unterscheiden (Ausnahme: Verlauf der elastischen Fasern für die Ebene B der linken Händen).

Da die Nullhypothese für die meisten einzelnen Strukturarten angenommen werden konnte und die Werte gepoolt angewendet werden dürfen, erfolgte die grafische Darstellung der Fasercharakteristika für jede einzelne Region, Struktur und Bindegewebeeinheit. Dieses ermöglichte die Suche von gemeinsamen Mustern und die Bestimmung von den am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für jede Region, Struktur und Bindegewebeeinheit.

Struktur	Bindegewebeeinheit	Verlauf der Kollagenfasern	Beschaffenheit der Kollagenfasern	Zustand der Kollagenfasern	Verlauf der elastischen Fasern
LMTP	Ligament	transversal	straff	gewellt und gestreckt	parallel
Palmare Platten	Ligament	transversal	straff	gestreckt	parallel
Legueu und Juvara Septen	Ligament	vertikal	straff	gestreckt und gemischt	parallel
Ligg. collateralia	Ligament	vertikal	straff	gestreckt	parallel
Mm. lumbricales	Epimysium	längs	straff	gestreckt	parallel
	Perimysium	quer	locker	gestreckt	parallel
	Endomysium	quer und längs	locker	nicht eindeutig definierbar	parallel
Mm. interossei dorsales	Epimysium	längs	locker	gestreckt	parallel
	Perimysium	quer und längs	locker	gestreckt	parallel
	Endomysium	quer und längs	locker	gewellt	parallel
Mm. abductores digiti minimi	Epimysium	längs	straff	gestreckt	parallel und senkrecht
	Perimysium	quer und längs	locker	gestreckt	parallel
	Endomysium	quer und längs	locker	nicht eindeutig definierbar	parallel
Mm. flexores digiti minimi	Epimysium	quer und längs	locker	gestreckt	parallel
	Perimysium	quer und längs	locker	gestreckt	parallel
	Endomysium	quer und längs	locker	nicht eindeutig definierbar	parallel
Sehnenscheiden der langen Fingerbeuger	Äußeres Blatt	quer und längs	locker	gestreckt	parallel
	Inneres Blatt	quer und längs	locker	gestreckt	parallel

Tabelle 3.1: Darstellung der häufigsten Fasercharakteristika für jede Bindegewebeeinheit der einzelnen Strukturarten.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnenscheiden

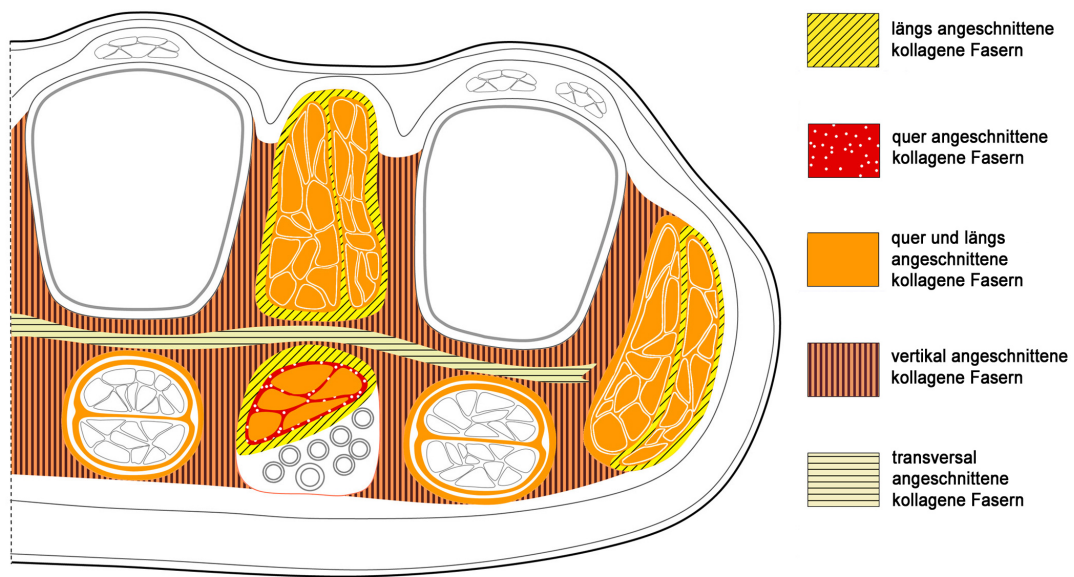


Abbildung 3.1: Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für den Faserverlauf der kollagenen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnenscheiden

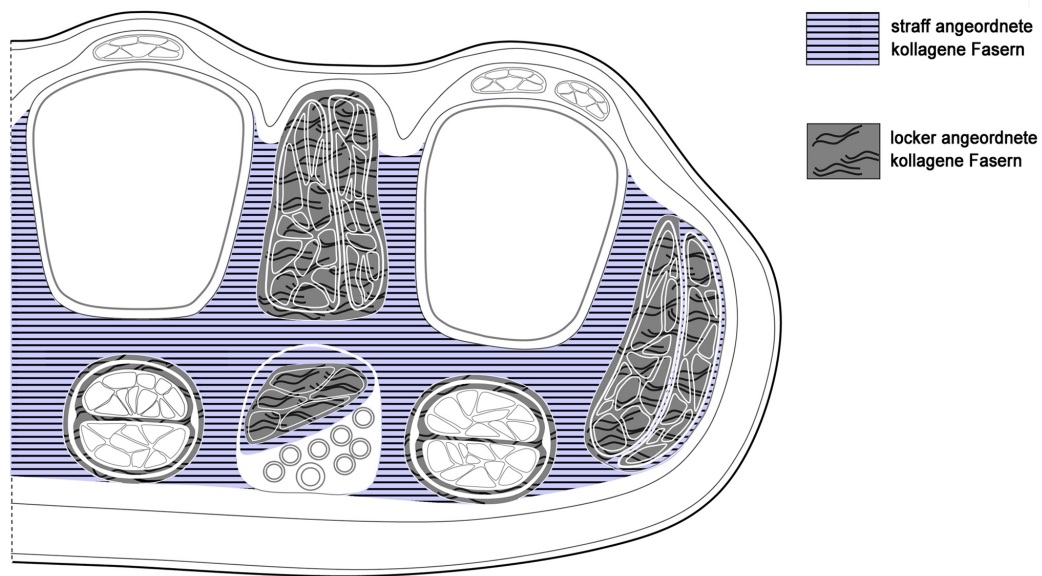


Abbildung 3.2: Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für die Beschaffenheit der kollagenen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnscheiden

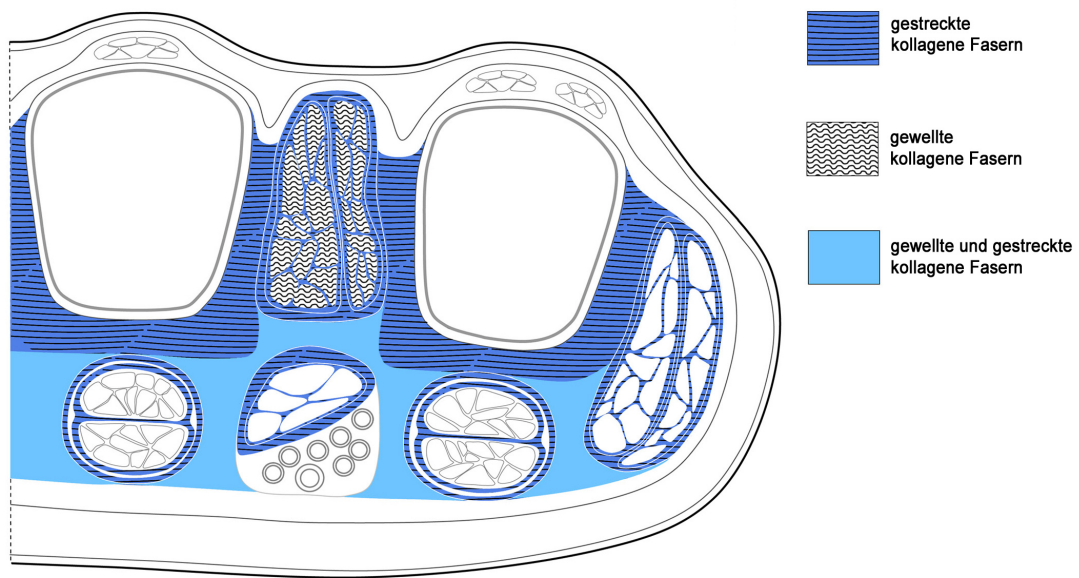


Abbildung 3.3: Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für den Zustand der kollagenen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnenscheiden

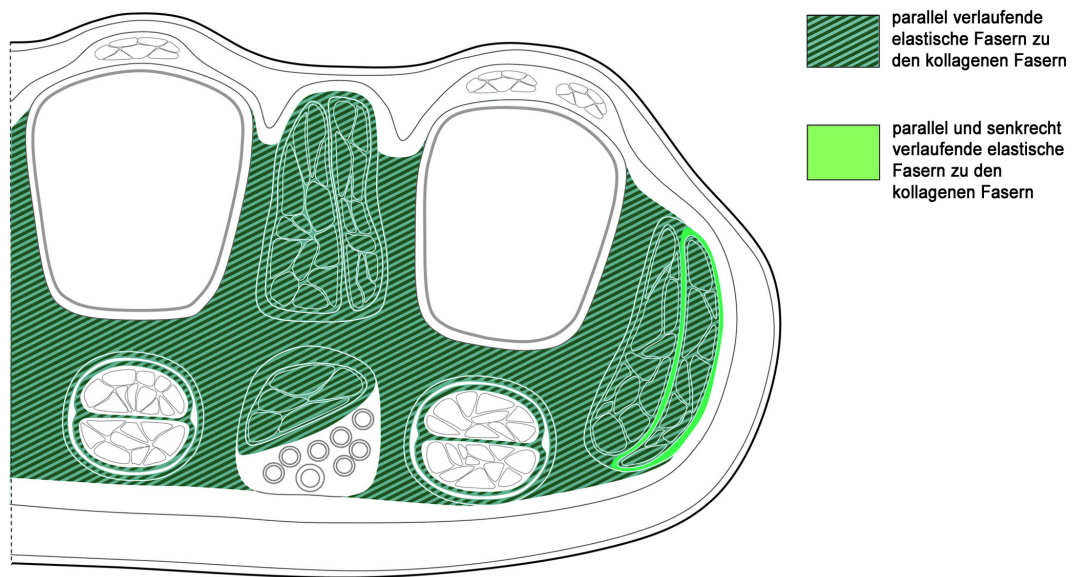


Abbildung 3.4: Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für den Faserverlauf der elastischen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnenscheiden

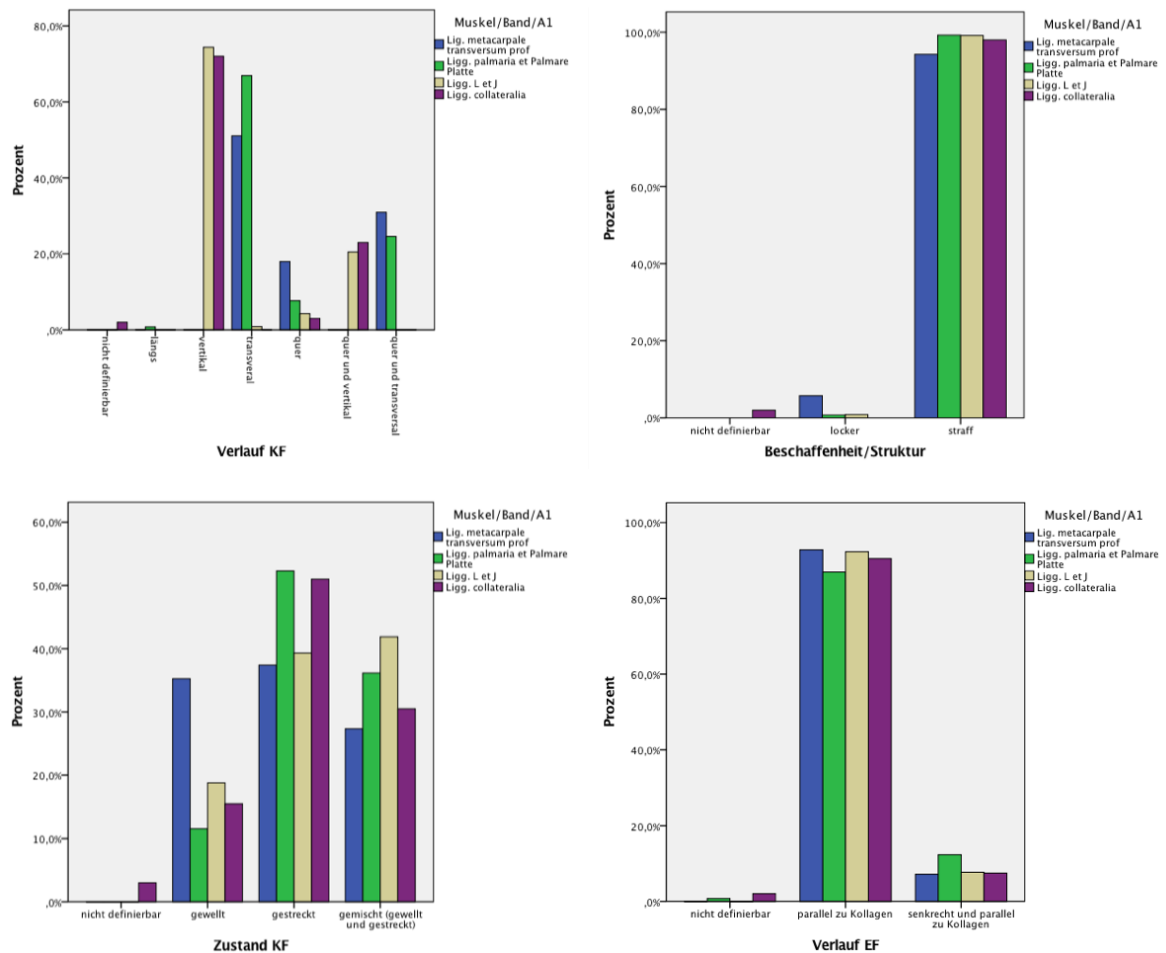


Abbildung 3.5: Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in den Ligamenten der MCP-Region. Ligg. L et J = Legueu und Juvara Septen

