

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

**Propriozeptive Ausstattung
der distalen Hohlhand im Bereich des
Ligamentum metacarpale transversum profundum**

Dissertation

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

vorgelegt von
Philipp Echelmeyer
Düsseldorf, 2019

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

gez.:

Dekan: Prof. Dr. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. Timm J. Filler

Zweitgutachter: Prof. Dr. Joachim Windolf

Meinen lieben Eltern gewidmet.

Kurzfassung

Einleitung: Das *Ligamentum metacarpale transversum profundum* ist ein zentrales Band der Metakarpophalangealregion 2.-5. und steht mit einem komplizierten Gerüst aus Bindegewebe in einer engen funktionellen Beziehung. Bändern wird dabei eine nicht nur passive, sondern auch aktive sensorische Funktion zugeschrieben, welche durch Propriozeptoren ermöglicht wird. Die Lokalisation und Verteilung der Propriozeptoren innerhalb der Region ist jedoch nicht bekannt und soll durch topografische Kartierungen dargestellt werden, um die anatomischen Beziehungen mit den propriozeptiven Eigenschaften der Gewebe zu verknüpfen.

Material und Methoden: Die Metakarpophalangealregion 2.-5. wurde aus 24 Händen von 12 Körperspendern herauspräpariert (5 ♀, 7 ♂, Durchschnittsalter: 83 Jahre) und lichtmikroskopisch (*Hämalaun-Eosin-Färbung* sowie *Elastika-van-Gieson-Färbung*) in 2 Ebenen betrachtet (Ebene A=proximaler Beginn der Ausläufer des *Ligamentum metacarpale transversum profundum*, Ebene B=5mm distal der Ebene A auf Höhe des Bandes). Die Anzahl, Lokalisation und Verteilung der Propriozeptoren *Ruffini-Körperchen*, *Vater-Pacini-Körperchen*, *Golgi-Mazzoni-Körperchen* und *Muskelspindeln* wurden eingeteilten Kompartimenten zugeordnet und in Säulendiagrammen sowie topografischen Kartierungen dargestellt.

Auswertung: Insgesamt lassen sich in beiden Ebenen die Anschnitte von 868 Propriozeptoren finden, deren Schwerpunkte der Verteilung und Kompartimentenzugehörigkeit sich wie folgt zeigen: *Ruffini-Körperchen* (Ebene A=89, Ebene B=191) an den *Ligamenta collateralia* (93), assoziiert zu den Beugesehnen (60) sowie zu den Interosseus-Kompartimenten (45). *Vater-Pacini-Körperchen* (Ebene A=12, Ebene B=17) besonders in den Kompartimenten der *Musculi lumbricales* (15), in Assoziation zu den Beugesehnen (6) und dem *Musculus abductor digiti minimi* (4). *Golgi-Mazzoni-Körperchen* (Ebene A=6, Ebene B=6) ebenfalls in den Kompartimenten der *Musculi lumbricales* (4) sowie am *Musculus abductor digiti minimi* (3) und *Musculi interossei* (2). *Muskelspindeln* (Ebene A=334, Ebene B=213) zumeist in den *Musculi lumbricales* (423), in den *Musculi interossei* (118) und wenige im *Musculus abductor digiti minimi* (6).

Ziel: Diese Dissertation konnte das Verteilungsmuster der Propriozeptoren in der Metakarpophalangealregion 2.-5. visualisieren und aus der Zusammenführung von dem bereits über die Propriozeptoren bekannten Wissen und dem neu aufgestellten Verteilungsmuster die Funktion der Propriozeptoren in der Metakarpophalangealregion interpretieren. Mit diesen Auslegungen lassen sich feinmotorische Bewegungseinschränkungen bei Erkrankungen und Verletzungen innerhalb der Metakarpophalangealregion erklären, Therapiepläne erstellen und mit Hilfe der Kartierungen durch neue Schnittführungen iatrogenen Verletzungen der Propriozeptoren bei Operationen vorbeugen.

Abstract

Introduction: The *deep transverse metacarpal ligament* is a central ligament of the metacarpophalangeal region 2.-5. and is related to an intricate structure of conjunctive tissue. Ligaments haven't just got an passive, but an active and sensoric function enabled by proprioceptors. Localization and distribution of these proprioceptors in this region isn't known yet but will be represented by topographical maps to link anatomical relations with proprioception's function of this tissue.

Methods: The metacarpophalangeal region 2.-5. has been achieved by 24 hands of 12 body donors (5 ♀, 7 ♂, average age: 83 years) and has been considered in 2 levels (level A=proximal beginning of the branches of the *deep transverse metacarpal ligament*, level B=5mm distal of level A, abreast of the *deep transverse metacarpal ligament*) by light microscope (stained by *hematoxylin and eosin* and *elastica-van-Gieson*). Number, localization and distribution of the proprioceptors *Ruffini-corporcles*, *Father-Pacini-corporcles*, *Golgi-Mazzoni-corporcles* und *muscle spindles* has been dedicated to compartments and is shown by bar charts and topographical maps.

Results: In both levels there are 868 proprioceptors at all with the following distribution: *Ruffini-corporcles* (level A=89, level B=191) are associated to the *collateralia ligaments* (93), *flexor digitorum superficialis et profundus* (60) and compartments of *interosseus muscle* (45). *Father-Pacini-corporcles* (level A=12, level B=17) are located to the compartments of *lumbrical muscle* (15), *flexor digitorum superficialis et profundus* (6) and *abductor digiti minimi muscle* (4). *Golgi-Mazzoni-corporcles* (level A=6, level B=6) are located to the compartments of *lumbrical muscle* (4) and *abductor digiti minimi muscles* (3) as well and also to the compartments of *interosseus muscles* (2). *Muscle spindles* (level A=334, level B=213) turn up mostly in the *lumbrical muscle* (423), *interosseus muscle* (118) and some of them in *abductor digiti minimi muscle* (6).

Conclusion: This thesis depicts the pattern of distribution of the proprioceptors in the metacarpophalangeal region 2.-5. and interprets functions based of associate ideas by the known of these proprioceptors with pattern of their distribution. With that said there can be made explanations of fine-motor skills of restriction of motion by diseases and injuries, suggestions of treatment and proposals of new operation techniques by using the topographical maps in order to avoid iatrogenic injuries.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Die Metakarpophalangealregion 2.-5.	2
1.2	Bandapparat der Metakarpophalangealregion 2.-5.	4
1.2.1	Das Ligamentum metacarpale transversum profundum	5
1.2.2	Kapselbandapparat der Metakarpophalangealgelenke	7
1.2.3	Die palmare Platte	8
1.2.4	Die Palmaraponeurose	9
1.3	Muskulatur in der Metakarpophalangealregion 2.-5.	10
1.4	Klinische Relevanz der Metakarpophalangealregion 2.-5.	13
1.5	Anatomie der Propriozeptoren	17
1.5.1	Ruffini-Körperchen	20
1.5.2	Vater-Pacini-Körperchen	21
1.5.3	Golgi-Mazzoni-Körperchen	23
1.5.4	Muskelspindeln	25
1.6	Zielsetzung	27
2	Material und Methoden	29
2.1	Körperspenden	29
2.2	Makroskopische Präparation	30
2.3	Histologie	32
2.3.1	Herstellung der histologischen Schnitte	32
2.3.2	HE-Färbung	32
2.3.3	EvG-Färbung	33
2.4	Visualisierung	35
3	Auswertung	37
3.1	Anzahl und Topografie der Propriozeptoren	40
3.1.1	Ruffini-Körperchen	41
3.1.2	Vater-Pacini-Körperchen	43
3.1.3	Golgi-Mazzoni-Körperchen	44
3.1.4	Muskelspindeln	46
3.2	Vergleich der Ebene A und B hinsichtlich der Verteilung und Topografie der Propriozeptoren	49
3.2.1	Ruffini-Körperchen	50
3.2.2	Vater-Pacini-Körperchen	53
3.2.3	Golgi-Mazzoni-Körperchen	55
3.2.4	Muskelspindeln	57

INHALTSVERZEICHNIS

4 Diskussion	63
4.1 Methodenkritik	63
4.2 Funktionelle Einordnung der Propriozeptoren in die Metakarpophalangeal- region 2.-5.	65
4.2.1 Ruffini-Körperchen	67
4.2.2 Vater-Pacini-Körperchen	68
4.2.3 Golgi-Mazzoni-Körperchen	69
4.2.4 Muskelspindeln	70
4.3 Schlussfolgerung	72
Abkürzungsverzeichnis	73
Abbildungsverzeichnis	75
Literaturverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis.	87
Lebenslauf	89
Danksagung	89

KAPITEL 1

Einleitung

Die Metakarpophalangealregion (MCP-Region) 2.-5. liegt am Übergang zwischen Handfläche und Fingern und beinhaltet die Articulationes metacarpophalangeales (MCP-Gelenke), zahlreiche Muskeln, Nerven und Gefäße sowie ein kompliziertes Gerüst aus längs-, quer- und vertikalverlaufenden Bändern. Diese stehen untereinander in Verbindung, stabilisieren die MCP-Region, führen die Muskeln und Sehnen in ihrem Verlauf, verhindern unphysiologische Bewegungen der Gelenke und leiten Kräfte großflächig ab, welche bei Überstreckung eines Fingers entstehen. [24, 55, 71, 75, 78]

Eines der zentralen Bänder ist das querverlaufende *Ligamentum metacarpale transversum profundum (LMTP)*. Dieses Band kann als Referenzstruktur betrachtet werden, welches innerhalb der MCP-Region zwischen *palmar* und *dorsal* unterscheidet. Das *LMTP* soll jedoch nicht als eine Trennschicht zwischen den anderen Geweben, sondern im wörtlichen Sinne als „Binde-“Gewebe betrachtet werden, weil das *LMTP* in einer funktionellen Beziehung mit dem umliegenden Gewebe steht.

Aus zahlreichen Studien ist bekannt, dass sich im Bindegewebe Propriozeptoren befinden [4, 10, 15, 16, 22, 26–29, 32, 35, 41, 44, 52, 54, 65, 68, 69, 73, 89, 90], welche ein Empfinden für Stellung, Lage und Stabilität der Gelenke vermitteln [44, 54, 69] und die Aktivität der Muskulatur beeinflussen [15, 26, 44, 73]. Bändern wird somit nicht nur eine passive Funktion, sondern auch eine aktive sensorische Funktion zugewiesen [10, 15, 26, 28, 35, 37, 49, 90]. Die genaue Lokalisation der Propriozeptoren in der MCP-Region ist allerdings nicht bekannt, und demzufolge auch nicht ihre Funktion innerhalb dieser Region.

In dieser Dissertation sollen daher die Propriozeptoren in der MCP-Region 2.-5. topografisch kartiert und die anatomischen Beziehungen zwischen dem *LMTP* und der Umgebung mit den propriozeptiven Eigenschaften der Gewebe verknüpft werden.

1.1 Die Metakarpophalangealregion 2.-5.

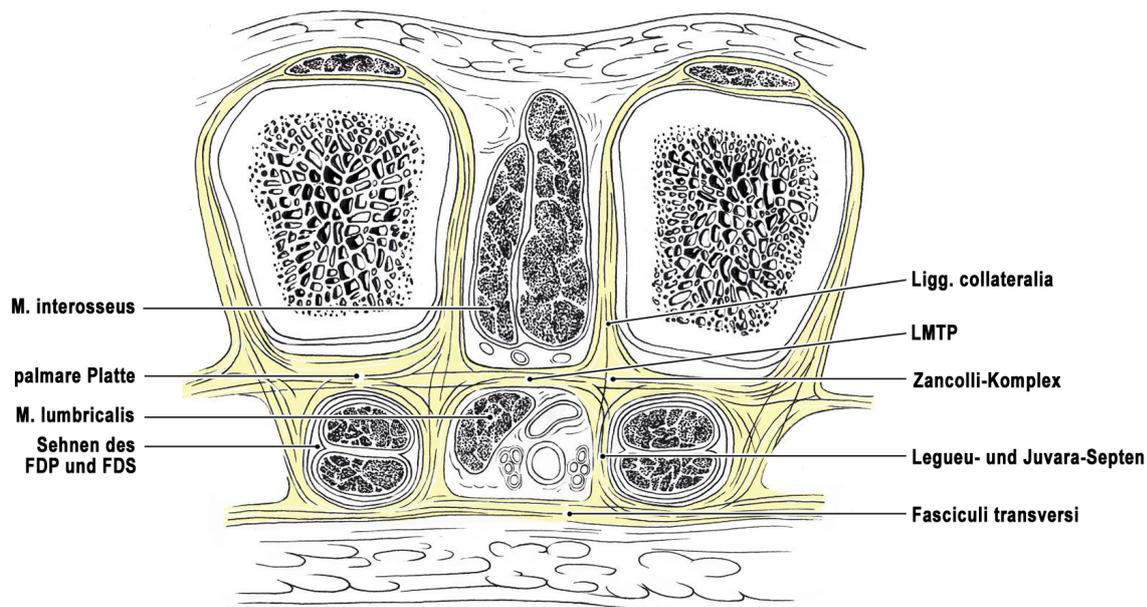
Das *LMTP* verbindet die palmaren Platten zwischen den Köpfen der Metakarpalknochen (s. Abbildungen 1.1 und 1.2). An der radialen Seite des 2. bzw. ulnaren Seite des 5. Metakarpalknochens sowie nach dorsal geht das *LMTP* in die *Ligamenta (Ligg.) collateralia* über [1] und nach palmar verbindet sich das *LMTP* über die *Legueu- und Juvara-Septen*¹ mit den *Fasciculi transversi* der Palmaraponeurose (s. Abbildung 1.1) [7, 71].