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnscheiden

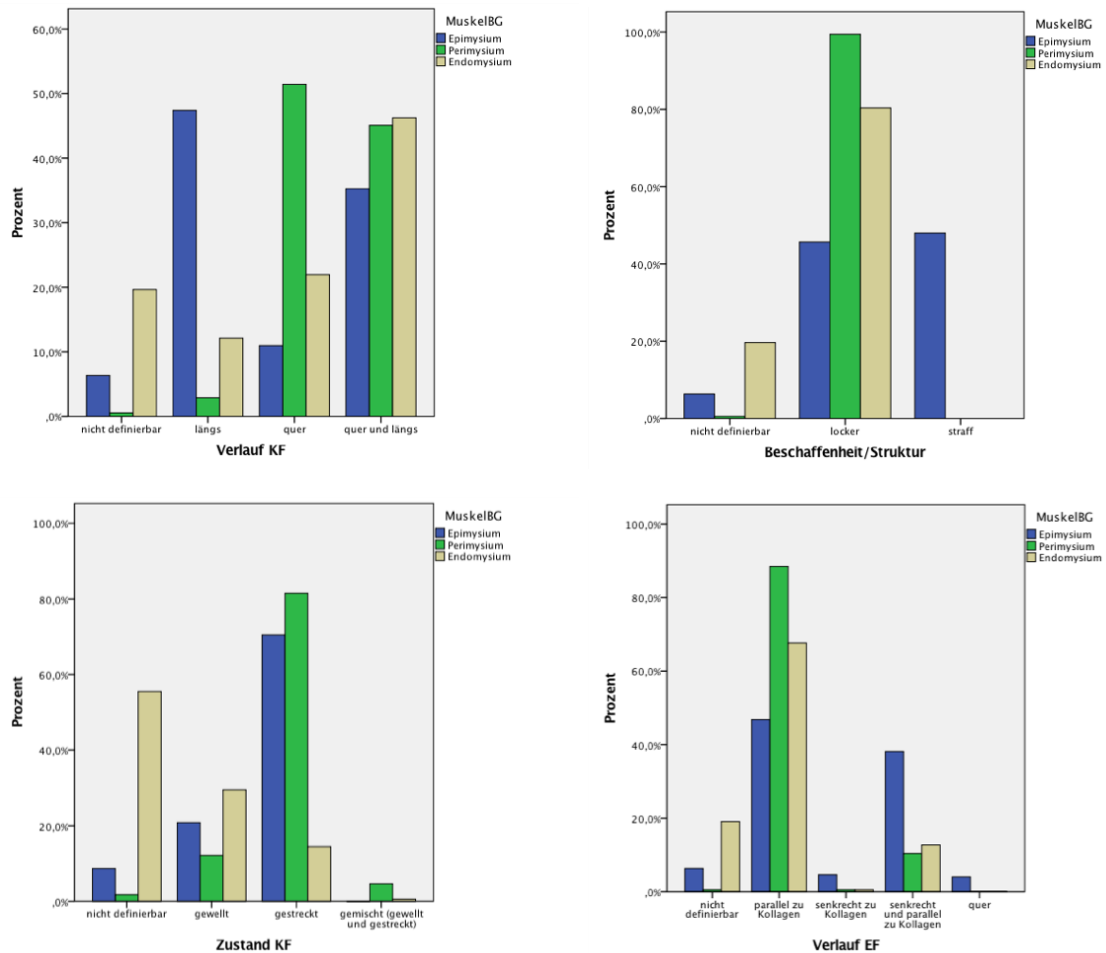


Abbildung 3.6: Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der *Mm. lumbricales*.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnscheiden

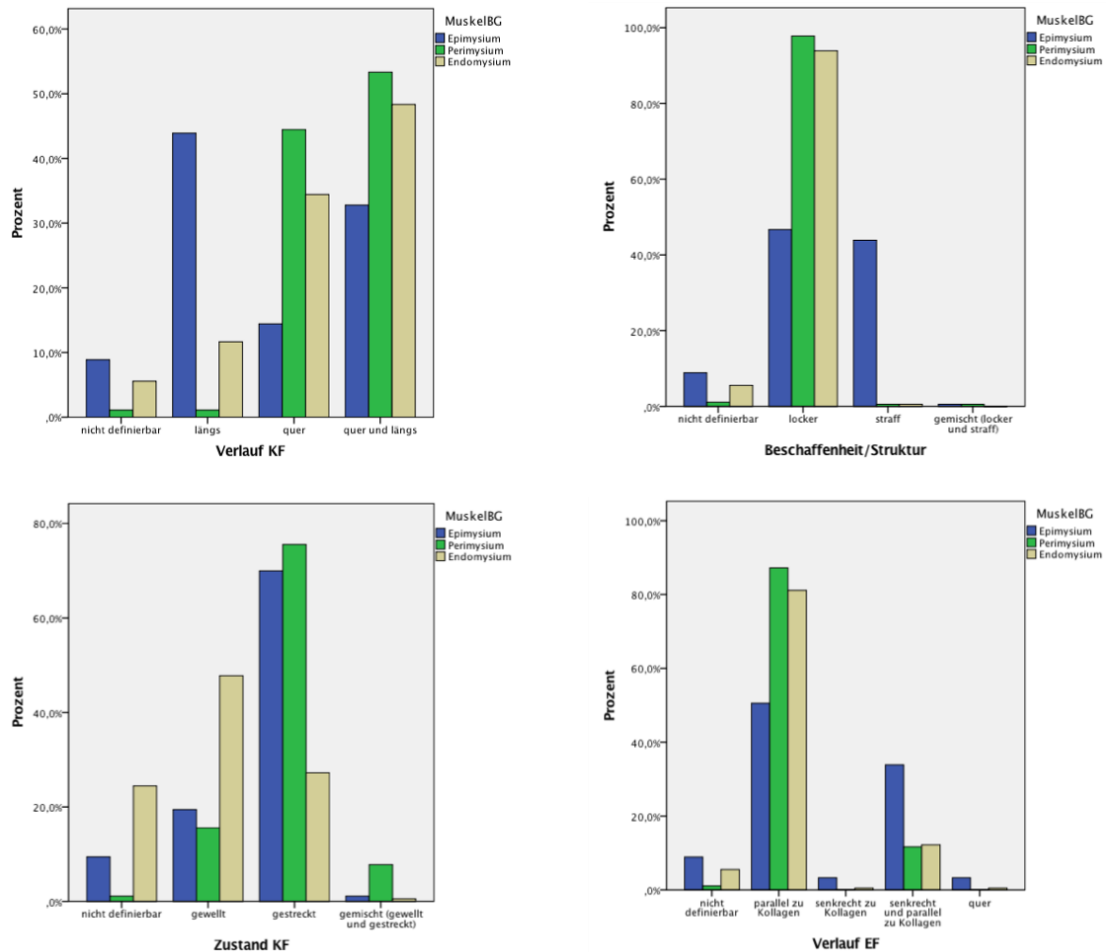


Abbildung 3.7: Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der *Mm. interossei dorsales*.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnscheiden

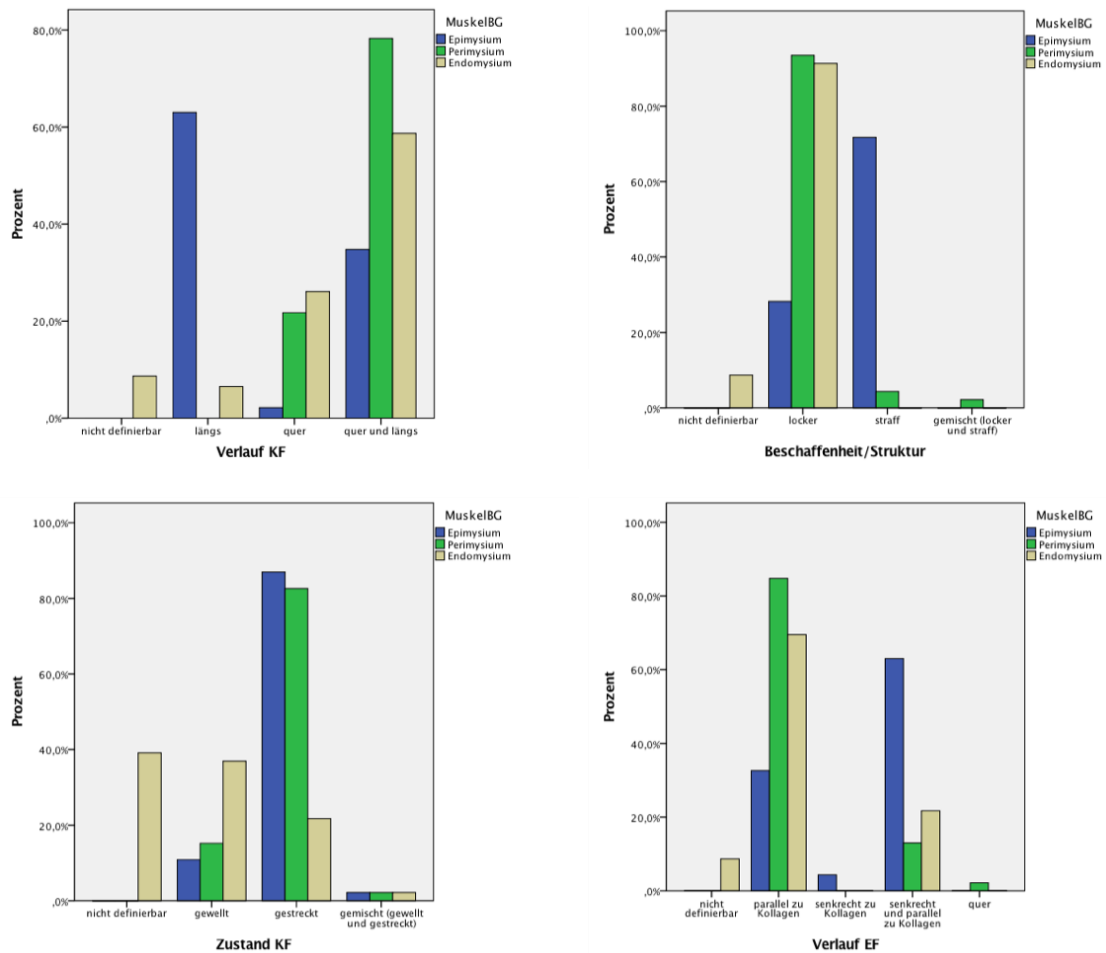


Abbildung 3.8: Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der *Mm. abductores digiti minimi*.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnscheiden

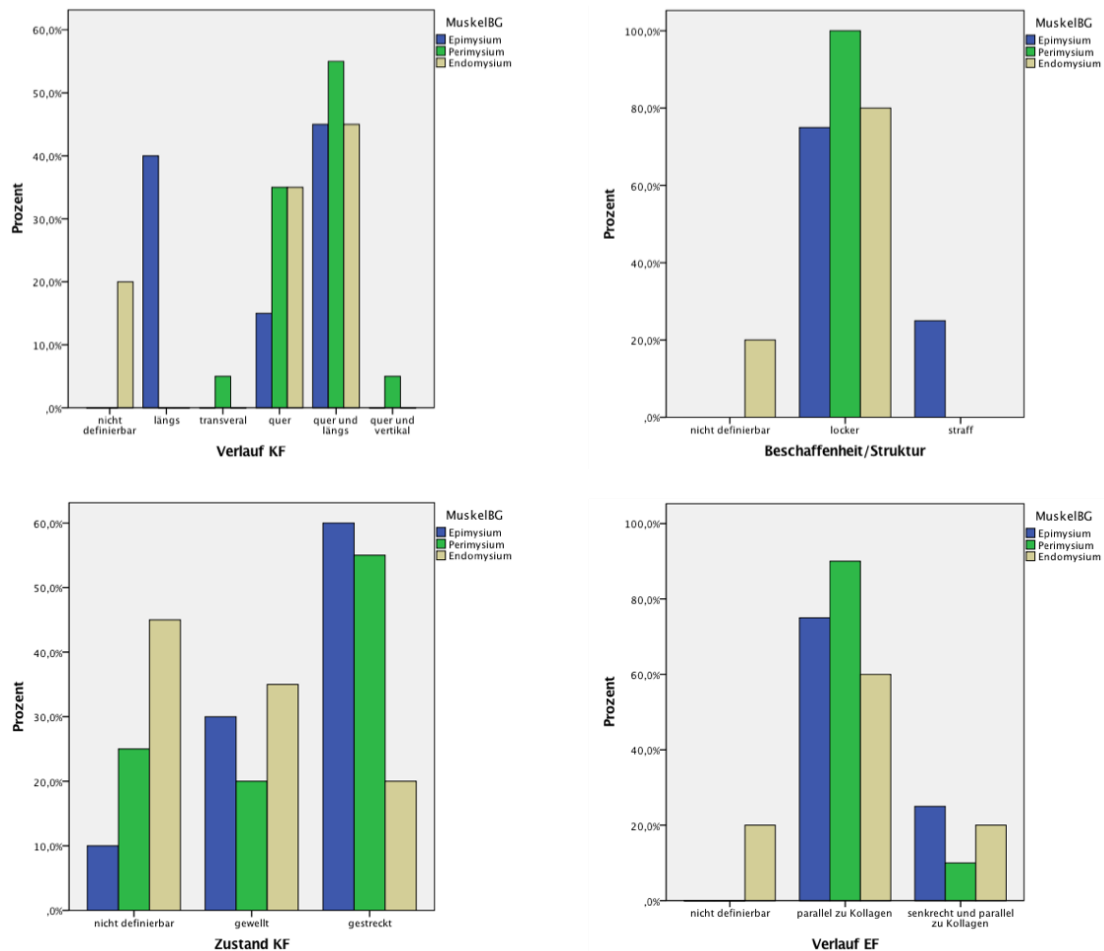


Abbildung 3.9: Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der *Mm. flexores digiti minimi breves*.

3.2.2 Grafische Darstellung der relativen Häufigkeiten der Fasercharakteristika für die einzelnen Bindegewebeeinheiten der einzelnen Ligamenten, Muskeln und Sehnscheiden

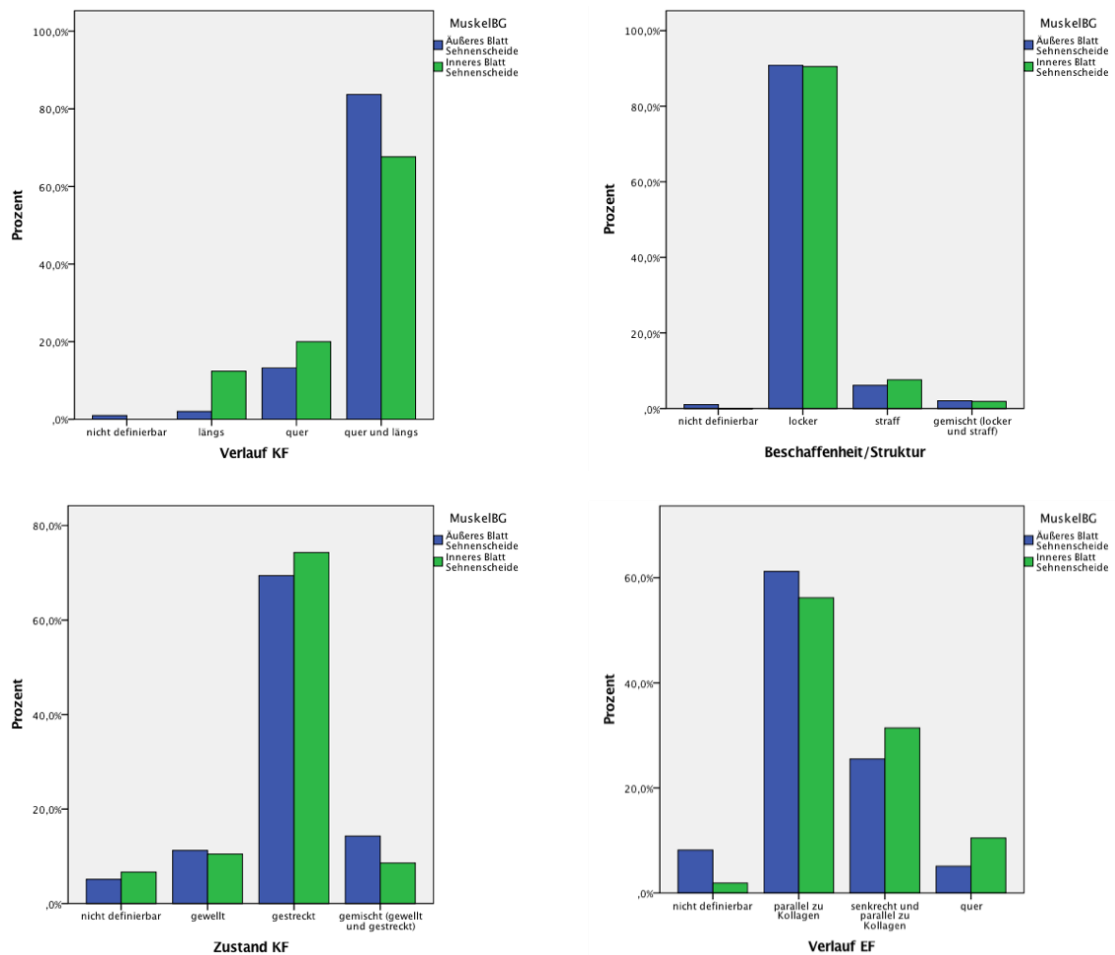


Abbildung 3.10: Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern im äußeren und inneren Blatt der Sehnscheiden der *Mm. flexores digitorum*.

KAPITEL 4

Diskussion

4.1 Einordnung in die funktionelle Anatomie

Die makroskopische Anatomie und Funktion der Sehnen, der Bänder und der Muskeln der MCP-Region sind bekannt, doch gibt es keine Studien zu dem Verlaufsmuster und Erscheinungsbild der Fasersysteme in diesen Strukturen. Diese Studie ist nach unserem Kenntnisstand die erste Arbeit welche sich mit den Fasersystemen dieser anatomischen Region so detailliert befasst.

In dieser Arbeit wurden die kollagenen Fasern in ihrem Verlauf, ihrer Beschaffenheit und Zustand, sowie die elastischen Fasern in ihrem Verlauf und ihrer Beziehung zu den kollagenen Fasern der MCP-Region lichtmikroskopisch ausgewertet. Es wurde die MCP-Region in 2 Ebenen (Ebene A: proximaler Beginn des *LMTP* und Ebene B: 5 mm distal des *LMTP*) analysiert. Dabei wurde die MCP-Region jeder Hand in 5 Regionen unterteilt und 12 Strukturen (die Bänder, Muskeln und Sehnen der MCP-Region erfassten) und deren Bindegewebeeinheiten untersucht.

Die statistische Auswertung der Daten und die graphische Darstellung der Ergebnisse in Balkendiagramme ermöglichten die Bestimmung von den am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für jede Region, Struktur und Bindegewebeeinheit, sodass nach diesen beschrieben werden konnte, wie sich beide Fasersysteme in den untersuchten Einheiten der MCP-Region verhalten. Somit können logische Schlussfolgerungen (s.u.) für die Einordnung der Fasersysteme in die funktionelle Bedeutung der MCP-Region gezogen werden.

4.1.1 Bandapparat der Metakarpophalangealregion 2. – 5.

Faserverlauf im Bandapparat

Es ist bekannt, dass Ligamente eine faserige Struktur aufweisen, die hierarchisch in Gruppen von parallel angeordneten Faserbündeln organisiert sind, die entlang der Faserachse

gelagert sind [75]. Diese Aussage konnte für die kollagenen und elastischen Fasern in jedem Band dieser Arbeit bestätigt werden. Beide Fasersysteme (elastische- und kollagene Fasern) lagern sich entlang der Faserachse an und verlaufen in den meisten Fällen „parallel“ zueinander. Somit kann man davon ausgehen, dass beide Fasersysteme als ein System agieren und sich in deren Funktion unterstützen und ergänzen. *Smeets et al.* entwickelten die Theorie, dass das Fehlen einer scheinbaren Organisation von kollagenen und elastischen Fasern in einer Struktur, auf ein geringes Potenzial dieser Struktur hindeutet, Zugbelastungen zu widerstehen [72]. In den verschiedenen Ligamenten dieser Dissertation, konnte eine hohe Organisation von kollagenen und elastischen Fasern beobachtet werden, was dafür spricht, dass die Ligamente in der MCP-Region Zugbelastungen und Kräften grundsätzlich entgegenwirken, um somit eine gelenksstabilisierende und schützende Funktion zu garantieren [75].

Die in dieser Dissertation beobachteten Verläufe der elastischen und kollagenen Fasern in den verschiedenen untersuchten Bändern der MCP-Region, stimmen mit deren zuvor beschriebenen (siehe Kapitel 1) makroskopischen Verläufen überein. Das *LMTP* spannt sich in radioulnarer Richtung aus und verbindet die Köpfe der Mittelhandknochen 2. – 5. und die *Ligg. palmaria* der MCP-Gelenke 2.-5. untereinander [1, 40, 69]. Dagegen verlaufen die *Ligg. collateralia* eher von dorsal nach palmar in Richtung *LMTP* und die *Legueu und Juvara Septen* eher nach palmar von dem *LMTP* aus [5, 21, 48, 69]. Wie erwartet, ergab sich in den Untersuchungen dieser Dissertation für das *LMTP* und den palmaren Platten am häufigsten ein „transversaler“ Verlauf der Fasern, während sich in den meisten Fällen für die *Ligg. collateralia* und den *Legueu und Juvara Septen* eher ein „vertikaler“ Verlauf der Fasern zeigte.

Gratzer et al. erläuterten 2001, dass die Streckbremse im Bereich der MCP-Gelenke von dem Zusammenwirken verschiedener Mechanismen und Strukturen gewährleistet wird. Sie beschrieben ein System zwischen den verschiedenen Strukturen und Ligamenten der MCP-Region, die dem Auffangen und der Verteilung der bei Überstreckung auftretenden Kräfte dienen. Eine große wirksame Kraft wird in viele kleine Komponenten zerlegt und einem festen Fundament zugeführt. Mit zunehmender Streckung werden zunehmend mehr Elemente der Streckbremse zugeschaltet, bis bei Endstellung alle Elemente ein hoch festes Komplex bilden [18].

Die Theorie von *Gratzer et al.* besagt, dass bei Überstreckung der Finger, die Streckkräfte über die *Fasciculi longitudinales* der Palmaraponeurose und deren Fortsetzungen in die Finger, über die *Legueu und Juvara Septen*, an die *Fasciculi metacarpaceles longitudinales profundi*, nach proximal weitergeleitet werden. Diese Kräfte werden anschließend an die Faszen der *Mm. interossei dorsales*, die Mittelhandknochen und den palmaren karpalen

Bandapparat weitergegeben. Das *LMTP* fungiert hier als ein Kraftverteiler [18].

Ein ähnlicher Kraftfluss erfolgt bei Überstreckung der MCP-Gelenke eine Ebene tiefer von der Fingergrundgliedbasis. Wirken Kräfte im Sinne einer Überstreckung auf einen MCP-Gelenk, werden diese zunächst auf die palmare Platte übertragen. Im Anschluss werden die Streckkräfte bilateral über die *Ligg. phalangoglenoidalia* und dem *Zancolli-Komplex* an das *LMTP* weitergeleitet, das dann in die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* mündet. Diese geben die Kräfte an den palmaren karpalen Bandapparat, an die Muskelfaszie der *Mm. interossei dorsales* und die Hypothenarmuskulatur weiter. Die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* lassen sich als gemeinsame mechanische Endstrecke zusammenfassen [18].

Die in dieser Dissertation beschriebenen Faserverläufe der verschiedenen Bänder, stimmen mit dem beschriebenen System und der Theorie von *Gratzer et al.* überein. Die Kräfte können in die Richtung, in die die kollagenen und elastischen Fasern verlaufen, an die Nachbarstrukturen weitergeleitet werden.

Der gemeinsame Knotenpunkt des *LMTP*, der palmaren Platte, des A1-Ringbandes, der *Ligg. collateralia* und des *Legueu und Juvara Septum* wird als *Zancolli-Komplex* beschrieben [69]. Die Fasern dieser Bänder verlaufen alle in Richtung oder vom *Zancolli-Komplex* hinweg, sodass der *Zancolli-Komplex* als Knotenpunkt der Kräfteverteilung beschrieben werden kann. Die Theorie von *Gratzer et al.*, das *LMTP* fungiert als ein Kraftverteiler, kann mit den gefundenen Ergebnissen auch bestätigt werden.

Die Bänder und Muskeln der MCP-Region zeigen direkte und indirekte Verbindungen untereinander, z.B. zeigt das *LMTP* Verbindungen zu den A1- Ringbändern, den *Mm. interossei dorsales*, den *Mm. abductores digiti minimi*, den *Mm. flexores digiti minimi breves*, sowie Verbindungen zu anderen Ligamenten in dieser Region, wie die *Ligg. collateralia*, den *Legueu und Juvara Septen* und den palmaren Platten. [1, 5, 40, 69]. Es kann diskutiert werden, dass die Muskeln und Ligamente der MCP-Region eine Einheit bilden und zusammen für die Kräfteverteilung der bei Überstreckung der Finger entstandenen Kräften und somit für den Schutz der Gelenke und Strukturen in dieser Region eine große Rolle spielen. Die beschriebenen Faserverläufe in den verschiedenen Ligamenten können diese Theorie auch bestätigen.

Entstehen bei Überstreckung eines Fingers Kräfte z.B. im Bereich der MCP-Gelenken, können diese, in Richtung der Faserverläufe, über die palmaren Platten, anschließend bilateral über die *Ligg. collateralia*, den *Legueu und Juvara Septen* und den *Zancolli-Komplex* an das *LMTP*, in die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* zu dem restlichen Bandapparat und Muskeln dieser Region weitergeleitet werden. Somit kann eine Kraftverteilung gewährleistet und einer Überstreckung sowie unphysiologischen Bewegungen der Finger entgegengewirkt werden.

Es kann diskutiert werden, dass dieses „Gerüst“ aus Bändern, Muskeln und Sehnen, nicht nur für die Verteilung und Weiterleitung der Kräfte eine Rolle spielt, sondern auch eine große Funktion in der Propriozeption dieser Region aufweist. In verschiedenen Studien wurden um Ligamenten des menschlichen Körpers (z.B. an den Extremitätsgelenken und der Wirbelsäule) Mechanorezeptoren beschrieben, die auf einen besonderen Stellenwert dieser Strukturen in der sensorischen Aufgabe und der Wahrnehmung der Gelenkstellung, sowie auf die ligamentär-muskuläre-Reflexaktivierung/-inhibierung hindeuten [8, 14, 20, 22, 27, 57, 58, 60, 71, 75, 76, 92, 93, 96]. In der Studie 5202 des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität zeigten sich Mechanorezeptoren entlang der verschiedenen Ligamenten der MCP-Region. Hier stellte sich heraus, dass häufig *Ruffini*-Körperchen entlang des *LMTP* und der *Ligg. collateralia*, sowie häufig *Vater-Pacini*-Körperchen entlang der palmaren Platten und des *LMTP* (am häufigsten palmar gelegen), aber auch Mechanorezeptoren am restlichen Bandapparat der MCP-Region zu finden waren, sodass die zuvor beschriebene Theorie hiermit bestätigt werden kann [11]. Es kann diskutiert werden, dass Veränderungen von Vibrationen, Beschleunigungen, Druck, Dehnungen, Geschwindigkeiten, Bewegungen, genauso wie die entstandenen Kräfte bei Überstreckung, in Richtung der Faserverläufe weitergeleitet, verteilt und von den verschiedenen Mechanorezeptoren entlang der Bänder unterschiedlich stark wahrgenommen werden und somit eine gezielte Antwort erzeugt werden kann.

Beschaffenheit der kollagenen Fasern

Wie auch in vergangenen Studien beschrieben zeigen alle untersuchten Ligamente in der MCP-Region in den meisten Fällen ein straffes Bindegewebe, das mit der Hauptfunktion der Bänder: Gelenkstabilisierung, sowie das Entgegenwirken von Belastungen und unphysiologischen Bewegungen übereinstimmt [13, 75].

Doch könnte man dem „straffen“ kollagenen Fasern mehr als nur eine schützende und stabilisierende Funktion zuschreiben. Es ist bekannt, dass je dicht gepackter eine Struktur ist, desto schneller und besser kann diese Schwingungen weiterleiten. Somit kann die Theorie aufgestellt werden, dass „straffe“ (dicht gepackte) und „parallel“ verlaufende Fasern Kräfte schneller, besser und gezielter entlang der Faserachse eines Ligaments weiterleiten und somit eine optimale und schnelle Kraftverteilung zwischen den Ligamenten der MCP-Region gewährleisten. Die selbe Theorie kann für die Weiterleitung der propriozeptiven Veränderungen entlang der Ligamenten angenommen werden. Entstehen kleine Veränderungen entlang der Ligamente, können diese besser, schneller und gezielter weitergeleitet werden und somit von den verschiedenen Mechanorezeptoren in den verschiedenen Ligamenten

und Strukturen dieser Region präziser und schneller wahrgenommen werden, um somit eine optimale gezielte Antwort zu gewährleisten.

Zustand der kollagenen Fasern

Es ist bekannt, dass parallel angeordnete elastische Fasern zu den kollagenen Fasern, diese in eine gewellte Form bringen und somit eine größere Längenveränderung des kollagenen Fasersystems ermöglichen [23, 52]. In allen untersuchten Bändern dieser Arbeit konnten elastische Fasern nachgewiesen werden, die in den meisten Fällen „parallel“ zu den kollagenen Fasern verliefen.

In den *Ligg. collateralia* und den palmaren Platten haben die kollagenen Fasern in den meisten Fällen eine „gestreckte“ Form angenommen. Doch sind in beiden Fällen „gemischte“ (gewellte und gestreckte) kollagene Fasern am 2. häufigsten zu finden, sodass bestätigt werden kann, dass in vielen Fällen auch „gewellte“ kollagene Fasern vorhanden sind. In den *Legueu und Juvara Septen* sind „gestreckte“ und „gemischte“ und in den *LMTP* am häufigsten „gestreckte“ und „gewellte“ Kollagenfasern gleich häufig zu finden. Daher kann man davon ausgehen, dass in diesen Ligamenten häufiger „gewellte“ kollagene Fasern zu finden sind als in den *Ligg. collateralia* und den palmaren Platten.

Ursache für die oben genannten Ergebnisse in dieser Dissertation könnten folgende sein:

- Der Zustand der Bänder (gestreckt oder nicht) bei dem Fixierungsvorgang ist nicht bekannt. Wenn ein Ligament gestreckt wird, werden die Fasern gestreckt und daher eher gestreckt unter dem Lichtmikroskop wahrgenommen.
- Es können Fixierungsartefakte zustande gekommen sein.
- Es kann die Vermutung aufgestellt werden, dass Ligamente aus Bündeln von alleinverlaufenden kollagenen Fasern, sowie aus Bündeln von gemeinsam verlaufenden kollagenen- und elastischen Fasern bestehen.

Sicher kann aber bestätigt werden, dass die „gewellten“ kollagenen Fasern die in den Ligamenten zu sehen waren, auch durch elastische Fasern durchsetzt waren [23, 52]. Im Gegenteil, kann man nicht mit 100% Sicherheit sagen, dass sich im Verlauf der „gestreckten“ kollagenen Fasern auch elastische Fasern befinden, da sich die Auflösung des verwendeten Lichtmikroskops für diese genaue Aussage nicht eignet. Um die Durchsetzung der kollagenen Fasern mit elastischen Fasern und deren Struktur genau bestimmen zu können, müssten zusätzliche anatomische Untersuchungen durchgeführt werden.

Es ist bekannt, dass das *LMTP* das Auseinanderweichen der *Metakarpalia* limitiert und eine Rolle in der Stabilisierung des queren Mittelhandbogens und der Bestimmung der

Grifffestigkeit spielt [10, 40]. Den *Legueu und Juvara Septen* wird eher eine trennende Funktion sowie eine schützende Funktion der Gefäß-Nerven-Bündeln in deren benachbarten Kompartimenten zugeschrieben [5]. Das *LMTP* und die *Legueu und Juvara Septen* zeigen einen häufigeren „gewellten“ Verlauf der kollagenen Fasern, im Vergleich zu den *Ligg. collateralia* und den palmaren Platten. Dieses könnten für eine eher dynamische Funktion des *LMTP* und der *Legueu und Juvara Septen* sprechen. Die *Legueu und Juvara Septen* befinden sich im palmaren Bereich der MCP-Region, wo palmare Veränderungen (Vibrationen und Drücke) beim Greifen von Gegenständen zustanden kommen [11]. Beide Bänder spannen sich in Regionen auf, die von vielen kleinen Formveränderungen beeinflusst werden, weswegen der häufigere „gewellte“ Zustand der kollagenen Fasern in diesen Bänder für das Gewährleisten einer besseren Verformbarkeit dieser Ligamente sprechen könnte, um somit präzisere Formveränderungen für das genauere Greifen von Gegenständen und die Regulierung feinerer Bewegungen der Finger zu garantieren.

Den palmaren Platten wird eher eine schützende und stabilisierende Funktion zugeschrieben; sie verstärken die Kapsel der MCP-Gelenke, verhindern eine Hyperextension der Finger und gewährleisten den A1-Ringbändern, den Sehnen der langen Fingerflexoren und den MCP-Gelenken Schutz [18, 78]. Das Kollateralbandkomplex begrenzt die Extension der Finger und ist für die Fixierung der palmaren Platten und der A1-Ringbänder zuständig [78]. Beiden Ligamenten kann somit eher eine mechanische, stabilisierende und schützende Funktion zugeschrieben werden. Sie müssen eher starken, großen und schnellen Zugkräften, wie Hyperextension, entgegenwirken. Somit wäre in diesen Ligamenten eher eine rigide Form der kollagenen Fasern zu erwarten, die von dem eher „gestreckten“ Verlauf der kollagenen Fasern gewährleistet werden kann.

4.1.2 Muskeln der Metakarpophalangealregion 2. – 5.

Faserverlauf

Das Muskelbindegewebe wird in drei Regionen eingeteilt: das Endomysium (umhüllt die einzelnen Muskelfasern), das Perimysium (umhüllt eine Gruppe von Muskelfasern) und das Epimysium (umhüllt den gesamten Muskel) [47, 68]. Es wurde in vergangenen Studien belegt, dass alle Fasern in und zwischen diesen drei Schichten miteinander ein dreidimensionales Netzwerk und somit eine funktionelle Einheit bilden, die in transversaler und longitudinaler Richtung im gesamten Muskel miteinander verbunden sind. Zusätzlich zeigt dieses System Verbindungen zu den Muskelfasern, den Sehnen und anderen Faszienstrukturen auf. Dieser dreidimensionale Aufbau spielt bei den mechanischen Eigenschaften des Muskels eine große Rolle [19, 24, 26, 47, 61, 66, 68, 79, 80, 86]. Er gewährleistet die bessere Verformung der Muskelfasern und des Muskelgewebes bei Kontraktion und Relaxation,

spielt in der Weiterleitung und Verteilung der Kontraktionskräfte eine Rolle und gewährleistet das Gleiten des Muskelgewebes bei Formänderungen [25, 46, 55, 62, 64, 68, 80].

In allen myofaszialen Strukturen der *Mm. lumbricales*, *Mm. interossei dorsales*, *Mm. flexores digiti minimi breves* und im Perimysium und Endomysium der *Mm. abductores digiti minimi* wurden elastische Fasern gesichtet, die in den meisten Fällen „parallel“ zu den kollagenen Fasern verliefen. Im Falle des Epimysiums der *Mm. abductores digiti minimi* konnten am häufigsten „parallel und senkrecht“ verlaufende elastische Fasern zu den kollagenen Fasern beobachtet werden. D.h. in den meisten Fällen verlaufen die elastischen Fasern mit den kollagenen Fasern zusammen und beeinflussen und unterstützen sich gegenseitig in ihrer Funktion.

Im Perimysium und Endomysium der *Mm. interossei dorsales* und der *Mm. abductores digiti minimi*, in allen Bindegewebeeinheiten der *Mm. flexores digiti minimi breves* und im Endomysium der *Mm. lumbricales* wurden „quer und längs“ verlaufende Fasern am häufigsten beobachtet, was die Theorie eines dreidimensionalen Fasernetzwerks in den Bindegewebeeinheiten der Muskeln bestätigt. Doch muss im Falle des Epimysiums der *Mm. interossei dorsales*, *Mm. abductores digiti minimi* und *Mm. lumbricales* diese Theorie widerlegt werden. In allen Fällen wurde im Epimysium eher ein „zirkulärer“ Verlauf (um die Muskelachse herum) beider Fasersysteme nachgewiesen.