Dorsal des *LMTP* befinden sich die *Musculi (Mm.) interossei*, palmar die *Mm. lumbricales* [23] sowie die die Sehnen des *M. flexor digitorum profundus (FDP)* und *M. flexor digitorum superficialis (FDS)*. Diese sind von einer Sehnenscheide und auf Höhe der MCP-Region von dem A1-Ringband umgeben (s. Abbildung 1.1). [36, 71]

Auf den *Mm. lumbricales* ziehen die *Nervi (Nn.) digitales palmares proprii* und *Arteriae (Aa.) digitales palmares communes* nach distal, wobei die Arterien sich auf Höhe des *LMTP* in die *Aa. digitales palmares propriae* aufzweigen [71].

Die Hypothenarmuskulatur hat über die Sehnen einen Ansatz im *LMTP* [1, 23].

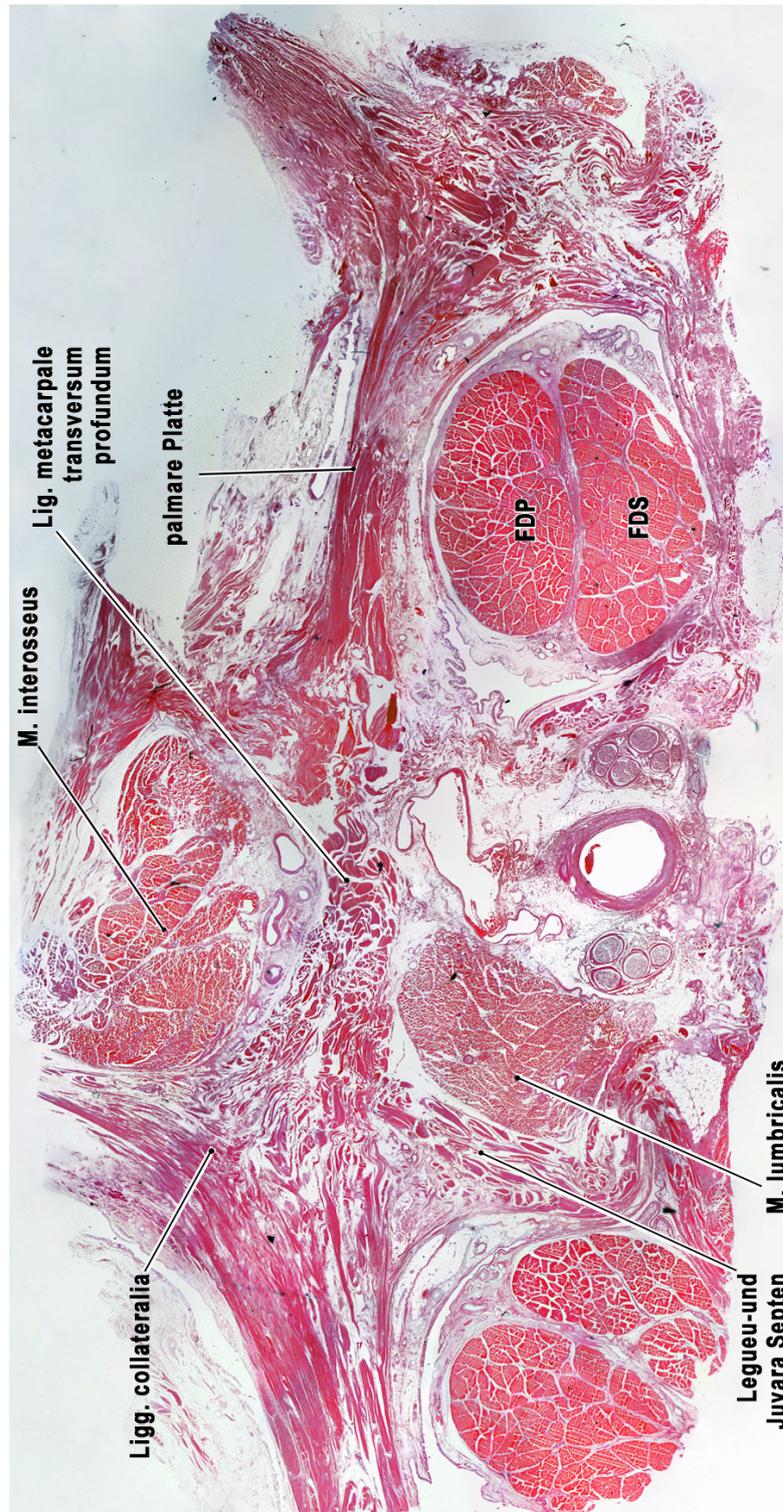
Der gemeinsame Knotenpunkt des *LMTP*, der palmaren Platte, des A1-Ringbandes, der *Ligg. collateralia* und der *Legueu- und Juvara-Septen* wird als *Zancolli-Komplex* beschrieben (s. Abbildungen 1.1 und 1.2) [71].



FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*, LMTP=*Lig. metacarpale transversum profundum*. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Metakarpophalangealregion im Querschnitt auf Höhe der Metakarpalköpfe, Ansicht von proximal.

¹Erstbeschreibung durch die zwei französischen Anatomen Legueu und Juvara, 1892 [7].



FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*. Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.2: Fotomontage der Metakarpophalangealregion zwischen dem 2. und 3. Metakarpalkopf, linke Hand, Ansicht von proximal.

1.2 Bandapparat der Metakarpophalangealregion 2.-5.

Die MCP-Region wird durch das *LMTP*, die palmare Platte, der Palmaraponeurose mit ihrem komplexen Fasersystem, dem Kapsel-Band-Apparat der MCP-Gelenke sowie dem Kreuzband A1 stabilisiert.

Das *LMTP* steht dabei in Verbindung zu diesen Strukturen, sodass es bei einer Krafteinwirkung, insbesondere bei Überstreckung eines Fingers, zu einer großflächigen Verteilung und Zerlegung der Kraft kommen kann [24, 75].

Grundlage zur Verteilung und Aufbrechung einer solchen Kraft ist nach Gratzner *et al.* [24] das komplexe Fasersystem bestehend aus dem *LMTP*, der palmaren Platte, Palmaraponeurose, den Faszien der umliegenden Muskulatur und deren Ursprung an den Knochen: Kommt es zu einer Überstreckung eines Fingers, werden die *Fasciculi longitudinales* der Palmaraponeurose gedehnt. Diese geben die Kraft über die *Legueu- und Juvara-Septen* zum einen nach dorsal an die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* weiter, sodass ein Teil der Kraft auf die Faszien der *Mm. interossei* und dann weiter erst auf die Metakarpalknochen, und von diesen auf die Karpalknochen bzw. auch auf die Bänder im Karpalbereich übertragen wird.

Zum anderen wird die Kraft über die *Legueu- und Juvara-Septen* weiter über den *Zancolli-Komplex* zu beiden Seiten an die palmaren Platten weitergeleitet. Diese geben die Kraft jeweils nach lateral auf das *LMTP* und nach dorsal auf den Kapselbandapparat der MCP-Gelenke weiter.

Über das *LMTP* verläuft die Kraft nach proximal auf die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* sowie weiter nach lateral, sodass sich die Belastung transversal über die MCP-Region verteilt. Ulnar kann die Kraft entlang des *LMTP* auf die Faszie der Hypothenarmuskulatur übertragen und schließlich an deren Ursprung am Knochen abgeleitet werden. Nach radial beschreiben Gratzner *et al.* einen „*Arcus adductorius*“². Dieser besteht aus den palmaren Platten des 2. und 3. Fingers, dem dazwischen verlaufendem *LMTP* sowie den *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* und kann die Kraft, insbesondere bei Überstreckung des 2. Fingers, nach proximal bis zu den Bändern im Karpalbereich ableiten. [24]

²Diese Einheit wird als *Arcus adductorius* bezeichnet, da sie die Kraft um das *Caput transversum* des *M. adductor pollicis* herumführt, welcher einen Ursprung vom 3. Metakarpalkörper bis zum *LMTP* aufweist [24].

1.2.1 Das Ligamentum metacarpale transversum profundum

Das *LMTP* (im Englischen *deep transverse metacarpal ligament* [1], *inter glenoid ligament* [50] oder *interpalmar plate ligament* [83]) wird als ein straffes, transversal verlaufendes Band beschrieben, welches in 3 Abschnitte zu untergliedern ist, da es die palmaren Platten der Köpfe der Metakarpalknochen 2-3, 3-4 und 4-5 miteinander verbindet (s. Abbildung 1.3) [1, 23, 71]. Dabei fixiert es die Metakarpalknochen 2 und 3 straffer als die ulnaren Metakarpalknochen 4 und 5 [1, 23]. Gosavi *et al.* beschreiben den Übergang des *LMTP* hin zur palmaren Platte zumeist als einen schleichenden, in nur wenigen Fällen der makroskopischen Arbeit als einen deutlich erkennbaren Übergang [23].

Das *LMTP* ist weniger als 1mm dick, wobei die Dicke von radial nach ulnar abnimmt. Zwischen den Metakarpalköpfen ist es bis zu 9mm lang und weist eine durchschnittliche Breite von proximal nach distal von bis zu 13mm auf [50].