Zirkulärer Verlauf der Fasersystemen im Epimysium

Da bekannt ist, dass elastische Fasern dem Gewebe Elastizität und Resilienz verleihen [39], kann der zirkuläre Verlauf dieser Fasern im Epimysium dafür sprechen, dass die Fasern als elastischer Widerstand gegen Volumenzunahmen oder Formveränderungen des Muskelbauchs bei Kontraktion agieren. Zusätzlich kann die Theorie erstellt werden, dass sie den Muskel in seinem Relaxationsvorgang unterstützen, indem sie den Muskel nach seiner Kontraktion passiv in deren Ursprungsform bringen. Dieser Mechanismus spart Energie, gewährleistet eine erhöhte Kraft bei einem erneuten Kontraktionsvorgang und unterstützt die Antagonisten dieser Muskeln in ihrer Funktion.

Wang et. al schreiben den *Mm. lumbricales* nur eine schwache motorische Funktion und viel mehr eine sensorische und propriozeptive Funktion zu [85]. Eine hohe nachgewiesene Dichte an Muskelspindeln in den ersten zwei Lumbrikalmuskeln und deren konstante Anatomie sprechen für eine große Rolle dieser Muskeln bei dem präzisen Pinzettengriff [85]. Zusätzlich wurde in der Studiennummer 5202 des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität eine hohe Anzahl an Muskelspindeln, sowie *Vater-Pacini*-Körperchen in und um diese Muskeln gefunden [11]. Den *Mm. abductores digiti minimi* und den *Mm. interossei dorsales* wird dagegen eher eine motorische Funktion zugeschrieben. Die *Mm.*

interossei dorsales sind hauptsächlich für die Streckung der Zwischenfingerelken, bei gebeugten Grundgelenken zuständig [69]. Der *M. abductor digiti minimi* ist dagegen eher für die Flexion des Grundgelenks, der Extension des Mittel- und Endgelenks und die Abduktion des 5. Fingers zuständig [10]. In der Studiennummer 5202 des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität wurden in und um diese zwei Muskeln Mechanorezeptoren nachgewiesen. In der Umgebung der *Mm. interossei dorsales* wurden häufig *Ruffini*-Körperchen und in der Umgebung der *Mm. abductores digiti minimi* und den *Mm. lumbricales* zusätzlich noch *Vater-Pacini*-Körperchen gefunden. Muskelspindeln wurden in allen drei Muskeln bewiesen [11]. Diese Kenntnis zufolge, spricht der zirkuläre Verlauf der elastischen Fasersysteme im Epimysium für die propriozeptive und sensorischen Eigenschaften dieser Muskeln. Kontrahiert sich ein Muskel, steigt die Spannung im Muskelgewebe an und Formveränderungen können entstehen. Der zirkuläre Faserverlauf um die Muskelachse herum kann diesen Formveränderungen und Spannungsveränderungen entgegenwirken und somit den Muskel mit geringerem Energieverlust in dessen Ursprungsform bringen. Die elastischen Fasern können zusätzlich noch, abhängig von der zuvor generierten Kontraktionsgeschwindigkeit und -kraft, die Relaxation des Muskels beschleunigen, um somit raschere Formveränderungen und Druckveränderungen zu gewährleisten. Die in diesem Prozess entstandenen Vibrationen, Form- und Geschwindigkeitsveränderungen, sowie Bewegungen können besser und präziser von den Mechanorezeptoren wahrgenommen werden. Durch das raschere Zurückführen der Mechanorezeptoren (z.B. die Muskelspindeln) in deren Ursprungsform können in kürzeren Zeitabständen erneute Veränderungen von den Mechanorezeptoren wahrgenommen werden.

Der „parallele“ Verlauf der kollagenen Fasern zu den elastischen Fasern schützt die kollagenen Fasern gegen Überdehnung und somit gegen deren Reißen.

Querer Verlauf der Fasersysteme im Perimysium der *Mm. lumbricales*

Im Perimysium der *Mm. lumbricales* wurde in dieser Studie am häufigsten ein „querer“ Verlauf der elastischen- und kollagenen Fasern beschrieben. Dieser Verlauf der Fasern widerspricht den zuvor beschriebenen Theorien eines netzwerkartigen Faseraufbaus im Perimysium [68]. Es sollte aber davon ausgegangen werden, dass die meisten Muskeln im menschlichen Körper auch eher eine motorische Funktion aufweisen und diesem netzwerkartigen Aufbau der myofazialen Strukturen eher eine Funktion der Kräfteverteilung und -weiterleitung zugeschrieben wird [26, 54, 55, 68, 80, 86]. Wie zuvor erwähnt, wird den *Mm. lumbricales* nur eine schwache motorische Funktion und viel mehr eine sensorische und propriozeptive Funktion zugeschrieben [85]. Der „quere“ Faserverlauf (parallel zu den extrafusalen und intrafusalen Fasern der Muskelspindeln) bestätigt diese Theorie.

Muskelspindeln nehmen Dehnungsveränderungen der Muskeln wahr, messen die Geschwindigkeit der Kontraktionsveränderungen sowie den Tonus der Muskulatur bzw. deren Spannung und nehmen eine plötzliche Bewegung des Muskels wahr [11, 15]. Kontrahiert sich ein Muskel, dehnen sich die intrafusalen Fasern der Muskelspindeln [11, 44, 85, 88]. Diese können bei Wahrnehmung einer Veränderung eines Muskels, den Muskeltonus des gleichen erhöhen [11, 29].

Muskeln können sich in ihrer Gesamtheit differenziert kontrahieren, d.h. es können sich Abschnitte eines Muskels kontrahieren, während andere entspannt bleiben. Entstehen Längenveränderungen entlang der Muskelfasern (somit auch Spannungsveränderungen im Muskel), entstehen auch Längenveränderungen entlang der „parallel“ verlaufenden elastische Fasern bzw. kollagenen Fasern zu den Muskelfasern. Wie zuvor erwähnt, verleihen elastische Fasern den Geweben Elastizität und Resilienz [39], weswegen diskutiert werden kann, dass wenn sich ein Abschnitt eines Muskels kontrahiert, sich in diesen Abschnitt die elastischen Fasern zusammen mit den Muskelfasern zusammenziehen, während sie sich im relaxierten Abschnitt, dehnen. Nimmt die Spannung im kontrahierten Abschnitt ab, können die elastische Fasern den Entspannungsvorgang in beiden Abschnitten des Muskels unterstützen und somit erleichtern, um den Muskel in dessen Ursprungsform zu bringen. Die elastischen Fasern können Längenveränderungen und Spannungsveränderungen im Muskel entgegenwirken bzw. unterstützen, um den Muskel mit weniger Energieverbrauch, rascher in dessen Ursprungsform zu bringen. Somit kann die präzisere Wahrnehmung von kleineren Längen-, Spannungsveränderungen und plötzliche Bewegungen in den Muskelspindeln gewährleistet werden. Durch das raschere Zurückführen der Muskelspindeln in deren Ursprungsform, können zusätzlich, in kürzeren Zeitabständen, erneute Veränderungen in diesen Mechanorezeptoren wahrgenommen werden.

Zusätzlich sind für die *Mm. lumbricales* keine Gegenspieler bekannt. Der „zirkuläre“ Verlauf der elastischen Fasern im Epimysium und der „quere“ Verlauf im Perimysium, könnte die Funktion eines Antagonisten übernehmen und somit die *Mm. lumbricales* passiv in deren relaxierten Ursprungsform bringen. Dieses könnte eine Erklärung für das Fehlen von Gegenspielern für die *Mm. lumbricales* darstellen.

Beschaffenheit und Zustand der kollagenen Fasern

Im Perimysium und Endomysium der *Mm. lumbricales* und *Mm. abductores digiti minimi* und in allen Bindegewebeeinheiten der *Mm. interossei dorsales* und *Mm. flexores digiti minimi breves* wurde ein „lockerer“ Faserverlauf der kollagenen Fasern beobachtet. Dieses stimmt mit zuvor durchgeführten Studien überein [19, 37, 44, 51, 56, 80]. Dagegen wurde im Epimysium der *Mm. lumbricales* und *Mm. abductores digiti minimi* eher „straffe“ kol-

lagene Fasern am häufigsten beobachtet.

In den meisten myofaszialen Strukturen der untersuchten Muskeln in dieser Dissertation (mit Ausnahme des Epimysiums der *Mm. abductores digiti minimi*) wurden „parallel“ verlaufende elastische Fasern zu den kollagenen Fasern am häufigsten nachgewiesen. In allen myofaszialen Strukturen wurden elastische Fasern beobachtet. Es ist bekannt, dass parallel angeordnete elastische Fasern zu den kollagenen Fasern, diese in eine gewellte Form bringen und somit eine größere Längenveränderung des kollagenen Fasersystems ermöglichen [23, 52]. In vorherigen Studien wurden gewellte kollagene Fasern in allen myofaszialen Strukturen der Muskeln nachgewiesen [19, 51, 68, 80].

Im Epimysium und Perimysium der *Mm. lumbricales*, *Mm. interossei dorsales*, *Mm. abductores digiti minimi* und *Mm. flexores digiti minimi breves* wurden in den häufigsten untersuchten Fällen in dieser Arbeit aber eher „gestreckte“ Fasern beobachtet, was der zuvor beschriebenen Theorie widerspricht. Da der Zustand der Muskeln (kontrahiert oder relaxiert) bei dem Fixierungsvorgang nicht bekannt war und die Fasern bei einem gestreckten Zustand des Muskels eher eine gestreckte Form annehmen, könnte dieses eine Ursache für die in dieser Arbeit beschriebenen Ergebnisse darstellen. Eine weitere Ursache könnten Fixierungsartefakte sein. Im Endomysium der *Mm. lumbricales*, *Mm. abductores digiti minimi* und *Mm. flexores digiti minimi breves* waren dagegen am häufigsten „nicht eindeutig definierbare“ elastische Fasern zu finden. Doch konnten in allen drei Fällen am zweithäufigsten „gewellte“ Fasern definiert werden und in den *Mm. interossei dorsales* sogar am häufigsten. Diese Ergebnisse stimmen mit zuvor durchgeführten Studien in Muskeln überein [19, 51, 68, 80]. In vielen Präparaten war die Bestimmung der Struktur der kollagenen Fasern im Endomysium mit dem angewendeten Lichtmikroskop sehr schwierig und kaum zu definieren. Die Muskelfasern waren häufig zu dicht aneinander, um die kollagenen Fasern optimal sehen zu können, weswegen sie mit der Aussage „nicht eindeutig definierbar“ bestimmt worden sind.

Sicher kann aber gesagt werden, dass da wo auch „gewellte“ kollagene Fasern zu sehen waren, diese auch mit elastischen Fasern durchsetzt waren [23]. Im Gegenteil, kann nicht mit 100% Sicherheit bestätigt werden, dass sich zwischen den „gestreckten“ kollagenen Fasern auch elastischen Fasern befanden, da sich die Auflösung des angewendeten Lichtmikroskops für diese genaue Aussage nicht eignet. Es lassen sich zukünftige weitere anatomische Studien für den Erhalt weiterer Informationen für den Zustand der kollagenen Fasern in den zuvor beschriebenen Strukturen empfehlen.

4.1.3 Fasercharakteristika in den Sehnenscheiden der langen Fingerflexoren

Es wurden nur wenige Studien zu dem mikroskopischen Aufbau der Sehnenscheiden der langen Fingerbeuger durchgeführt. Es ist aber bekannt, dass die Sehnenscheide der langen Fingerbeuger aus einer ununterbrochenen synovialen Membran, die aus einem parietalen (äußeren) und einem viszeralem (inneren) Blatt besteht. Beide Blätter stützen sich auf eine lamellare Kollagenschicht [9].

In dieser Arbeit wurde nur auf die stützende lamelläre Kollagenschicht beider Blätter geschaut. Bei beiden Blättern war ein ähnlicher Aufbau zu finden. In den meisten Fällen bestanden beide Blätter aus „quer und längs“ verlaufenden, sowie „locker“ angeordneten und „gestreckten“ kollagenen Fasern. Die elastischen Fasern waren in den meisten Fällen „parallel“ angeordnet zu den kollagenen Fasern. *Cohen et al.* beschreiben eher einen lamellären Aufbau dieser Schichten, während in dieser Studie eher von einem „netzwerkartigen“ Aufbau dieser Strukturen auszugehen ist. Doch führten *Cohen et al.* elektronenmikroskopische Untersuchungen durch, während in dieser Studie nur lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt worden sind, weswegen sich zukünftige weitere anatomische Studien für den Erhalt weiterer Informationen zu den Fasersystemen in den Sehnenscheiden der langen Fingerflexoren empfehlen lassen.

4.2 Limitierung der Studie

Körperspenden

Das Durchschnittsalter des Todes der Körperspenden im Institut für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität befindet sich in einem hohen Bereich, weswegen die Körperspender in dieser Studie zum Zeitpunkt ihres Todes sich in einem Alter zwischen dem 60. und 94. Lebensjahr befanden, mit einem Durchschnittsalter von 83 Jahren. Es ist bekannt, dass elastische und kollagene Fasern Veränderungen mit dem Alter aufweisen [3]. In wie weit das Alter einen Einfluss in die Fasersysteme der MCP-Region haben könnte, ist nicht bekannt. Es lassen sich zukünftige weitere anatomische Studien bei jüngeren Körperspenden empfehlen.

Histologie

Die histologische Aufarbeitung der Proben kann zu Fixierungs-, Schrumpf-, Schnitt- und Färbeartefakte führen.

Für die Anfärbung der Präparate nach der *EvG*-Methode wurde ein modifiziertes Protokoll nach dem Romeis angewendet. Diese Färbung ist geeignet, da man elastische Fa-

sern gut von den kollagenen Fasern durch Farbunterschiede, lichtmikroskopisch definieren und unterscheiden kann und somit gut den Verlauf und den Bezug beider Fasersysteme zueinander definieren kann. In dieser Färbemethode stellen sich die elastischen Fasern dunkel-violett und die kollagenen Fasern rot dar.

Für die Methodenkontrolle der zuvor angefärbten Feinschnitte nach der *EvG*-Methode erfolgte die immunhistochemische Färbung für Elastin von drei verblindet ausgewählten Präparaten (nach eigenem Protokoll des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf). Als Ergebnis stellte sich das elastinreiche Gewebe rot-rosa und das elastinarme Gewebe blau-grau dar. Der eingesetzte Antikörper ((BA-4): sc-58756, SANTA CRUZ BIOTECHNOLOGY, INC) ist nur gegen alpha-Elastin gerichtet. Die *EvG*-Färbung lässt nicht zwischen verschiedenen Elastinarten unterscheiden, weswegen in dieser Arbeit die Definition der verschiedenen Elastinarten nicht möglich ist, aber auch nicht Ziel dieser Arbeit war.

In dieser Arbeit wurden die kollagenen Fasern in ihrem Verlauf, Beschaffenheit und Zustand kategorisiert und ausgewertet. Die elastischen Fasern wurden in ihrem Verlauf und ihrer Beziehung zu den kollagenen Fasern untersucht.

Da der Zustand der Muskeln und der Bänder (gestreckt oder nicht) bei dem Fixierungsvorgang nicht bekannt war, können die Fasern bei einem gestreckten Zustand des Muskels/Bands eher eine gestreckten und bei einem verkürzten Zustand des Muskels/Band, eher einen gewellten Zustand annehmen und Einfluss auf die Auswertung und Richtigkeit der Ergebnisse dieser Arbeit haben. Zusätzlich waren häufig die Fasersysteme im Endomysium der verschiedenen Muskeln nicht eindeutig zu definieren. Ursache war häufig, die zu dicht aneinander liegenden Muskelfasern. Die Auflösung des angewendeten Lichtmikroskops war für eine genaue Aussage in diesen Fällen nicht geeignet. Es lassen sich zukünftige weitere anatomische Studien in diesem Bereich empfehlen.

Statistik

Um die Verlässlichkeit der statistischen Tests zu garantieren und signifikante Ergebnisse zu erzielen, muss die Größe der Stichproben geeignet sein. In dieser Arbeit wurden insgesamt 240 Präparate ausgewertet, jede Region war jeweils 48 Mal (jeweils einmal für Ebene A und Ebene B) vorhanden. In den Regionen wurden insgesamt ca. 12 Strukturen betrachtet. Dabei wurden insgesamt 6 Bindegewebeeinheiten untersucht. Es konnten 17 verschiedene Fasercharakteristika erfasst werden die Verlauf, Beschaffenheit und Zustand der Kollagenfasern sowie Verlauf und Beziehung der elastischen Fasern zu den Kollagenfasern abbildeten (siehe Kapitel 2). Dazu wurden 24.564 Einzelwerte erhoben. In allen Fällen war die Stichprobengröße für das Erzielen von verlässlichen Ergebnissen der statistischen Tests ausreichend. In einigen Fällen waren die Strukturen oder Bindegewebeeinheiten in

den verschiedenen Präparaten nicht zu finden oder schwer zu definieren.

Die Auswertung der Körperspenden hinsichtlich des Alters wurde nicht für sinnvoll gehalten, da die Altersspanne der Körperspender zu klein war. Es wurden die Zusammenhänge hinsichtlich des Geschlechts, der Seiten und der Ebenen gesucht.

4.3 Schlussfolgerung

Die makroskopische Anatomie und die Funktion der Sehnen, Bänder und Muskeln der MCP-Region sind bekannt, doch gibt es keine Studien zu dem Verlaufsmuster und Erscheinungsbild der Fasersysteme in diesen Strukturen. Ziel dieser Arbeit war es, die Faserarchitektur dieser Strukturen und deren Einordnung in der funktionellen Bedeutung der MCP-Region zu definieren.

Die von *Gratzer et al.* erläuterte Theorie, dass die Streckbremse im Bereich der MCP-Gelenke von dem Zusammenwirken verschiedener Strukturen, die hauptsächlich die Muskeln und Bänder der MCP-Region beinhalten, gewährleistet wird und diese ein Gerüst bilden, die dem Auffangen und der Verteilung der bei Überstreckung auftretenden Kräften in kleinere Komponenten dienen, stimmen mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein [18]. Die Bänder und Muskeln der MCP-Region zeigen direkte und indirekte Verbindungen untereinander, sowie Verbindungen zu Nachbarstrukturen, wie der Haut, den MCP-Knochen, dem Kapselbandapparat, den MCP-Gelenken und der Palmaraponeurose [1, 5, 40, 69]. Es kann diskutiert werden, dass die Muskeln und Ligamente der MCP-Region eine Einheit bilden und zusammen für die Kräfteverteilung und -weiterleitung bei z.B. Überstreckung der Finger eine Rolle spielen. Zusätzlich kann diskutiert werden, dass dieses „Gerüst“ eine wichtige Rolle in der Wahrnehmung von propriozeptiven Veränderungen dieser Region spielt. In der Studiennummer 5202 des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität wurde an bzw. in den Ligamenten und Muskeln der MCP-Region auch Mechanorezeptoren beschrieben [11].

Propriozeptive Veränderungen und entstandene Kräfte können entlang der Fasern in Richtung Faserverlauf der Ligamente weitergeleitet und verteilt werden, um eine optimale Antwort für den Schutz der Gelenke bei Überstreckung oder unphysiologischen Bewegungen der Finger zu gewährleisten.

Als gemeinsamer Knotenpunkt dieses Systems wird in dieser Arbeit der *Zancolli-Komplex* definiert, da die Fasern von den in dieser Arbeit untersuchten Ligamenten (*LMTP*, *pal-mare Platten*, *Ligg. collateralia* und *Legueu und Juvara Septen*) in Richtung oder von diesem Knotenpunkt hinweg verlaufen. Der *Zancolli-Komplex* könnte für das Zusammen-treffen der Kräfte und der propriozeptiven Veränderungen und für die anschließende Verteilung dieser Veränderungen, eine Rolle spielen. Von *Gratzer et al.* wurde das *LMTP* als

der Kraftverteiler dieses Systems beschrieben [18]. Somit gehen wir davon aus, dass das *LMTP* und der *Zancolli-Komplex* für die Kräfteverteilung bei Überstreckung der Finger, sowie für die Verteilung der propriozeptiven Veränderungen in der MCP-Region zuständig sind.

In vergangenen Studien wurde belegt, dass alle Fasersysteme im Muskelbindegewebe miteinander ein dreidimensionales Netzwerk und somit eine funktionelle Einheit bilden, die in transversaler und longitudinaler Richtung, im gesamten Muskel miteinander verbunden sind und Verbindungen zu den Muskelfasern, den Sehnen und anderen Faszienstrukturen aufweisen [19, 24, 26, 47, 61, 66, 68, 79, 80, 86]. Diesem netzwerkartigen Aufbau der myofazialen Strukturen wird eher eine Funktion für die Kräfteverteilung und -weiterleitung zugeschrieben [26, 54, 55, 68, 80, 86]. Es ist davon auszugehen, dass dieser charakteristische Aufbau der Fasersysteme eher bei Muskeln wichtig ist, die hauptsächlich eine motorische Funktion aufweisen. In dieser Arbeit wurde im Epimysium der *Mm. lumbricales* eher ein „zirkulärer“ Verlauf (um die Muskelachse) und im Perimysium ein eher „quarer“ Verlauf zu den Muskelfasern beider Fasersysteme erwiesen. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu der zuvor erwähnten Theorie. *Wang et. al* beschreiben aber den *Mm. lumbricales* nur eine schwache motorische Funktion und viel mehr eine sensorische und propriozeptive Funktion zu. [11, 85]. Zusätzlich wurde in der Studiennummer 5202 des Instituts für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität eine hohe Anzahl an Muskelspindeln, sowie *Vater-Pacini*-Körperchen in und um diese Muskeln gefunden [11]. Dieser Kenntnis zufolge, spricht der zirkuläre Verlauf der elastischen Fasersysteme im Epimysium und der „quere“ Verlauf der Fasersysteme zu den Muskelfasern im Perimysium für die propriozeptiven und sensorischen Eigenschaften dieser Muskeln. Zusätzlich kann dieser charakteristische beschriebene Faserverlauf, die Funktion eines Antagonisten übernehmen und eine Erklärung für das Fehlen von Gegenspielern für die *Mm. lumbricales* darstellen.

In dieser Arbeit gehen wir davon aus, dass alle Strukturen der MCP-Region eine Einheit und ein System bilden. Es kann diskutiert werden, dass die Wahrnehmung von propriozeptiven Veränderungen in der MCP-Region eine große Bedeutung haben, da diese sich im Übergang zwischen Handfläche und Fingern befindet, Strukturen beinhaltet, die wichtig für die Bewegung und Versorgung der Fingern sind und eine Rolle in der Stabilisierung der Mittelhandplatte, dem Auffangen und Verteilen von Kräften, dem Schutz bei Überstreckung der Fingern, der Griffestigkeit, der Stabilisierung der Finger, der Erzeugung und Kontrolle von präzisen Bewegungen und Steuerung des Greifens spielt [10, 11, 18, 33, 40, 48, 59, 69].

Entsteht in einer der Strukturen der MCP-Region eine Verletzung, sind alle andere Struk-

turen in dieser Region in deren Funktion mitbeeinflusst, weswegen man bei Operationen nicht nur die Strukturen im Einzelnen betrachten sollten, sondern die MCP-Region als Einheit und Ganzes, um iatrogene Verletzungen und Folgen zu vermeiden.

Die Schlussfolgerungen beruhen auf den Befunden und können als Hypothese für biomechanische Studien herangezogen werden. Es könnte ferner hilfreich sein, weitere Studien bei jüngeren Körperspenden durchzuführen. Zusätzlich wären weitere Studien über die Menge der elastischen Fasern in den untersuchten Strukturen dieser Dissertation, sowie elektronenmikroskopische Studien hilfreich, um die genaue Durchsetzung der kollagenen Fasern mit elastischen Fasern zu definieren.

Die Ergebnisse von dem am häufigsten auftretenden Verlauf der elastischen Fasern in den verschiedenen Bindegewebeeinheiten der *Mm. abductores digiti minimi* und den *Mm. flexores digiti minimi breves*, sowie der Verlauf der kollagenen Fasern der *Mm. flexores digiti minimi breves* muss kritisch betrachtet werden, da in den statistischen Ergebnissen in diesen Fällen die Null-Hypothese verworfen wurde und Unterschiede zu finden waren.