Neben den Verbindungen mit den *Ligg. collateralia* sowie der Palmaraponeurose [1, 7, 55], geht das *LMTP* in proximaler Richtung in Faserauszüge über, welche als *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* bezeichnet werden. Diese sind über die Faszien der *Mm. interossei* mit den Metakarpalknochen und über die *Legueu- und Juvara-Septen* mit der Palmaraponeurose verbunden (s. Abbildung 1.3). [24, 75]

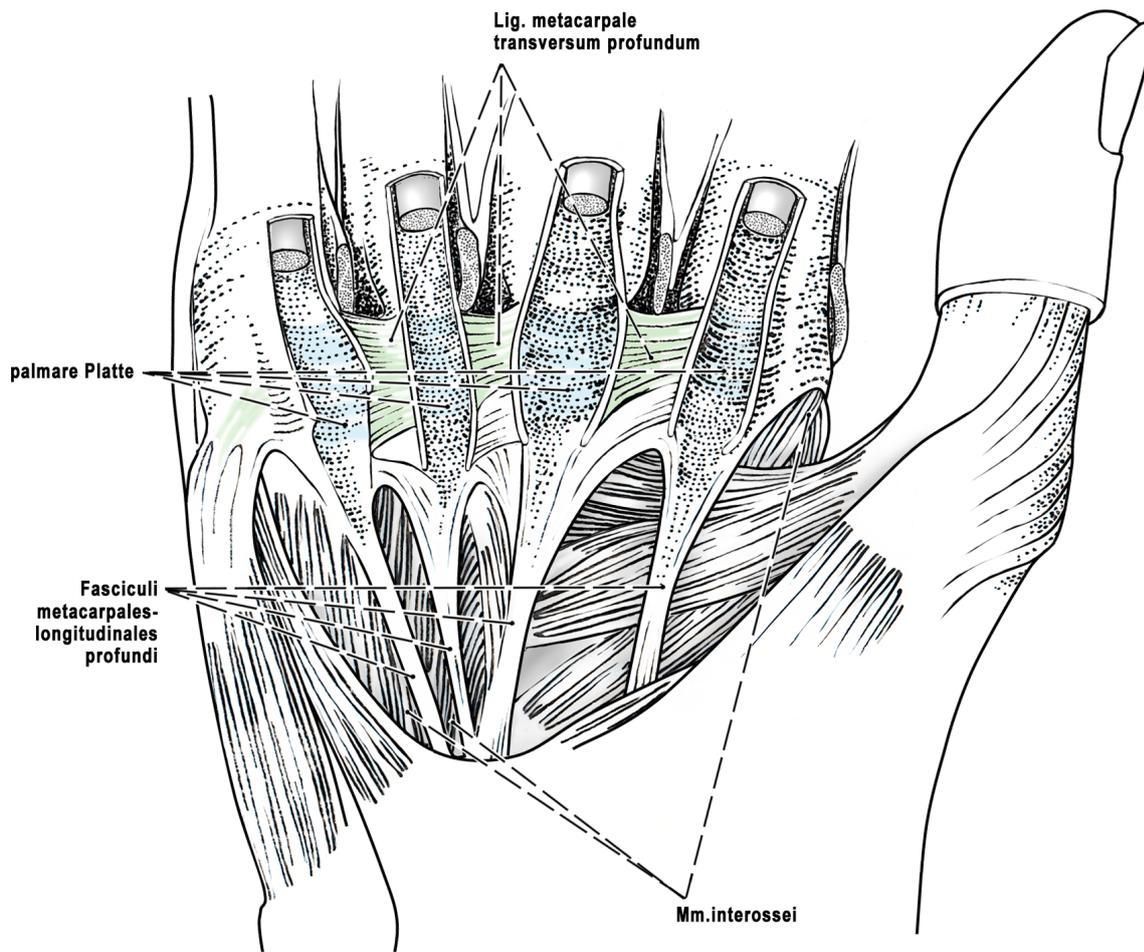
Somit weist das *LMTP* keine direkte, sondern nur eine indirekte Verbindung über die palmare Platte, den *Ligg. collateralia*, der Palmaraponeurose und den *Mm. interossei* zu den Metakarpalknochen auf [1, 7, 23, 24, 55, 71].

Desweiteren zeigt das *LMTP* einen Kontakt zu dem A1-Ringband [1, 71].

Al-Qattan und Robertson sowie Gosavi *et al.* beschreiben einen Ansatz der Hypothenarmuskulatur im *LMTP*, sodass in diesem Bereich des *LMTP* eine höhere Bewegung vorliegt [1, 23].

Die Funktion des *LMTP* liegt in der Stabilisierung sowie Verhinderung der Spreizung der Metakarpalknochen durch Fixierung der Metakarpalköpfe untereinander, in der zusätzlichen Führung der Sehnen des *FDP* und *FDS* sowie in der Haltung der Weichteilgewebe in ihrer Position durch die Verbindung des *LMTP* zu der Palmaraponeurose [71].

Gratzer *et al.* heben zudem noch die Funktion des *LMTP* zur Verteilung und Zerlegung von Kräften während der Überstreckung eines Fingers hervor [24].



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.3: Darstellung der *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi*: Diese weisen eine Verbindung zum *Lig. metacarpale transversum profundum* sowie zu den Faszien der *Mm. interossei* auf und verteilen die auf das *Lig. metacarpale transversum profundum* einwirkende Kräfte.

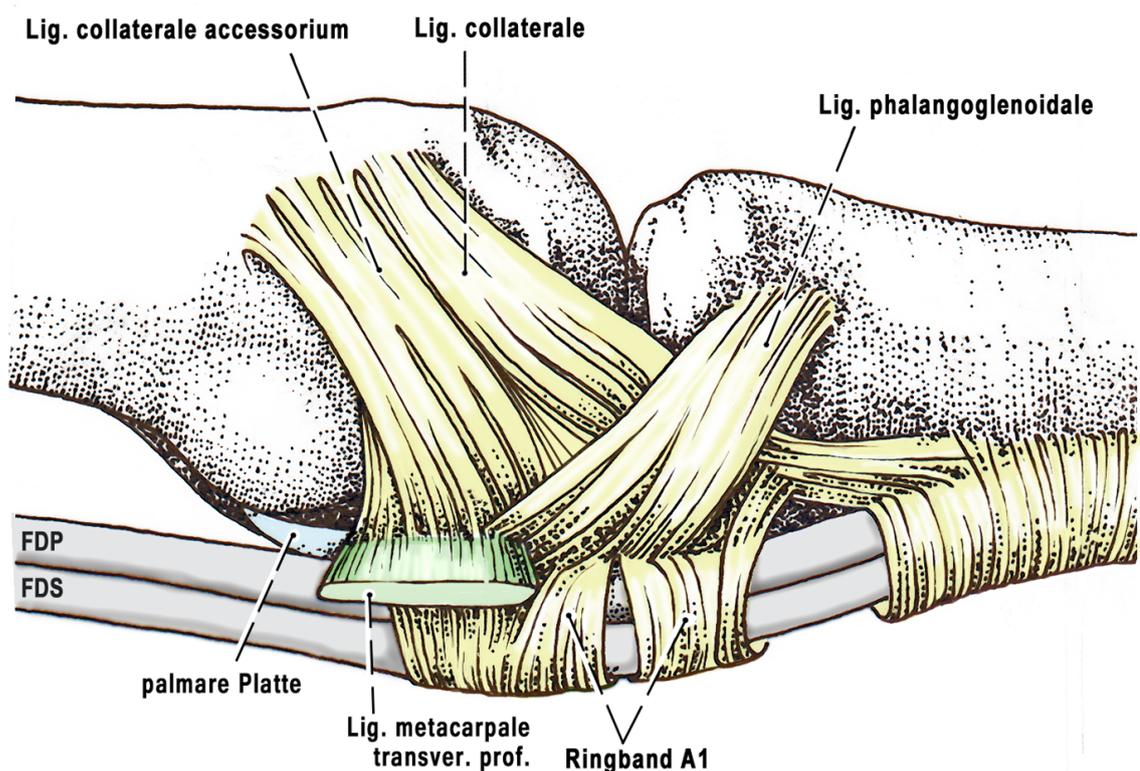
1.2.2 Kapselbandapparat der Metakarpophalangealgelenke

Das *LMTP* steht nach dorsal sowie radial des 2. und ulnar des 5. Metakarpalknochens im Kontakt mit den *Ligg. collateralia* (*Ligamentum (Lig.) collaterale* und *Lig. collaterale accessorium*) [1].

Das *Lig. collaterale* bildet zusammen mit dem *Lig. collaterale accessorium* und dem *Lig. phalangoglenoidale* die Gelenkkapsel der MCP-Gelenke (s. Abbildung 1.4).

Morphologisch betrachtet sind die MCP-Gelenke Kugelgelenke, besitzen aber nur 2 Freiheitsgrade, sodass eine *Flexion* (bis 90°) bzw. *Extension* (etwa 45°) sowie radiale und ulnare *Abduktion* möglich ist [36]. In flektierter Position beschränkt der Kapsel-Band-Apparat der MCP-Gelenke darüber hinaus eine Rotation sowie *Abduktion* der MCP-Gelenke, da dieser während der *Flexion* gespannt ist [71].

Zudem weisen Schmidt und Lanz dem *Lig. collaterale accessorium* und dem *Lig. phalangoglenoidale* der palmaren Platte sowie dem A1-Ringband eine stabilisierende Funktion zu, sodass die Sehnen des *FDP* und *FDS* eng am Metakarpalknochen gehalten werden und der nach palmar wirkenden Kraft dieser Sehnen entgegen wirken [71] (s. Abbildung 1.4).



FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.4: Kapselbandapparat der Metakarpophalangealgelenke: Die Gelenkkapsel wird aus den *Ligg. collaterale, collaterale accessorium et phalangoglenoidale* gebildet.

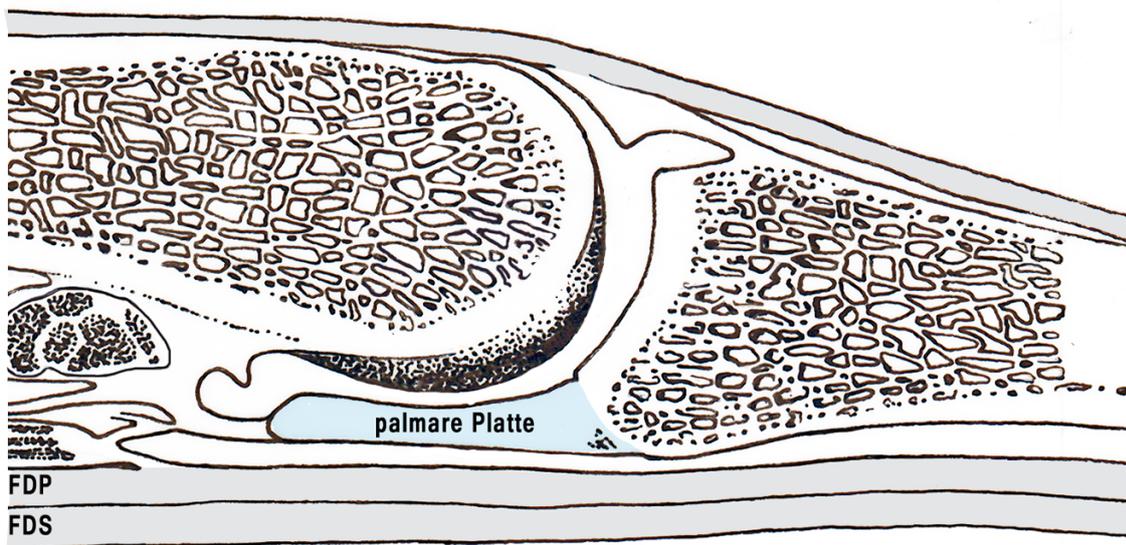
1.2.3 Die palmare Platte

Die palmare Platte wird auch als *Fibrocartilago palmaris*, *Lig. palmare* [78] oder im Englischen als *glenoid ligament* [50] oder *volar plate* [1] bezeichnet.

Die palmare Platte lässt sich in einen proximalen und distalen Anteil unterscheiden: Der proximale Anteil hat seinen Ursprung palmar an dem Metakarpalkopf und hat eine schwache Befestigung, da er aus lockerem Bindegewebe besteht. Nach distal weist das Band zunehmend mehr Faserknorpel auf und setzt schließlich an der Basis des *Phalanx proximalis* an (s. Abbildung 1.5). [71, 78]

Der distale Bereich der palmaren Platte ist mit dem *LMTP* [71], der proximale Anteil mit dem A1-Ringband verbunden [23]. Beide Anteile stehen nach dorsal zudem in Verbindung mit den *Ligg. collateralia* [71].

Funktionell ermöglicht der proximale Anteil eine Mitverschiebung der palmaren Platte während der *Flexion* und *Extension*, der distale Anteil wirkt zusammen mit dem *LMTP* der *Hyperextension* eines Fingers entgegen [71, 78].



FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.5: Darstellung der palmaren Platte mit einer am Metakarpalkopf schwachen und einer am *Phalanx proximalis* festen Anheftung.

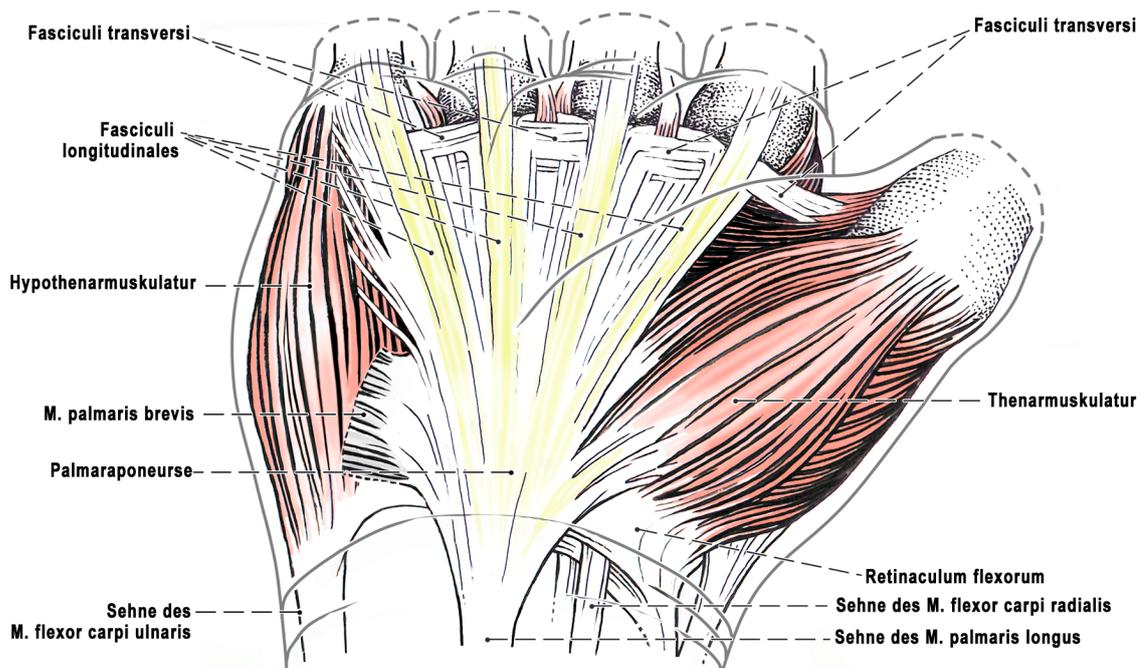
1.2.4 Die Palmaraponeurose

Die Palmaraponeurose (*Aponeurosis palmaris* [18]) ist ein komplexes System aus längs-, schräg-, und querverlaufenden Fasern, welche dreieckförmig zwischen dem *Retinaculum flexorum* bzw. der Sehne des *M. palmaris longus* und den Faszien der Hypothenar- und Thenarmuskulatur verbunden ist (s. Abbildung 1.6).

Nach distal verläuft die Palmaraponeurose weiter in 4 *Fasciculi longitudinales* (auch „prä tendineale Stränge“), welche durch tiefer liegende *Fasciculi transversi* mit den MCP-Gelenken verbunden sind (s. Abbildung 1.6).

Dorsal verbinden sich die vertikal verlaufenden *Legueu- und Juvara-Septen* der *Fasciculi transversi* mit der palmaren Fläche der *LMTP* und bilden radial und ulnar der Sehne des *FDP* und *FDS* 8 Septen. Dabei bilden diese 7 Zwischenräume, welche 4 mal die Sehnen des *FDP* und *FDS* und 3 mal die *Mm. lumbricales* mit den begleitenden Leitungsbahnen beinhalten.

Die Palmaraponeurose schützt beim Greifen von Gegenständen die dorsal liegenden Strukturen. [55, 72, 75]



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.6: Darstellung der Palmaraponeurose und den nach distal weiter verlaufenden *Fasciculi longitudinales*: Diese weisen eine Verbindung zu den *Fasciculi transversi* und somit indirekt zum *Lig. metacarpale transversum profundum* auf.

1.3 Muskulatur in der Metakarpophalangealregion 2.-5.

In der MCP-Region verlaufen mehrere Muskeln, die eine Beziehung zu dem *LMTP* aufweisen: Die Sehnen des *FDP* und *FDS*, die *Mm. lumbricales*, *Mm. interossei* sowie die Muskeln der Hypothenarmuskulatur (s. Abbildung 1.7).

Die *Mm. interossei* verlaufen dorsal des *LMTP* und stehen über die *Fasciculi metacarpales longitudinales profundi* mit dem *LMTP* in Kontakt (s. Abbildung 1.3). Dadurch werden die auf den Bandapparat einwirkenden Kräfte in Folge einer Überstreckung eines Fingers auf die Faszien der *Mm. interossei* weitergeleitet, welche ihrerseits diese Kräfte über ihren Ursprung an die Metakarpalknochen fortleiten. [24]

Nach ulnar werden Kräfte entlang des *LMTP* auf die Faszien der Hypothenarmuskulatur fortgeleitet, sodass es auch an dieser Stelle zu einer Ableitung von Kräften kommt [24, 72]. Darüber hinaus beschreiben Al-Qattan und Robertson einen Ansatz des *M. abductor digiti minimi* (*AbDM*) sowie des *M. flexor digiti minimi* (*FDM*) und Gosavi *et al.* einen Ansatz des *M. opponens digiti minimi* (*ODM*) im *LMTP*, sodass in diesem Bereich des *LMTP* eine höhere Bewegung vorliegt. [1, 23]

Die Sehnen des *FDP* und *FDS* verlaufen palmar der palmaren Platte und weisen über ihre Sehnenscheide einen Kontakt zu dem *LMTP* auf (s. Abbildung 1.8). Das *Stratum fibrosum* der Sehnenscheide bildet die Ringbänder (*Ligg. anularia*), von denen das A1-Ringband proximal der MCP-Gelenke liegt und einen Kontakt zu der palmaren Platte, zu dem *LMTP* sowie zu der Kapsel der MCP-Gelenke aufweist. [36, 71]

Somit unterstützen diese Bandstrukturen eine stabilisierende Führung der Sehnen [71].

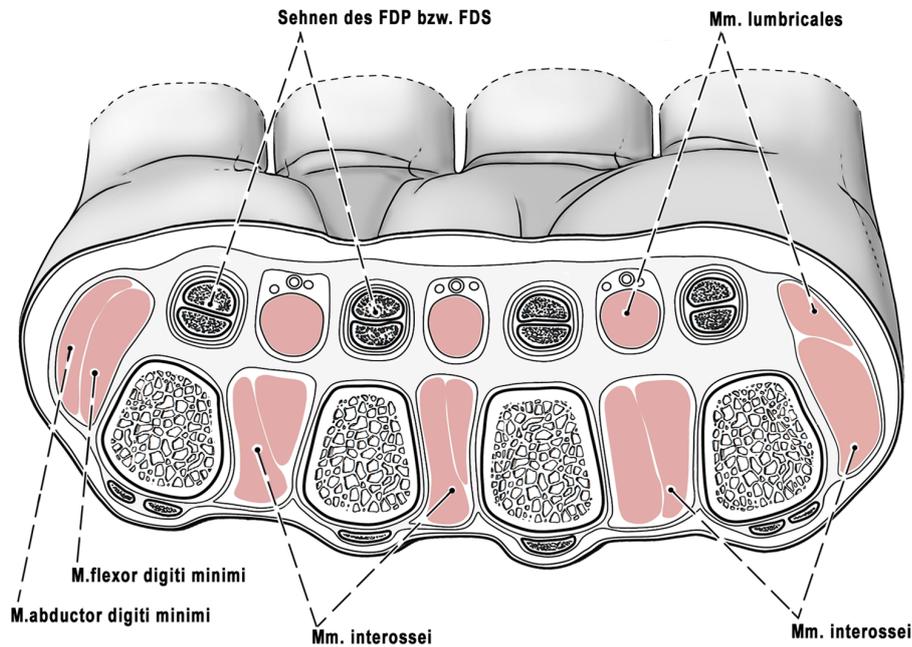
Die *Mm. lumbricales* verlaufen palmar des *LMTP* und weisen keine Verbindung zu dem *LMTP* auf (s. Abbildung 1.8). Allerdings werden sie durch ihre Begrenzung zwischen dem *LMTP* sowie der Palmaraponeurose in ihrer Lage stabilisiert. [71]

Sie führen zu einer *Flexion* in den MCP-Gelenken [18] und Wang *et al.* heben zudem eine sensorische Funktion für schnelle und präzise Bewegungen hervor [83].

Die Ursprünge, Ansätze, Innervation sowie Funktionen der Muskulatur sind in Tabelle 1.1 [18] zusammengefasst.

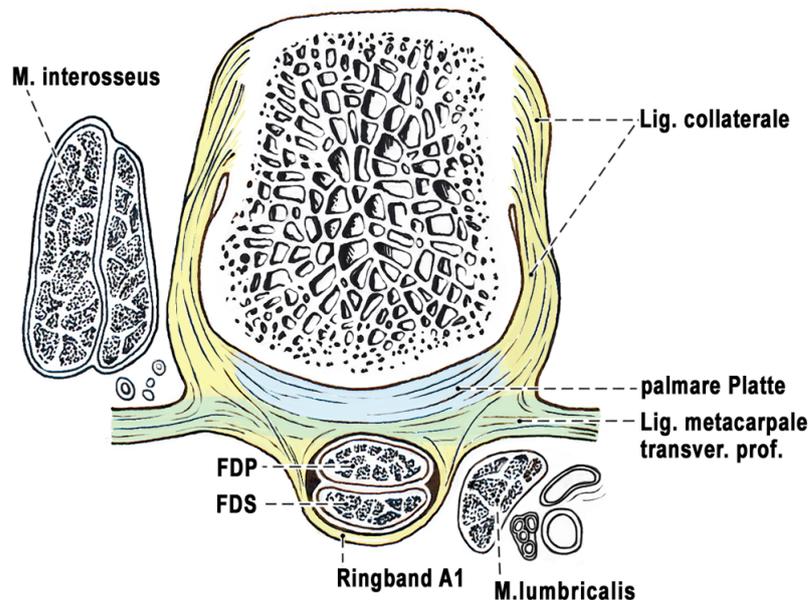
Die *Mm. interossei palmares et dorsales* werden als eine Muskelgruppe zusammengefasst. Der *M. palmaris brevis*, welcher ebenfalls zu der Hypothenarmuskulatur gehört, wird in dieser Dissertation nicht aufgeführt, da dieser Muskel nicht im Bereich der Metakarpophalangealregion 2.-5. liegt.

1.3. MUSKULATUR IN DER METAKARPOPHALANGEALREGION 2.-5.



FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.7: Schematische Darstellung der in der Metakarpophalangealregion verlaufenden Muskulatur: Die *Mm. lumbricales* verlaufen palmar, die *Mm. interossei* dorsal des *Lig. metacarpale transversum profundum*.



FDP=Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, FDS=Sehne des *M. flexor digitorum superficialis*. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.8: Querschnitt auf Höhe eines Metakarpalkopfes mit Darstellung der umliegenden Muskulatur sowie des Kapselbandapparates.

Tabelle 1.1: Tabellarische Zusammenfassung des Ursprungs, Ansatzes, Funktion und Innervation der Muskulatur in der MCP-Region nach Drenckhahn [18]. Die *Mm. interossei palmares et dorsales* werden als eine Muskelgruppe zusammengefasst.

	Ursprung	Ansatz	Funktion	Innervation
M. flexor digitorum superficialis	Epicondylus medialis Processus coronoideus ulnae	Mittelfalhanx 2.-5.	Flexion der Finger 2.-5. (Grund- und Mittelgelenk) Flexion des Handgelenkes	N. medianus (C7-Th1)
M. flexor digitorum profundum	Vorderfläche der Ulna Fascia antebrachii Membrana interossea	Endphalanx 2.-5.	Flexion der Hand- und aller Fingergelenke 2.-5.	2.+3. Finger: N. medianus (C7-Th1) 3.+4. Finger: N. ulnaris (C7-Th1)
Mm. lumbricales I-IV	Selnen des M. flexor digitorum profundum	Dorsalaponeurose der Finger 2.-5.	Extension der Mittel- und Endgelenke 2.-5. Beugung des Mittelgelenkes 2.-5.	I+II: N. medianus (C8-Th1) III+IV: N. ulnaris (C8-Th1)
Mm. interossei	Metakarpalknochen 1.-5.	Dorsalaponeurose der Finger 2.-4. Basis der Grundphalanx 2.-4.	Flexion der Fingergrundgelenke 2.-5. Extension der Fingermittelgelenke 2.-5. Abduktion bzw. Adduktion	N. ulnaris (C8-Th1)
M. abductor digiti minimi	Os pisiforme Lig. pisohamatum	Grundphalanx und Dorsalaponeurose des 5. Fingers palmarare Platte	Flexion des Grundgelenkes Extension des Mittel- und Endgelenkes Abduktion	N. ulnaris (C8-Th1)
M. flexor digiti minimi brevis	Hamulus ossis hamati Retinaculum flexorum	palmar an Basis der Grundphalanx des 5. Fingers	Flexion des Grundgelenkes	N. ulnaris (C8-Th1)
M. opponens digiti minimi	Hamulus ossis hamati Retinaculum flexorum	ulnar an Basis der Grundphalanx des 5. Fingers	Opposition Verstärkung der Hohlhand	N. ulnaris (C8-Th1)

1.4 *Klinische Relevanz der Metakarpophalangealregion 2.-5.*

Die klinischen Beispiele aus dem Bereich der Weichteiltumoren, rheumatischen Erkrankungen sowie nach Traumata verdeutlichen die Einschränkungen in der Funktionsfähigkeit der Hand bzw. der Finger (z.B. bei der Greiffunktion, Öffnung der Faust, Beweglichkeit der Finger) und die Instabilität des Bändergerüsts bei Verletzungen und Erkrankungen der Gewebe in der MCP-Region.