Im Laufe der mikroskopischen Untersuchungen wurden in den Muskelspindeln elastische Fasern gesichtet. Es empfehlen sich weitere Untersuchungen unter diesem Aspekt durchzuführen, da elastische Fasern in Muskelspindeln bis dato nicht bekannt sind.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der Metakarpophalangealregion im Querschnitt auf Höhe der Metakarpalköpfe, Ansicht von proximal. <i>FDP= M. flexor digitorum profundus, FDS= M. flexor digitorum superficialis, LMTP=Lig. metacarpale transversum profundum</i> . Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler [11].	2
1.2	Mikroskopische Darstellung der Metakarpophalangealregion zwischen dem 3. und 4. Metakarpalkopf. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre. <i>FDP=Sehne des M. flexor digitorum profundus, FDS=Sehne des M. flexor digitorum superficialis</i>	4
1.3	Darstellung der Palmaraponeurose mit deren <i>Fasciculi longitudinales und transversi</i> . Ansicht von palmar. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler [11].	6
1.4	Darstellung des <i>Lig. metacarpale transversum profundum</i> , der <i>Fasciculi metacarpales longitudinales profundi</i> sowie der palmaren Platten. Ansicht von palmar. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler [11].	7
1.5	Querschnitt auf Höhe eines Metakarpalkopfes mit Darstellung der umliegenden Muskulatur sowie des Kapselbandapparates. <i>FDP=Sehne des M. flexor digitorum profundus, FDS=Sehne des M. flexor digitorum superficialis</i> [11]. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.	9
1.6	Dargestellt ist ein Querschnitt auf Höhe der Sehnen eines <i>M. flexor digitorum profundus</i> und <i>M. flexor digitorum superficialis</i> sowie die mikroskopische Darstellung deren Synovialmembran und lamellierten Kollagenfaserschichten. Interdigitalregion 2.-3., linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 94 Jahre. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.	15
2.1	Metakarpophalangealregion 2.-5., ursprüngliche Lage des präparierten Gewebes, Ansicht von palmar. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre [11]	22

2.2	Metakarpophalangealregion 2.-5., Mobilisierung des präparierten Gewebes nach distal, Ansicht auf die Metakarpalköpfe. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre [11]	23
2.3	Schematische sowie mikroskopische Darstellung der Metakarpophalangealregion (zwischen dem 3. und 4. Metakarpalkopf) im Querschnitt, Ansicht von proximal. Linke Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre. <i>FDP=Sehne des M. flexor digitorum profundus, FDS=Sehne des M. flexor digitorum superficialis</i> . Zeichnung: Frau C. Opfermann-Rüngeler.	29
2.4	Unterschiedliche Verlaufsmuster der kollagenen Fasern, 60x Vergrößerung, <i>EvG-Färbung</i> : (a) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: <i>Legueu u. Juvara Septen</i> , Ebene A; (b) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: Gefäßwand (Bereich zwischen den <i>Legueu u. Juvara Septen</i>), Ebene A.	31
2.5	Unterschiedliche Strukturanordnung (Beschaffenheit) der kollagenen Fasern, 40x Vergrößerung, <i>EvG Färbung</i> : (a) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 76 Jahre, Bereich: Bindegewebe zwischen den <i>Legueu u. Juvara Septen</i> , Ebene A; (b) ID 3-4 rechte Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre, Struktur: <i>Ligg. palmaria</i> , Ebene B.	32
2.6	Unterschiedlicher Erscheinungszustand der kollagenen Fasern, <i>EvG Färbung</i> : (a) 60x Vergrößerung, 5. uln., linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 85 Jahre, Struktur: <i>Ligg. collateralia</i> , Ebene A; (b) 40x Vergrößerung, ID 3-4, rechte Hand, weibliche Körperspende, Alter: 89 Jahre, Struktur: <i>Ligg. palmaria</i> , Ebene B.	32
2.7	Unterschiedlicher Verlaufsmuster der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern, 60x Vergrößerung, <i>EvG Färbung</i> : (a) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: <i>Legueu u. Juvara Septen</i> , Ebene A; (b) ID 2-3, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 87 Jahre, Struktur: <i>Legueu u. Juvara Septen</i> , Ebene A.	33
2.8	Beispiel für ein immunhistochemisch angefärbtes Präparat und dessen Kontrolle, 10x Vergrößerung: (a) ID 3-4, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 82 Jahre, Struktur: <i>LMTP</i> , Ebene B; (b) ID 3-4, linke Hand, männliche Körperspende, Alter: 82 Jahre, Struktur: <i>LMTP</i> , Ebene B.	34
2.9	SPSS Version 19.0, Variablenansicht der Tabelle für die statistische Auswertung.	34

3.1	Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für den Faserverlauf der kollagenen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.	48
3.2	Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für die Beschaffenheit der kollagenen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.	49
3.3	Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für den Zustand der kollagenen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.	50
3.4	Repräsentative topografische Darstellung der am häufigsten vorkommenden Fasercharakteristika für den Faserverlauf der elastischen Fasern in den einzelnen Strukturen und Bindegewebeeinheiten der MCP-Region. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.	51
3.5	Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in den Ligamenten der MCP-Region. Ligg. L et J = Legueu und Juvara Septen	52
3.6	Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der <i>Mm. lumbricales</i>	53
3.7	Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der <i>Mm. interossei dorsales</i>	54
3.8	Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der <i>Mm. abductores digiti minimi</i>	55
3.9	Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern in jeder Bindegewebeeinheit der <i>Mm. flexores digiti minimi breves</i>	56

3.10 Relative Häufigkeit der Verlaufsrichtung, der Beschaffenheit und des Zustands der kollagenen Fasern und der Verlaufsrichtung der elastischen Fasern in Bezug zu den kollagenen Fasern im äußeren und inneren Blatt der Sehnenscheiden der <i>Mm. flexores digitorum</i>	57
--	----

Tabellenverzeichnis

1.1	Tabellarische Zusammenfassung des Ursprungs, Ansatzes, Funktion und Innervation der Muskulatur in der MCP-Region nach <i>Drenckhahn</i> [10][11].	13
3.1	Darstellung der häufigsten Fasercharakteristika für jede Bindegewebeeinheit der einzelnen Strukturarten.	47

Literaturverzeichnis

- [1] al Qattan MM and Robertson GA: "An anatomical study of the deep transverse metacarpal ligament." *J Anat* 182 (Pt 3):443–446 (1993)
- [2] Baldwin AK, Simpson A, Steer R, Cain SA and Kielty CM: "Elastic fibres in health and disease." *Expert Rev Mol Med* 15:e8 (2013)
- [3] Barros EMKP, Rodrigues CJ, Rodrigues NR, Oliveira RP, Barros TEP and Rodrigues AJJ: "Aging of the elastic and collagen fibers in the human cervical interspinous ligaments." *Spine J* 2(1):57–62 (2002)
- [4] Benjamin M and Ralphs JR: "The cell and developmental biology of tendons and ligaments." *Int Rev Cytol* 196:85–130 (2000)
- [5] Bilderback KK and Rayan GM: "The septa of Legueu and Juvara: An Anatomic Study." *J Hand Surg Am* 29A(3):494–499 (2004)
- [6] Bowers WH: "The proximal interphalangeal joint volar plate. II: a clinical study of hyperextension injury." *J Hand Surg Eur Vol* 6(1):77–81 (1981)
- [7] Bowers WH, Wolf JWJ, Nehil JL and Bittinger S: "The proximal interphalangeal joint volar plate. I: An anatomical and biomechanical study." *J Hand Surg Am* 5(1):79–88 (1980)
- [8] Burgess PR and Clark FJ: "Characteristics of knee joint receptors in the cat". *J Physiol* 203(2):317–335 (1969)
- [9] Cohen MJ and Kaplan L: "Histology and ultrastructure of the human flexor tendon sheath." *J Hand Surg Am* 12(1):25–29 (1987)
- [10] Drenckhahn D: *Anatomie: Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*, volume 1: Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie. Elsevier, Urban Fischer, München, 17. edition (2008). - ISBN - 9783437423420

- [11] Echelmeyer P: *Propriozeptive Ausstattung der distalen Hohlhand im Bereich des Ligamentum metacarpale transversum profundum*. Ph.D. thesis, Institut für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019)
- [12] Foucher G, Malizos C, Sammut D, Braun FM and Michon J: “Primary palmaris longus transfer as an opponensplasty in carpal tunnel release”. *The Journal of Hand Surgery: British European Volume* 16(1):56 – 60 (1991)
- [13] Frank CB: “Ligament structure, physiology and function.” *J Musculoskelet Neuronal Interact* 4(2):199–201 (2004)
- [14] Freeman MA and Wyke B: “The innervation of the knee joint. An anatomical and histological study in the cat.” *J Anat* 101(Pt 3):505–532 (1967)
- [15] Giacomo GD, Pouliart N, Costantini A and Vita Ad: *Atlas of Functional Shoulder Anatomy*. Springer-Verlag Mailand, 1. edition (2008). - ISBN - 978-88-470-0758-1
- [16] Gillies AR and Lieber RL: “Structure and function of the skeletal muscle extracellular matrix.” *Muscle Nerve* 44(3):318–331 (2011)
- [17] Gosavi SN, Jadhav SD, Zambre BR and Vatsala swamy P: “Deep transverse metacarpal ligament: a cadaveric study”. *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences (JDMS)* 2(Issue 6):01–03 (2012)
- [18] Gratzner J, Vokt CA and Brenner P: “Morphological and functional interface between palmar plates of metacarpophalangeal joints and intrinsic muscles of the hand.” *Handchir Mikrochir Plast Chir* 33(5):299–309 (2001)
- [19] Gray H, Standring S, Ellis H, Collins P, Berkovitz B and Wigley C: *Gray’s Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. Gray’s Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice. Elsevier Churchill Livingstone (2005). - ISBN-9780443071683
- [20] Guanche CA, Noble J, Solomonow M and Wink CS: “Periarticular neural elements in the shoulder joint.” *Orthopedics* 22(6):615–617 (1999)
- [21] Hakstian RW and Tubiana R: “Ulnar deviation of the fingers. The role of joint structure and function.” *J Bone Joint Surg Am* 49(2):299–316 (1967)
- [22] Halata Z, Retting T and Schulze W: “The ultrastructure of sensory nerve endings in the human knee joint capsule.” *Anat Embryol (Berl)* 172(3):265–275 (1985)

- [23] Henninger HB, Valdez WR, Scott SA and Weiss JA: “Elastin governs the mechanical response of medial collateral ligament under shear and transverse tensile loading.” *Acta Biomater* 25:304–312 (2015)
- [24] Huijing PA: “Muscle as a collagen fiber reinforced composite: a review of force transmission in muscle and whole limb.” *J Biomech* 32(4):329–345 (1999)
- [25] Huijing PA: “3.2 - Myofascial force transmission: An introduction”. In R Schleip, TW Findley, L Chaitow and PA Huijing (Editors), *Fascia: The Tensional Network of the Human Body*, pages 117 – 122. Churchill Livingstone, Oxford (2012). - ISBN - 978-0-7020-3425-1
- [26] Ingber DE, Wang N and Stamenovic D: “Tensegrity, cellular biophysics, and the mechanics of living systems.” *Rep Prog Phys* 77(4):046603 (2014)
- [27] Jackson HC, Winkelmann RK and Bickel WH: “Nerve endings in the human lumbar spinal column and related structures.” *J Bone Joint Surg Am* 48(7):1272–1281 (1966)
- [28] Jacobson MD, Raab R, Fazeli BM, Abrams RA, Botte MJ and Lieber RL: “Architectural design of the human intrinsic hand muscles.” *J Hand Surg Am* 17(5):804–809 (1992)
- [29] Johansson H: “Role of knee ligaments in proprioception and regulation of muscle stiffness”. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 1(3):158 – 179 (1991)
- [30] Josty I, Laing J and Dent C: “Reconstruction of disruptions of the deep transverse metacarpal ligament of the ring finger using the A1 pulleys”. *J Hand Surg Eur Vol* 31(4):439 – 440 (2006)
- [31] Keeley FW, Bellingham CM and Woodhouse KA: “Elastin as a self-organizing biomaterial: use of recombinantly expressed human elastin polypeptides as a model for investigations of structure and self-assembly of elastin.” *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 357(1418):185–189 (2002)
- [32] Kielty CM, Sherratt MJ and Shuttleworth CA: “Elastic fibres.” *J Cell Sci* 115(Pt 14):2817–2828 (2002)
- [33] Kim AW, Rosen AM, Brander VA and Buchanan TS: “Selective muscle activation following electrical stimulation of the collateral ligaments of the human knee joint.” *Arch Phys Med Rehabil* 76(8):750–757 (1995)

- [34] Kjaer M: "Role of extracellular matrix in adaptation of tendon and skeletal muscle to mechanical loading." *Physiol Rev* 84(2):649–698 (2004)
- [35] Kuczynski K: "The proximal interphalangeal joint. Anatomy and causes of stiffness in the fingers." *J Bone Joint Surg Br* 50(3):656–663 (1968)
- [36] Kumar N, Kumar P, Nayak Badagabettu S, Kudva R, Surendran S and Adiga M: "Collagen and Elastic Fiber Content Correlation Analysis between Horizontal and Vertical Orientations of Skin Samples of Human Body". *Dermatology research and practice* 2015:692196 (2015)
- [37] Kurose T, Asai Y, Mori E, Daitoku D and Kawamata S: "Distribution and change of collagen types I and III and elastin in developing leg muscle in rat." *Hiroshima J Med Sci* 55(3):85–91 (2006)
- [38] Landsmeer JMF: "Anatomical and functional investigations on the articulation of the human fingers." *Acta Anat Suppl (Basel)* 25(24):1–69 (1955)
- [39] Lannoy M, Slove S and Jacob MP: "The function of elastic fibers in the arteries: beyond elasticity." *Pathologie Biologie (Paris)* 62(2):79–83 (2014)
- [40] Lee KS, Baek JR and Kim SB: "The neglected rupture of deep transverse metacarpal ligament." *Hand Surgery* 8(2):277–281 (2003)
- [41] Lee SWJ, Ng ZY and Fogg QA: "Three-dimensional analysis of the palmar plate and collateral ligaments at the proximal interphalangeal joint." *J Hand Surg Eur Vol* 39(4):391–397 (2014)
- [42] Leijnse JN and Kalker JJ: "A two-dimensional kinematic model of the lumbrical in the human finger." *J Biomech* 28(3):237–249 (1995)
- [43] Lo IK, Chi S, Ivie T, Frank CB and Rattner JB: "The cellular matrix: a feature of tensile bearing dense soft connective tissues." *Histol Histopathol* 17(2):523–537 (2002)
- [44] Lüllmann-Rauch R and Asan E: *Taschenlehrbuch Histologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York, 5. edition (2015). - S. 239, 610-613 - ISBN = 9783131516657, 3131516658
- [45] Mansfield J, Yu J, Attenburrow D, Moger J, Tirlapur U, Urban J, Cui Z and Winlove P: "The elastin network: its relationship with collagen and cells in articular cartilage as visualized by multiphoton microscopy." *J Anat* 215(6):682–691 (2009)