Die Autoren beschreiben die Ursachen, den Krankheitsverlauf und Therapiemöglichkeiten. Sie gehen jedoch nicht auf die Veränderungen der sensorischen Inputs oder postoperativen Störungen in der Feinmotorik und Koordination ein. Nur Josty *et al.* berichten von einem Patienten mit rupturiertem *LMTP*, der postoperativ Schwierigkeiten im Umgang mit der Schere hatte [45].

Fibromatosen gehören zu der Gruppe der „Gutartigen Weichteiltumoren“ und betreffen das Bindegewebe. Sie wachsen lokal destruierend und infiltrativ und lassen sich in oberflächliche (*Morbus Dupuytren*, *Morbus Ledderhose*, *Morbus Peyronie*, *Morbus Knuckle-Pads*), tiefe (*Morbus Ormond*, *Desmoidtumor*) und infantile Fibromatosen (*Infantile digitale Fibromatose*, *Fibromatosis colli*) einteilen. [79]

Die Hand ist insbesondere durch den *Morbus Dupuytren* (Palmarfibromatose) betroffen, der sich in einer Verkürzung der Palmaraponeurose und der daraus folgenden Beugekontraktur besonders im Bereich des 4. und 5. Fingers zeigt [36, 79].

Männer sind erheblich häufiger betroffen als Frauen (9:1) [66] und die Erkrankung tritt in der Regel ab dem 40. Lebensjahr auf. Als Auslöser gelten lokale Verletzungen, Neoplasien, genetische Faktoren und Entzündungen sowie die Assoziation mit Diabetes mellitus, dem gesundheitsschädlichen Genuss von Alkohol und/oder Nikotin und einer Hypercholesterinämie. Die Pathogenese ist nicht umfassend geklärt, aber es ist bekannt, dass funktionell veränderte *Myofibroblasten* durch Synthese extrazellulärer Proteine zu einer Fibrose führen. [55]

Es entstehen Verhärtungen, Knoten oder Stränge, die mit einer Verkürzung der betroffenen Palmaraponeurose einhergehen. Diese verursachen, aufgrund ihrer Verbindung mit den Sehnscheiden der *FDP* und *FDS*, eine *Flexion* der MCP-Gelenke wie auch der Interphalangealgelenke, sodass die Öffnung der Faust deutlich erschwert ist. Des Weiteren kann die *Abduktion* der Finger eingeschränkt sein, wenn insbesondere die *Legueu- und Juvara-Septen* mit betroffen sind. [18, 55, 66]

Am häufigsten sind die *Fasciculi longitudinales*, grundsätzlich kann aber jede Struktur der Palmaraponeurose betroffen sein [55, 66].

Nach erfolgloser konservativer Therapie erfolgt eine chirurgische Behandlung durch partielle (*Aponeurotomie*) bis hin zur kompletten Entfernung der Palmaraponeurose (*Palmarfaszienresektion*, *Dermofasziektomie*) [36, 55]. Die weniger invasive *Aponeurotomie* zeigt eine hohe Rezidivrate von 50%. Eine radikale Resektion (*Palmarfaszienresektion*, *Dermofasziektomie*) wird zur Prophylaxe von schwer zu behandelnden Rezidiven gewählt und mit Hauttransplantaten werden Rezidive nahezu verhindert. [55]

Die *Rheumatoide Arthritis* (*chronische Arthritis*) beschreibt eine chronisch-entzündliche, rheumatische und systemische Erkrankung [56, 77]. Sie ist die Häufigste aus dem Bereich der rheumatoiden Erkrankungen und zeigt eine Prävalenz von 0,5-1% [80]. Dabei kommt es zu einer Autoimmunantwort aufgrund von multimodalen Faktoren wie Umweltantigenen (Bakterien, Viren, Ernährung etc.), genetischer Veranlagung und psychosozialen Stressfaktoren. Diese richtet sich gegen die *Membrana synovialis* der Gelenke (*Synovialitis*) und führt durch eine Entzündung letztlich zu einer Knorpel- und Gelenkzerstörung. [59, 77]

Frauen sind häufiger als Männern betroffen (3:1) und das Manifestationsalter liegt vor dem 35. bzw. nach dem 52. Lebensjahr [80].

Typische Beschwerden sind zu Beginn Schmerzen und Schwellungen an den MCP-Gelenken 2.-5. (häufig als Erstes betroffen), den proximalen Interphalangealgelenken sowie im Handgelenk und eine Morgensteifigkeit der Gelenke. Da es sich um eine systemische Erkrankung handelt, können grundsätzlich alle Gelenke sowie auch innere Organe betroffen sein. [59, 77] Im Verlauf wird die *Rheumatoide Arthritis* häufig von einer *Tendovaginitis* begleitet, die nach einer Studie von Gray und Gottlieb (1977) am Häufigsten die Sehnen des *FDP* und *FDS* des 3. Fingers auf Höhe des Handgelenkes, des proximalen Interphalangealgelenkes und der MCP-Gelenke betrifft [25].

Im Spätstadium zeigt sich eine Destruktion sowie Deformation der Fingergelenke, welche für den Patienten massive funktionelle Einschränkungen bedeuten, sodass in der Regel eine operative Behandlung erfolgt. [59, 77]

Durch die Ruptur der palmaren Platte, aufgrund von Pannusbildung sowie der *Synovialitis*, kommt es zu einer Deformation der MCP-Gelenke [77]. Es folgt eine palmare (Sub)-Luxation der *Phalanx proximalis* und durch die Zugkraft der *Mm. interossei* zu dem klinischen Bild der Schwanenhalsdeformität [56].

Desweiteren löst sich, aufgrund der *Synovialitis*, die palmare Platte sowie die Anheftung der Sehnen der *FDP* und *FDS* vom Metakarpalkopf. Die Sehnen der *FDP* und *FDS* bewirken eine permanente, ulnare Luxation. Durch die Gelenkinstabilität kommt es zudem zu einer Ruptur der *Ligg. collateralia*. [56]

Die Therapie richtet sich nach der Aktivität der Erkrankung und besteht aus pharmakologischen, physikalischen, sowie operativen Methoden (z.B. *Synovektomie* und rekonstruktive Therapien). Die Progredienz der Erkrankung wird zu 70% durch die *Synovektomie* nicht verhindert. [56]

Das 2. und 3. Gelenk sind typischerweise die isoliert betroffenen MCP-Gelenke bei der *Fingerpolyarthrose* [46]. Allerdings sind die MCP-Gelenke, neben den proximalen und distalen Interphalangealgelenken sowie dem Daumensattelgelenk, insgesamt selten betroffen (Prävalenz zwischen 2-3%) [2]. Die *Psoriasisarthritis* betrifft alle Fingergelenke („Strahlbefall“) und führt zu Manifestationen an der Haut [46].

1.4. KLINISCHE RELEVANZ DER METAKARPOPHALANGEALREGION 2.-5.

Bei der *Tendovaginitis stenosans*³, können die Sehnen des *FDP* und *FDS* aufgrund von Schwellungen bzw. Knotenbildungen in der Sehnenscheide, meist am A1-Ringband der MCP-Gelenke, nicht mehr reibungslos gleiten. Die Ursachen sind vielfältig, aber zu Grunde liegt der Erkrankung eine Entzündung wie bei rheumatischen Erkrankungen oder vermehrte Belastung bei Fingertätigkeiten im Beruf oder Sport. Frauen über dem 50. Lebensjahr sind mit einer Prävalenz von 1,3% häufiger betroffen als Männer (0,5%) [82]. Die Patienten beklagen weniger Schmerzen, sondern einen vermehrten Kraftaufwand, den Finger, meist der rechten Hand mit Mittel- und Ringfinger, zu strecken und zu beugen. Dies ist mit einer ruckartigen Bewegung des Fingers verbunden. Therapeutisch wird eine Durchtrennung des A1-Ringbandes empfohlen. Nur selten treten Komplikationen auf (z.B. Adhäsionen zwischen Sehnenscheide und Sehne) und nach wenigen Wochen ist eine volle Belastbarkeit möglich. [8, 47, 81]

Von den 60 342 registrierten Verletzungen des Handgelenkes und der Hand (einschließlich Fingern) vollstationärer Patienten im Jahr 2015 haben fast 40% Knochenbrüche ausgemacht [74].

Knochenfrakturen der Finger (60% der Frakturen) wie auch der Mittelhand (30%) [78] sind häufige Verletzungen, welche nur selten übersehen werden. Sie entstehen aus direkter Gewalteinwirkung, doch auch durch Infekte oder Tumoren. Neben der Fraktur des Knochens kann auch das umliegende Weichteilgewebe beschädigt sein. Die meisten Frakturen können konservativ behandelt werden, erst bei instabilen und offenen Frakturen oder bei Gelenkbeteiligung muss operiert werden (Osteosynthesetechniken, Schrauben, Drähte). [78]

Verletzungen der *Ligg. collateralia* der MCP-Gelenke oder der palmaren Platte sind selten und entstehen meist beim Sport (Ballspiele wie Volleyball oder Basketball, Turnen, Kampfsportarten). Die *Ligg. collateralia* rupturieren, wenn der Finger während der Krafteinwirkung nach radial bzw. ulnar abduziert ist, die palmare Platte durch *Hyperextension* eines Fingers. Der betroffene Finger lässt sich überstrecken oder weist eine Seiteninstabilität auf und ist in seiner Bewegung stark eingeschränkt. Erst bei einer komplexen Bandinstabilität, größeren Abrissfragmenten oder offenen Verletzungen hat eine operative Behandlung zu erfolgen, ansonsten kann konservativ behandelt werden. Konkrete Angaben zu der Häufigkeit von postoperativen Bewegungseinschränkungen wie Streckdefiziten sind in der Literatur nicht angegeben. [78]

Eine Ruptur des *LMTP*, z.B. durch einen Sturz auf die Hand verursacht, ist eine sehr seltene und leicht zu übersehende Verletzung, die in der Literatur lediglich in Fallbeispielen beschrieben wird [33, 45, 50, 70, 86].

Al-Qattan und Robertson sowie Gosavi *et al.* zeigen, dass das *LMTP* die ulnaren Metakarpalköpfe weniger straff fixiert als die radialen [1, 23]. In den Fallbeispielen war das *LMTP* im ulnaren Handbereich rupturiert [33, 45, 50, 70, 86].

Ein rupturiertes *LMTP* zeigt sich in der Hypermobilität sowie Fehlstellungen des Metakarpalkopfes nach palmar und/oder ulnar unter *Flexion*, welche sich nur passiv beheben lässt.

Die Patienten berichten von Schmerzen, welche durch Kompression der Metakarpalköpfe aneinander und bei Greifen von Gegenständen forciert werden. Sie leiden unter einer Funk-

³ „*Tendovaginitis stenosans de Quervain*“ betrifft die Sehnenscheide im 1. Sehnenfach (mit *Mm. abductor pollicis longus et brevis*), die Sehnenfächer 2.-6. werden als „*Tendovaginitis stenosans* im Sinne des *Digitus saltans* (schnellender Finger)“ bezeichnet [8].

tionseinschränkung wie verminderter Fingerbeweglichkeit und reduzierter Griffstärke. Als chirurgische Therapie werden Kirschner-Drähte zwischen den Metakarpalköpfen verwendet [45, 50, 70], die A1-Ringbänder miteinander fixiert [45, 86] oder das *LMTP* durch die Sehne des *M. palmaris longus* rekonstruiert [33].

Die Funktionseinschränkungen verbesserten sich durch die Behandlung, sodass alle Patienten dieser Fallbeispiele schmerz- und beschwerdefrei wurden. Allerdings gab es postoperativ eine Reduzierung von feinmotorischen Greiffunktionen (z.B. Benutzen einer Schere): In diesem Fallbeispiel war das *LMTP* zwischen dem 3. und 4. Finger, sowie zwischen dem 4. und 5. Finger rupturiert und wurde durch Fixierung der A1-Ringbänder untereinander therapiert. [45]

1.5 Anatomie der Propriozeptoren

Deutschsprachige Standardreferenzen wie der „Benninghoff“ beschreiben Propriozeptoren als „Spannungs- und Dehnungssensoren, die Informationen über Stellung und Bewegung der Extremitäten und die Haltung des Körpers liefern“ [17]. In der Literatur wird diese passive, sensorische Eigenschaft der Propriozeptoren darüber hinaus mit einer aktiven Funktion verbunden und Dhillon *et al.* fassen die Bedeutung der Propriozeption zusammen als: „*Proprioception [...] has three components: A static awareness of joint position, awareness/detection of movement and acceleration, and a closed loop efferent activity, which starts reflex response and regulates muscles.*“ [16]

Grundsätzlich lassen Propriozeptoren sich in ihrer Histomorphologie, Lokalisation und ihrem Adaptationsverhalten unterscheiden.

Iggo teilte 1977, und gemeinsam mit Andres 1982, die Morphologie der Propriozeptoren in kapsuläre und nicht-kapsuläre ein sowie ferner in freie Nervenendigungen, Thermorezeptoren und Nozizeptoren [41, 42].

Kapsuläre Propriozeptoren befinden sich in der *Dermis*, *Subcutis*, an Bändern und Gelenken und weisen gemeinsame Merkmale auf: Die Kapsel besteht aus Perineuralzellen, welche unterschiedlich viele Schichten bilden. Im *subkapsulären* Raum liegen Kollagenfasern, *Fibroblasten* wie auch *Makrophagen* und beim Eintreten durch die Kapsel verliert der Nerv seine Myelinscheide, die in die Kapsel übergeht (s. Abbildung 1.9).

Nicht-kapsuläre Propriozeptoren liegen in der *Epidermis* und werden wie freie Nervenendigungen, Thermorezeptoren und Nozizeptoren in dieser Dissertation nicht weiter beschrieben. [41, 42]

Freeman und Wyke untersuchten 1967 die Innervation des Kniegelenkes an Katzen und klassifizierten 4 Typen an Propriozeptoren, die sich in Morphologie, Größe, Lokalisation, Funktion und Durchmesser des afferenten Nervens unterscheiden. Diese Klassifikation ist bis heute Grundlage für entsprechende Arbeiten (s. Tabelle 1.2, Typ 4 (entspricht freien Nervenendigungen) ist nicht mit aufgeführt). [19]

Propriozeptoren weisen eine selektive Empfindlichkeit auf, die durch Schwellenwerte bestimmt wird: Wenn sie z.B. mechanische Reize messen, haben sie einen hohen Schwellenwert für Temperaturreize und einen geringen Schwellenwert für mechanische Reize.

Zudem lassen sie sich in langsam (*slow-adapting (SA)*) und schnell (*rapid-adapting (RA)*) adaptierende Propriozeptoren einteilen:

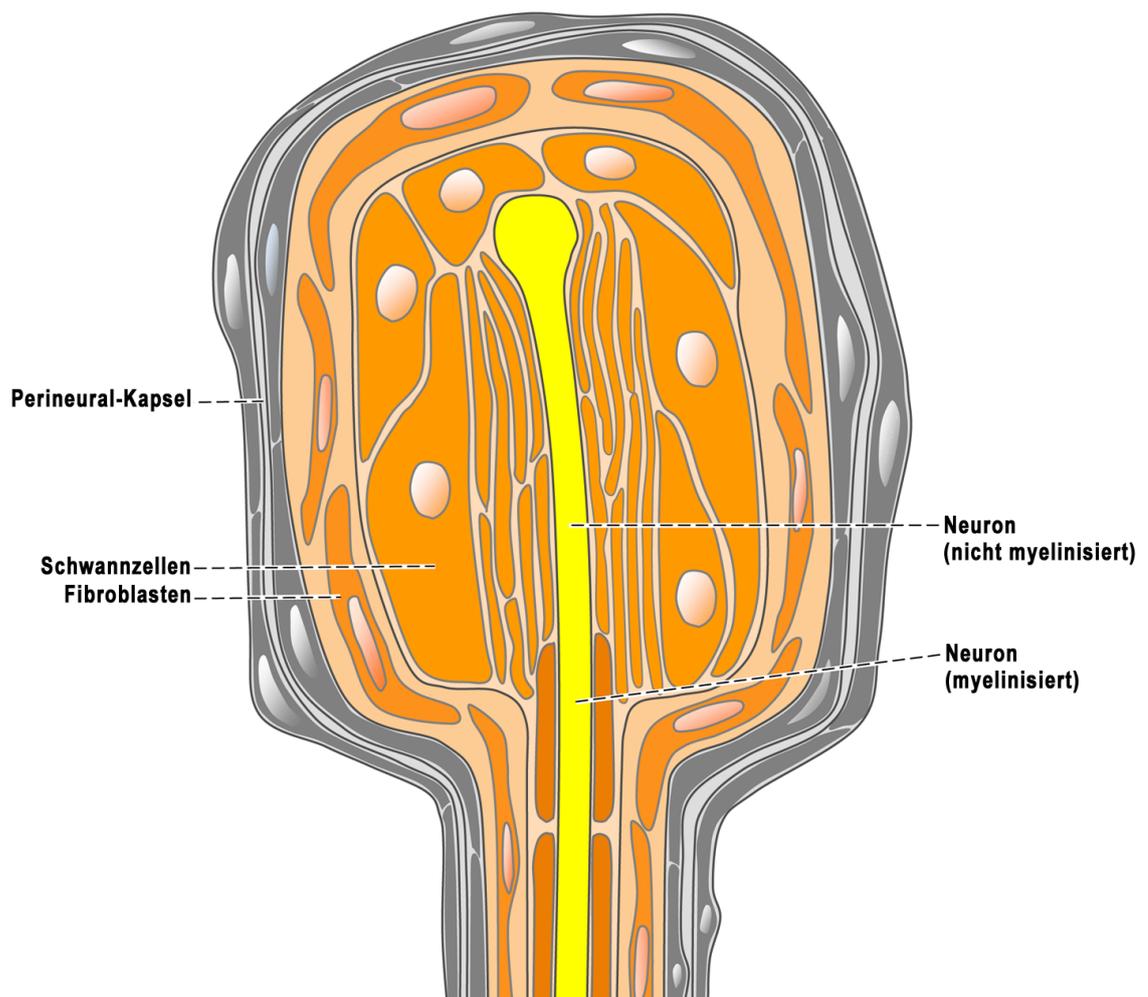
SA-1 Propriozeptoren messen die Reizänderung sowie die folgende Reizdauer. *SA-2* Propriozeptoren haben eine Ruheentladung, die sich bei einem Reiz ändert und sich bei langanhaltenden Reizen erneut auf eine neue Ruheentladung einstellt.

Schnell adaptierende Propriozeptoren nehmen die Reizänderung wahr und messen Beschleunigungen und Vibrationen. [41, 42]

Die Benennung der nachfolgenden Propriozeptoren (mit Ausnahme der Muskelspindeln) erfolgte nach den Erstbeschreibern und weiter bietet Tabelle 1.3, ergänzend zur Beschreibung der Propriozeptoren, eine Übersicht über Morphologie und Lokalisation. Die Lokalisation der Propriozeptoren bezieht sich dabei auf die Haut und das Bewegungssystem, das Vorhandensein von Propriozeptoren in Organen ist nicht berücksichtigt.

Tabelle 1.2: „*Characteristics of articular nerve endings.*“ Klassifikation der Propriozeptoren nach Freeman und Wyke [19]. Typ 4 (freie Nervenendigungen) ist nicht mit aufgelistet.

Type	Primary morphological features	Average dimensions m	Location	Diameter of parent nerve fibre (m)	Principal functional characteristics	Previous eponymous or descriptive designations
I	Globular or ovoid corpuscles. Fine capsule (1-2 layers). Arborizing nerve terminal. Linked in clusters of 3-6 corpuscles.	100*40	Fibrous capsule (diffuse in peripheral layers) (A few on extrinsic ligaments, and in paraarticular periosteum and related tendons).	5-8 (small myelinated)	Mechanoreceptor, afferent (low threshold, slowly adapting).	Ruffini ending. Golgi Mazzoni ending. Meissner corpuscle. Spraytype ending. Basket ending. Ball of thread ending. Bush like ending.
II	Cylindrical or conical corpuscles. Thick laminated capsule (up to 10-12 layers). Single nerve terminal: may be bifid or trifid. Linked in clusters of 2-3 corpuscles.	280*120	Fibrous capsule (in groups in deeper layers, fibro-adipose junctions, fat pads. Near blood vessels)	8-12 (medium myelinated)	Mechanoreceptor, afferent (low threshold, rapidly adapting).	Krause's Endkörperchen. Vater'schen Körper. Pacinian corpuscle. Modified Pacinian corpuscle. Paciniform corpuscle. Golgi-Mazzoni body. Meissner corpuscle. Gelenknervenkörperchen. Corpuscle of Krause. Clublike ending. Bulbous corpuscle. Corpuscula nervosa articularia.
III	Fusiform corpuscles. Thin capsule (1-3 layers). Densely arborizing nerve terminal. Usually single, but occasionally linked in clusters of up to 3 corpuscles.	600*100	Ligaments (intrinsic and extrinsic). (Also in related tendons).	13-17 (large myelinated)	Mechanoreceptor, afferent (high threshold, very slowly adapting).	Golgi ending. Golgi Mazzoni corpuscle.



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.9: Schematische Darstellung der gemeinsamen Merkmale eines kapsulären Propriozeptors: Im *subkapsulären* Raum liegen Kollagenfasern, *Fibroblasten* und *Makrophagen*, beim Eintreten durch die Kapsel (Perineuralzellen) verliert der Nerv seine Myelinschicht.

1.5.1 Ruffini-Körperchen

Ruffini-Körperchen (RuK)⁴ besitzen Verzweigungsäste eines einzelnen afferenten Nervens, *endoneurales* Bindegewebe sowie gegebenenfalls eine Kapsel (s. Abbildung 1.10) [32].

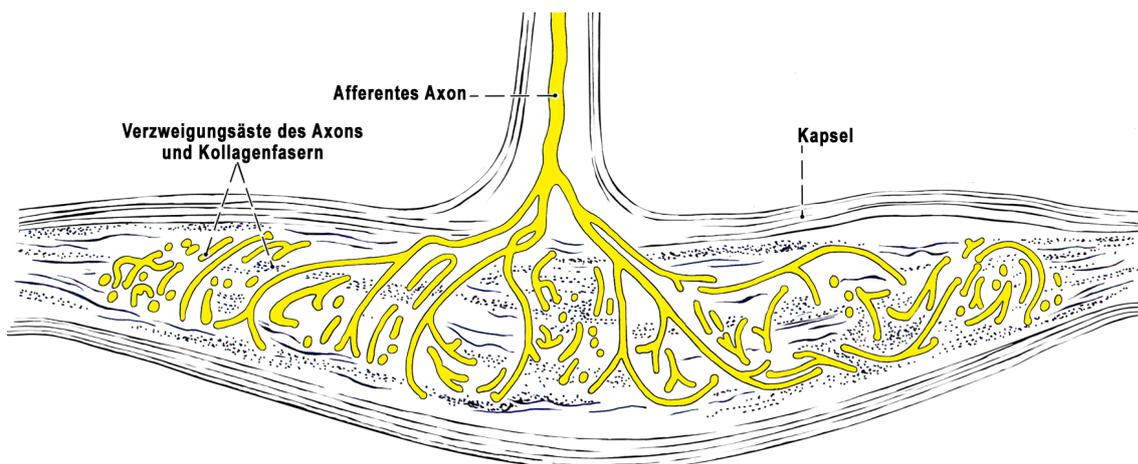
Halata beschreibt, dass in Bändern mit parallel angeordneten Kollagenfasern die RuK eine Kapsel besitzen, in Gewebe mit Kollagenfasern ohne gerichtete Orientierung aber Lücken in der Kapsel bestehen können. Kleine RuK (etwa $20\mu\text{m}$) können auch keine Kapsel besitzen (s. Tabelle 1.3). [32]

Das afferente und myelinisierte Axon (ca. $5\mu\text{m}$ groß) erreicht das RuK an der Längsseite und tritt dort durch die Kapsel ein. Dabei geht die Myelinscheide des Axons in die Kapsel über und das Axon verzweigt sich auf (s. Abbildung 1.10). [31]

Das *endoneurale* Gewebe besteht aus Kollagenfasern und *Fibrozyten* [30, 32]. Halata stellt zudem fest, dass sich auch elastische Fasern und Blutgefäße in dem *endoneuralem* Gewebe befinden (s. Tabelle 1.3) [32]. Die Kollagenfasern durchlaufen das RuK, sind dabei eng assoziiert mit den Nervenfasern und verlassen den Propriozeptor an seinen zu beiden Seiten offenen Polen, um dann mit den um den Propriozeptor umherliegenden Kollagenfasern wieder zusammen zu verlaufen [41].