- [46] McCombe D, Brown T, Slavin J and Morrison WA: “The histochemical structure of the deep fascia and its structural response to surgery”. *J Hand Surg Br (Edinburgh, Scotland)* 26(2):89–97 (2001)
- [47] McLoon LK, Vicente A, Fitzpatrick KR, Lindstrom M and Pedrosa Domellof F: “Composition, Architecture, and Functional Implications of the Connective Tissue Network of the Extraocular Muscles.” *Invest Ophthalmol Vis Sci* 59(1):322–329 (2018)
- [48] Merle M: *Chirurgie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart (2009). - S. 247 - 257 - ISBN - 9783131481511
- [49] Montes GS: “Structural biology of the fibres of the collagenous and elastic systems.” *Cell Biol Int* 20(1):15–27 (1996)
- [50] Mulisch M and Welsch U: *Romeis - Mikroskopische Technik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 18. edition (2010). - S. 198-223 - ISBN - 978-3-8274-1676-6
- [51] Müller-Wohlfahrt HW, Ueblicher P and Hänsel L: *Muskelverletzungen im Sport*. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 2. edition (2010, 2014). - S. 51 - 63 - ISBN - 978-313146752-2
- [52] Oxlund H, Manschot J and Viidik A: “The role of elastin in the mechanical properties of skin.” *J Biomech* 21(3):213–218 (1988)
- [53] Palti R and Vigler M: “Anatomy and function of lumbrical muscles.” *Hand Clin* 28(1):13–17 (2012)
- [54] Passerieux E, Rossignol R, Chopard A, Carnino A, Marini JF, Letellier T and Delage JP: “Structural organization of the perimysium in bovine skeletal muscle: Junctional plates and associated intracellular subdomains.” *J Struct Biol* 154(2):206–216 (2006)
- [55] Passerieux E, Rossignol R, Letellier T and Delage J: “Physical continuity of the perimysium from myofibers to tendons: Involvement in lateral force transmission in skeletal muscle”. *J Struct Biol* 159(1):19 – 28 (2007)
- [56] Petibois C, Gouspillou G, Wehbe K, Delage JP and Deleris G: “Analysis of type I and IV collagens by FT-IR spectroscopy and imaging for a molecular investigation of skeletal muscle connective tissue.” *Anal Bioanal Chem* 386(7-8):1961–1966 (2006)
- [57] Petrie S, Collins J, Solomonow M, Wink C and Chuinard R: “Mechanoreceptors in the palmar wrist ligaments.” *J Bone Joint Surg Br* 79(3):494–496 (1997)

- [58] Petrie S, Collins JG, Solomonow M, Wink C, Chuinard R and D'Ambrosia R: "Mechanoreceptors in the human elbow ligaments." *J Hand Surg Am* 23(3):512–518 (1998)
- [59] Poisel S: "Die Anatomie der Palmaraponeurose". *Therapiewoche* 37 37:3337–3339 (1973)
- [60] Proske U, Schaible HG and Schmidt R: "Joint receptors and kinesthesia". *Exp Brain Res* 72:219–224 (1988)
- [61] Purslow PP: "Strain-induced reorientation of an intramuscular connective tissue network: implications for passive muscle elasticity." *J Biomech* 22(1):21–31 (1989)
- [62] Purslow PP: "The structure and functional significance of variations in the connective tissue within muscle". *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular Integrative Physiology* 133(4):947 – 966 (2002)
- [63] Purslow PP: "Muscle fascia and force transmission". *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 14(4):411 – 417 (2010)
- [64] Purslow PP and Trotter JA: "The morphology and mechanical properties of endomysium in series-fibred muscles: variations with muscle length." *J Muscle Res Cell Motil* 15(3):299–308 (1994)
- [65] Rnjak J, Wise SG, Mithieux SM and Weiss AS: "Severe burn injuries and the role of elastin in the design of dermal substitutes." *Tissue Eng Part B Rev* 17(2):81–91 (2011)
- [66] Rowe RW: "Morphology of perimysial and endomysial connective tissue in skeletal muscle." *Tissue Cell* 13(4):681–690 (1981)
- [67] Saldinger P, Dvorak J, Rahn BA and Perren SM: "Histology of the alar and transverse ligaments." *Spine* 15(4):257–261 (1990)
- [68] Scarr G: "Fascial hierarchies and the relevance of crossed-helical arrangements of collagen to changes in the shape of muscles." *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 20(2):377–387 (2016)
- [69] Schmidt H and Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. edition (2003). - S. 129 - 172 - ISBN - 3131306920

- [70] Schmitt FO, Hall CE and Jakus MA: “Electron microscope investigations of the structure of collagen”. *Journal of Cellular and Comparative Physiology* 20(1):11–33 (1942)
- [71] Schultz RA, Miller DC, Kerr CS and Micheli L: “Mechanoreceptors in human cruciate ligaments. A histological study.” *J Bone Joint Surg Am* 66(7):1072–1076 (1984)
- [72] Smeets K, Slane J, Scheys L, Forsyth R, Claes S and Bellemans J: “The Anterolateral Ligament Has Similar Biomechanical and Histologic Properties to the Inferior Glenohumeral Ligament.” *The Journal of Arthroscopic and Related Surgery* 33(5):1028–1035 (2017)
- [73] Smith LJ, Byers S, Costi JJ and Fazzalari NL: “Elastic fibers enhance the mechanical integrity of the human lumbar anulus fibrosus in the radial direction.” *Annals Biomedical Engineering* 36(2):214–223 (2008)
- [74] Smith LJ and Fazzalari NL: “The elastic fibre network of the human lumbar anulus fibrosus: architecture, mechanical function and potential role in the progression of intervertebral disc degeneration”. *Eur Spine J* 18(4):439–448 (2009)
- [75] Solomonow M: “Ligamente als Entstehungsort berufsbedingter Störungen”. *Osteopathische Medizin* 10(3):4–13 (2009). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S161590710900029X>
- [76] Solomonow M, Guanche C, Wind C, Knatt T, Baratta RV and Lu Y: “Mechanoreceptors and reflex arc in the feline shoulder.” *J Shoulder Elbow Surg* 5(2 Pt 1):139–146 (1996)
- [77] Tipton CM, James SL, Mergner W and Tchong TK: “Influence of exercise on strength of medial collateral knee ligaments of dogs.” *Am J Physiol* 218(3):894–902 (1970)
- [78] Towfigh H, Hierner R, Langer M and Friedel R: *Handchirurgie*, volume 2. Springer Berlin Heidelberg, 1. edition (2011). - S. 541-549 - ISBN - 9783642117572
- [79] Trotter JA: “Functional morphology of force transmission in skeletal muscle. A brief review.” *Acta Anat (Basel)* 146(4):205–222 (1993)
- [80] Turrina A, Martínez-González MA and Stecco C: “The muscular force transmission system: Role of the intramuscular connective tissue”. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 17(1):95 – 102 (2013)

- [81] Ushiki T: "Collagen fibers, reticular fibers and elastic fibers. A comprehensive understanding from a morphological viewpoint." *Arch Histol Cytol* 65(2):109–126 (2002)
- [82] Viidik A: "The effect of training on the tensile strength of isolated rabbit tendons." *Scand J Plast Reconstr Surg* 1(2):141–147 (1967)
- [83] Viidik A: "Simultaneous mechanical and light microscopic studies of collagen fibers." *Z Anat Entwicklungsgesch* 136(2):204–212 (1972)
- [84] Viidik A and Ekholm R: "Light and electron microscopic studies of collagen fibers under strain". *Z Anat Entwicklungsgesch* 127(2):154–164 (1968)
- [85] Wang K, McGlinn EP and Chung KC: "A Biomechanical and Evolutionary Perspective on the Function of the Lumbrical Muscle". *J Hand Surg Am* 39(1):149–155 (2014)
- [86] Wang N, Tytell JD and Ingber DE: "Mechanotransduction at a distance: mechanically coupling the extracellular matrix with the nucleus". *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 10:75–82 (2009)
- [87] Watanabe H, Hashizume H, Inoue H and Ogura T: "Collagen framework of the volar plate of human proximal interphalangeal joint." *Acta Med Okayama* 48(2):101–108 (1994)
- [88] Welsch U: *Lehrbuch Histologie - Zytologie, Histologie, mikroskopische Anatomie*, volume 2. Elsevier, Urban Fischer Verlag, München (2006). - S. 613 - 614 - ISBN - 978-3-437-44430-2
- [89] Williams EH, McCarthy E and Bickel KD: "The histologic anatomy of the volar plate." *J Hand Surg Am* 23(5):805–810 (1998)
- [90] Woo SL, Gomez MA, Amiel D, Ritter MA, Gelberman RH and Akeson WH: "The Effects of Exercise on the Biomechanical and Biochemical Properties of Swine Digital Flexor Tendons". *J Biomech Eng* 103(1):51–56 (1981)
- [91] Woo SL, Ritter MA, Amiel D, Sanders TM, Gomez MA, Kuei SC, Garfin SR and Akeson WH: "The biomechanical and biochemical properties of swine tendons: Long term effects of exercise on the digital extensors." *Connect Tissue Res* 7(3):177–183 (1980)
- [92] Wyke B: "The neurology of joints: A review of general principles". *Clin Rheum Dis* 7 pages 223–229 (1981)

- [93] Yahia L and Newman N: "Innervation of Spinal Ligaments of Patients with Disc Herniation: An Immunohistochemical Study". *Pathology - Research and Practice* 187(8):936 – 938 (1991)
- [94] Yahia LH, Garzon S, Strykowski H and Rivard CH: "Ultrastructure of the human interspinous ligament and ligamentum flavum. A preliminary study." *Spine* 15(4):262–268 (1990)
- [95] Zernicke RF, Butler DL, Grood ES and Hefzy MS: "Strain topography of human tendon and fascia." *J Biomech Eng* 106(2):177–180 (1984)
- [96] Zimny ML and Wink CS: "Neuroreceptors in the tissues of the knee joint". *J Electromyogr Kinesiol* 1(3):148 – 157 (1991)

Danksagung

Folgenden Personen danke ich ganz herzlich für die Unterstützung, die Hilfestellung und Mitbetreuung meiner Dissertation:

Herrn Prof. Dr. Timm J. Filler für das Ermöglichen der Erstellung dieser Arbeit sowie für die hervorragende Unterstützung und ausgezeichnete Betreuung.

Frau Dr. Birte Barbian für die ausgezeichnete Betreuung, die sehr gute Unterstützung und das Vertrauen in mich.

Frau Christine Opfermann-Rüngeler danke ich für die Erstellung der vielen schönen Abbildungen sowie für die Hilfe bei der Gestaltung meines Posters.

Herrn Dr. med. Philipp Echelmeyer für die immer tolle Hilfe bei der Erstellung meiner Dissertation sowie immer guten Tipps und Bereitstellung seiner Präparate.

Bei Herrn Robert Kubitza und Frau Andrea Paas für die Unterstützung bei den histologischen Tätigkeiten sowie für die vielen netten und ermutigenden Gespräche.

Dem Team der Präparatoren und Frau Sabine Wittschonke für die Bereitstellung der anatomischen Utensilien und die Vorbereitung der Körperspender.

Den Körperspendern danke ich für ihre Entscheidung, sich für Lehr- und Forschungszwecke zur Verfügung gestellt zu haben.

Herrn Dr. Andreas Barbian, Herrn M.Sc. Dennis Malenica und Herrn M.Sc. Patrick Brzoska für die guten Gespräche und die ausgezeichnete Unterstützung bei dem Statistik-Programm SPSS sowie dem Programm LaTeX.

Herrn Mirko Weber für die Unterstützung und Hilfe mit dem Programm LaTeX.

Herrn Dr. med. Klaus Ingefurth für die vielen freundlichen Hilfen, die ich von ihm beim Schreiben der Dissertation erfahren habe.

Herrn Tobias Mätschke und Frau Sabrina Schaller für die Unterstützung und Ermutigung während meines Studiums und der Erstellung meiner Dissertation.

Meiner Familie: Guido Fernando Pinto Barrios, Esther Raquel Perez de Pinto, Astrid Cristina Pinto Perez, David Fernando Pinto Perez und Eva Schlue für die immer ermutigen Worte, für die Unterstützung während meines Studiums und Erstellung dieser Arbeit sowie die finanzielle Unterstützung. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Cynthia Carolina Pinto Perez