RuK haben einen Durchmesser von $20\text{--}500\mu\text{m}$ und sind spindelförmig [32, 37], die Struktur kann jedoch variieren, z.B. ovoidförmig (s. Abbildungen 1.10 und Tabelle 1.3) [30, 32, 37]. Sie sind langsam adaptierende Propriozeptoren mit einem niedrigen Schwellenwert, gehören zu den *SA-2* Propriozeptoren [41] und reagieren auf sich ändernde Reize wie Dehnungs- und Druckänderungen wie auch auf Zugspannungen in Gelenkkapseln [30, 32, 42, 90].

Aufgrund ihrer Histomorphologie und ihrer Lage in der *Dermis*, an der Gelenkkapsel, Bändern, Sehnen und am gelenknahen *Periost* [19, 44, 84] ist die Erfassung der Gelenkposition [28, 67] sowie der Geschwindigkeit und des Ausmaßes von Bewegungen [44] möglich. Zimny *et al.* stellen zudem heraus, dass die RuK neben der Gelenkposition auch die Bewegungsgrenze während der *Extension* des Gelenkes registrieren (s. Tabelle 1.3) [90].



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.10: Darstellung eines Ruffini-Körperchens: Das Axon tritt in der Längsseite des Propriozeptors ein und verzweigt sich auf.

⁴Benannt nach dem italienischen Anatom Angelo Ruffini (1864-1929), 1893 [6].

1.5.2 Vater-Pacini-Körperchen

Vater-Pacini-Körperchen (VPK)⁵ lassen sich grundsätzlich in 3 Zonen einteilen: Ein Innenkolben, ein *subkapsulärer* Raum und eine äußere Kapsel [30] (s. Abbildung 1.12).

Der Innenkolben enthält das afferente und myelinisierte Axon [30], welches beim Eintreten seine Myelinscheide verliert und sich weiter aufteilt [32, 37].

Um den Innenkolben herum sowie im *subkapsulären* Raum liegen viele konzentrische Lamellen, welche von außen nach innen enger werden. Zusätzlich enthält der *subkapsuläre* Raum Kollagenfasern, *Fibrozyten* wie auch Blutgefäße [3, 51] und wird von außen durch die Kapsel begrenzt (s. Abbildung 1.12 und Tabelle 1.3).

Diese besteht aus Zellen des *Perineuriums*, welche dabei eine dicke Kapsel von bis zu 70 Schichten bilden können (s. Tabelle 1.3).

VPK sind meist oval geformt (s. Abbildung 1.11), haben einen Durchmesser zwischen $150\mu\text{m}$ und $600\mu\text{m}$ [37], sind schnell adaptierende Propriozeptoren mit einem geringen Schwellenwert [30] und messen eine Änderung des Reizes [21].

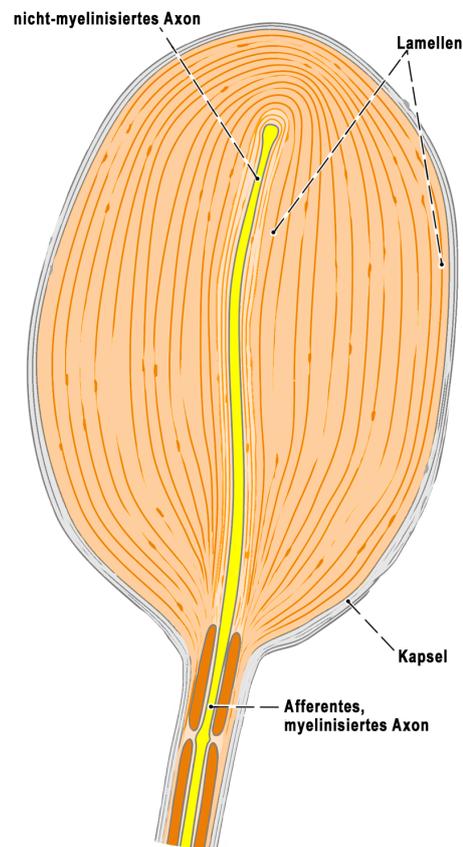
Sie liegen in der *Dermis* wie auch *Subcutis* [3, 84], an der Gelenkkapsel, Bändern [19, 44], zwischen Muskulatur und Knochen [84] und am *Periost* [32]. Mobargha *et al.* fanden VPK an den *Ligg. carpometacarpale obliquum anterius profundum et carpometacarpale dorsoradiale* von 11 Körperspendern, beschrieben dies jedoch als eine ungewöhnliche Lokalisation [58].

Sie messen Vibrationen (300-400Hz) [42], aber auch Beschleunigungen in Gelenken und schnelle Änderungen von Kräften [27, 28]. Meist liegen sie dabei in der Nähe zu Blutgefäßen [3, 19, 30, 58, 87] und Barbolini *et al.* diskutieren eine vasomotorische Regulation der VPK [3] (s. Tabelle 1.3).

Zimny *et al.* fanden an 10 Sehnen des *FDP* und *FDS* menschlicher Hände neben Golgi-Sehnen-Organen und RuK auch VPK. Dabei seien die VPK in der Lage, die Aktivität sowie die Position der Finger zu empfinden und zu überwachen [89].

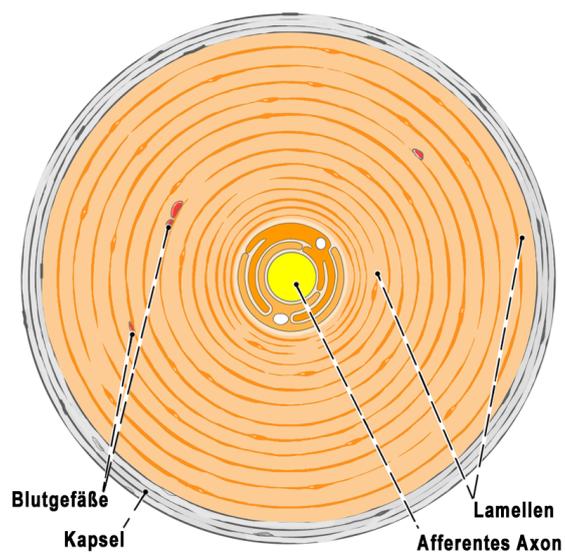
Die Lamellen werden als Filter interpretiert, sodass nur hochfrequente Frequenzen den inneren Kern erreichen und es so zu einer Reizantwort kommen kann. Frequenzen unter 100Hz können nicht registriert werden [41].

⁵Benannt nach Abraham Vater (1684-1751, Erstbeschreibung 1741) und Filippo Pacini (1812-1883, 1840 wiederentdeckt) [5].



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.11: Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchens: Zentral verläuft ein afferentes Axon, welches die Myelinschicht beim Eintritt in den Propriozeptor verliert.



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.12: Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchens im Querschnitt: Subkapsulär lassen sich Blutgefäße finden.

1.5.3 Golgi-Mazzoni-Körperchen

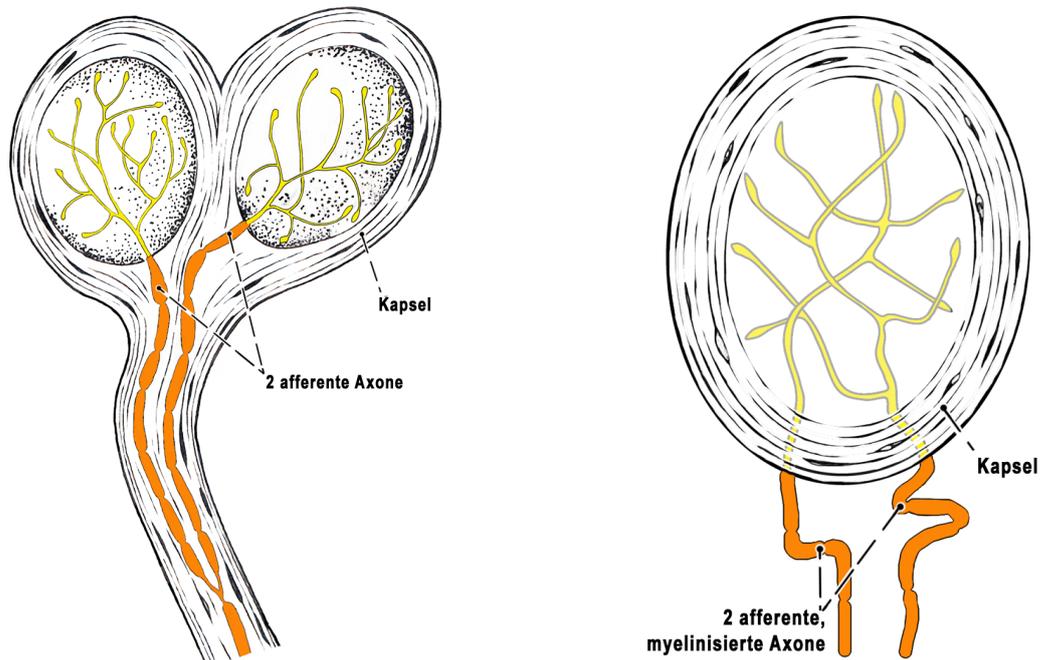
Golgi-Mazzoni-Körperchen (GMK)⁶ ähneln der Morphologie von VPK: Sie enthalten zentral afferente Nerven ($5 - 8\mu m$) und weisen ebenfalls Lamellen auf, welche von einer Kapsel aus Perineuralzellen umgeben sind (s. Tabelle 1.3 und Abbildungen 1.13 und 1.14). [13, 42, 53]

Im Unterschied zu den VPK besitzen GMK aber mindestens 2 Axone mit 2 Innenkolben [13, 51, 84] und es lassen sich 2 verschiedene Morphologien unterscheiden: Die Abbildung 1.13 stellt die verschiedenen Morphologien des GMK dar: In Abbildungen 1.13(a) teilt sich das Axon auf und endet in 2 voneinander getrennten Kolben, die von einer gemeinsamen Kapsel umgeben sind. In Abbildung 1.14(b) verlaufen 2 Axone in den selben Kolben hinein und zweigen sich dort auf. Abbildung 1.14 zeigt den Querschnitt eines GMK mit 2 Kolben. Desweiteren sind sie kleiner als VPK ($150 - 250\mu m$), weisen eine dünnere Kapsel (10-15 Schichten) sowie meist weniger Lamellen (10-15 Stück) auf und enthalten keine Blutgefäße (s. Tabelle 1.3) [13, 42].

GMK haben eine ovale oder zylindrische Form und lassen sich in der *Dermis*, *Subcutis*, an Bändern, Sehnen, in der Gelenkkapsel und am *Periost* finden (s. Tabelle 1.3) [12, 13, 19, 22, 42, 53, 63, 88]. Sie messen auf Gelenke einwirkende Kräfte und vermitteln eine Bewegungsgrenze des Gelenkes (s. Tabelle 1.3) [11, 53].

Zudem sind GMK schnell adaptierende Propriozeptoren, welche insbesondere die Frequenzen zwischen 200-300Hz registrieren können [42].

⁶Benannt nach Camillo Golgi (1843-1926) und Vittorio Mazzoni (1880-1940) [34].

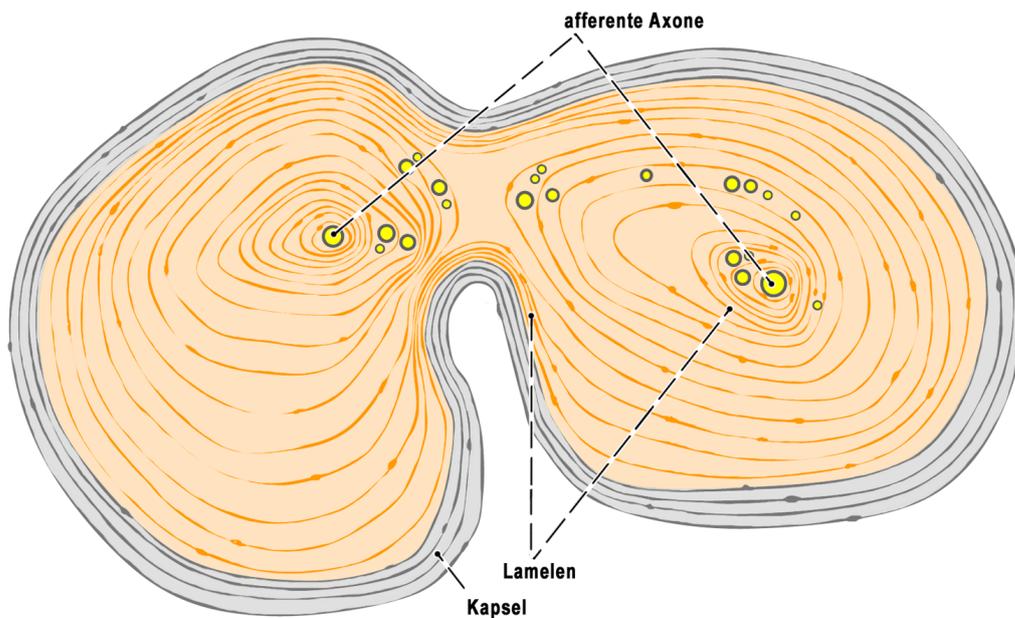


(a) Darstellung eines Golgi-Mazzoni-Körperchens. Das afferente, myelinisierte Axon endet in 2 verschiedene Kolben und zweigt sich auf.

(b) Darstellung eines Golgi-Mazzoni-Körperchens. 2 afferente, myelinisierte Axone treten in einen Kolben ein und zweigen sich auf.

Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.13: Darstellung der verschiedenen Morphologien des Golgi-Mazzoni-Körperchen.



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.14: Darstellung eines Golgi-Mazzoni-Körperchens mit 2 Kolben im Querschnitt: Es zeigen sich mindestens 2 eintretende Axone bzw. 2 Innenkolben, Blutgefäße lassen sich nicht finden.

1.5.4 Muskelspindeln

Muskelspindeln (MS)⁷ sind spindelförmige, kapsuläre Propriozeptoren, die ausschließlich in der Skelettmuskulatur liegen und parallel zu ihr verlaufen (s. Abbildung 1.15 und Tabelle 1.3) [84].

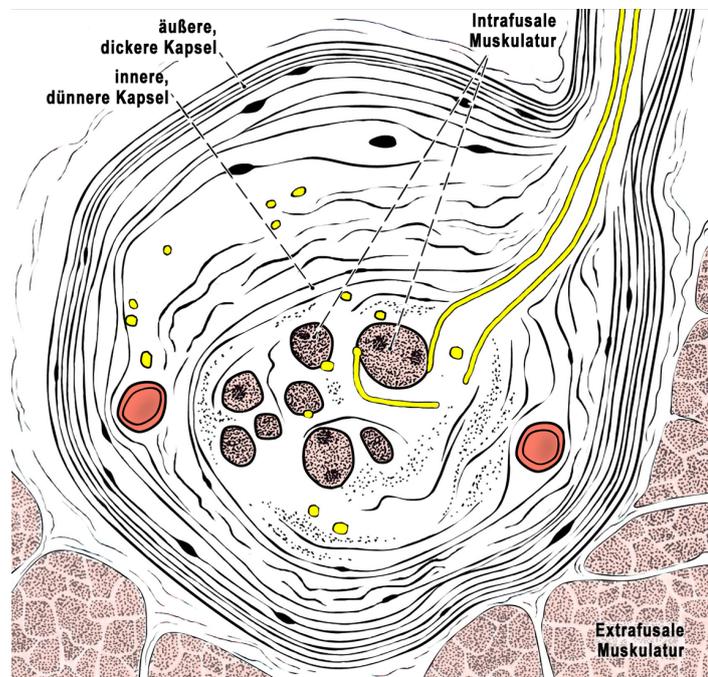
Sie bestehen aus drei Komponenten: Aus der *extrafusalen* sowie der *intrafusalen* Muskulatur und einer Kapsel (s. Abbildung 1.15) [84].

Die *extrafusalen* Muskelfasern umgeben die Kapsel der MS und sind Teil der parallel verlaufenden Muskulatur. Über die aus straffem Bindegewebe bestehende Kapsel sind die *extrafusalen* mit den *intrafusalen* Muskelfasern (bis zu 10 Stück) verbunden [51, 84]. Diese werden motorisch von γ -Fasern aus dem Rückenmark und sensorisch von 1a und 2-Fasern versorgt und sind von einer weiteren dünnen Kapsel umgeben (s. Abbildung 1.15). [44, 60] Im Raum zwischen der inneren und äußeren Kapsel lassen sich Gefäße und Nerven finden (s. Abbildung 1.15 und Tabelle 1.3) [60].

MS sind bis zu 12mm lang und im breitesten Durchmesser 200 μ m dick (s. Abbildung 1.15 und Tabelle 1.3) [75, 76, 84].

Wang *et al.* stellen fest, dass die MS besonders in den Muskeln vorkommen, welche an feinen und präzisen Bewegungen beteiligt sind (z.B. *Mm. lumbricales*) [83], doch auch in vielen weiteren Muskeln lassen sich MS finden [51].

Dabei messen sie die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Längen-, und Kontraktionsveränderung, die Länge und den Tonus der Muskulatur sowie plötzliche Bewegungen des Muskels [51, 54, 83]. Zudem rufen MS eine Muskelaktivität hervor und erhöhen neben dem Muskeltonus auch die Stabilität im umliegenden Gewebe [44, 62].



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 1.15: Darstellung einer Muskelspindel: Die *intrafusale* Muskulatur ist von einer dünnen Kapsel umgeben. Zwischen dieser und der äußeren, dickeren Kapsel liegen Gefäße und Nerven. Parallel zu den Muskelspindeln verläuft die *extrafusale* Muskulatur.

⁷1851 von Hassall entdeckt, 1861 von Weissmann ausführlich beschrieben [76].

Tabelle 1.3: Zusammenfassende Tabelle der Morphologie und Lokalisation der RuK, VPK, GMK und MS. Verwendete Referenzen: [3, 11–13, 19, 22, 27, 28, 30–32, 37, 41, 42, 44, 51, 53, 54, 58, 60, 62, 63, 67, 75, 76, 83, 84, 87, 88, 90]

		Ruffini-Körperchen	Vater-Pacini-Körperchen	Golgi-Mazzoni-Körperchen	Muskelspindel
Größe	Länge*Breite (μm)	50-800*100-700	150-800*40-300	30-250*150-250	1-12mm*100-200(μm)
Struktur					
	spindelförmig	+			+
	rund, kugelig, globulär	+	+		
	ovoid, oval	+	+	+	
	zylindrisch, konisch		+	+	
Kapsel		+/-/mit Lücken	+	+	+
	Perineuralzellen	1-8	1-70	10-15	
	straffes Bindegewebe				+
Subkapsulär					
	Lamellen		+	+	
	Innenkolben		5-50	10-15	
	Axon		1	>2	
		+	+	>2	+
		2-5	3-10	5-8	Ia-Typ: 6-15 II-Typ: 6
	Blutgefäße	+	+		
	Kollagenfasern	+	+		
	Elastin	+		+	
	Skelettmuskelzellen				
	Fibrozyten	+	+	+	+
Lokalisation					
	Dermis	+	+	+	
	Subcutis		+	+	
	Gelenkkapsel	+	+	+	
	Ligamente	+	+	+	
	Sehnen	+	+	+	
	an bzw. in Muskulatur	+	+	+	+
	Periost	+	+	+	
	Nähe zu Blutgefäßen	+	+		

1.6 Zielsetzung

Die Beispiele zur klinischen Relevanz der MCP-Region 2.-5. beschreiben neben den Ursachen, dem Krankheitsverlauf und den Therapiemöglichkeiten der Erkrankungen, dass Veränderungen in dem Gerüst aus Bindegewebe zu einer Instabilität und Bewegungseinschränkung führen. Weitere Quellen berichten von an der Hand operierten Patienten (z.B. nach rekonstruktiven Therapien der MCP-Gelenke oder *Ligg. collateralia*) und dass sie ihre ursprüngliche bzw. verbesserte Griffstärke und Beweglichkeit der Finger zurückerhielten [9, 14, 38–40, 64].

Das *Outcome* bezüglich der Feinmotorik oder Veränderungen der Propriozeption wurde jedoch nicht untersucht.

Veränderungen des sensorischen Inputs bei Verletzungen des vorderen Kreuzbandes und des Sprunggelenkes [15, 16, 20, 26, 35, 37, 44, 57, 67, 68, 90] zeigen, dass eine erhaltene Propriozeption positiv mit der Funktion des Gelenkes und der Patientenzufriedenheit korreliert [4, 20, 26, 68, 69].

Verminderte Propriozeption durch eine Mitbeschädigung und Reduzierung der Propriozeptoren und Nervenfasern [37, 67] führt zu Funktionseinschränkungen [16, 29, 67], einem Gefühl der Instabilität (z.B. „Wegknicken“, erschwerte Positionierung des Beines) [4, 16, 29, 67], einer herabgesetzten Reflexreaktion und diese führt ihrerseits zu einer erhöhten Verletzungsneigung [4, 26, 69, 73]. Bei Operationen wird empfohlen, die Bänder und Propriozeptoren zu schützen [4, 15, 29]. Der Verlauf der Bänder ist bekannt, jedoch gibt es bislang keine topografische Kartierung der Propriozeptoren im Bindegewebe der MCP-Region des Menschen, mit derer Hilfe sich iatrogene Schädigungen der Propriozeption vermeiden lassen könnten.

Diese Dissertation hat das Ziel, das Verteilungsmuster der Propriozeptoren RuK, VPK, GMK und MS in einer 2D-Abbildung der MCP-Region 2.-5. darzustellen.

Die MCP-Region eignet sich dabei zur Erstellung der Kartierungen: In dieser Gelenkregion stehen zahlreiche Strukturen untereinander in Verbindung und bauen ein komplexes Gerüst aus verschiedenen Geweben auf. Zahlreiche Verletzungen und Erkrankungen innerhalb der Region führen zu einer Instabilität und Bewegungseinschränkung und verdeutlichen die auch klinische Bedeutung der MCP-Region. Die genaue Lokalisation der Propriozeptoren innerhalb der MCP-Region ist dabei bislang nicht bekannt und soll den Strukturen zugeordnet werden.

Das *LMTP* wird mit seinen Nachbarstrukturen von menschlichen Händen lichtmikroskopisch untersucht und die Verteilung der RuK, VPK und GMK an dem Bandapparat und an den Sehnen des *FDP* und *FDS* sowie die MS in der Muskulatur in topografischen Kartierungen dargestellt.

Dafür wird die MCP-Region in 2 Ebenen betrachtet, um das Verteilungsmuster der Propriozeptoren innerhalb der MCP-Region vergleichen zu können. Ebene A definiert dabei den Beginn des *LMTP* mit seinen proximalen Ausläufern, Ebene B soll auf Höhe des *LMTP* liegen. Da dieses nach Lee *et al.* eine durchschnittliche Breite von ca. 13mm zeigt [50], wurde die Ebene B auf 5mm distal der Ebene A festgelegt.

Die so entstandene Propriozeptorenkartierung soll in funktionelle System der MCP-Region eingeordnet werden.

Dabei wird das *LMTP* als zentrales Band in dem Gerüst aus Bindegewebe in der MCP-Region betrachtet und die anatomischen Beziehungen und Funktionen der Gewebe untereinander mit den propriozeptiven Eigenschaften der Gewebe verknüpft werden.

Propriozeptoren wie Merkelzellen, Meissner-Tast-Körperchen, Haarfollikelsensoren, Krause-Körperchen oder auch Golgi-Sehnenorganen liegen nicht im *LMTP*-assoziierten Bindegewebe, sodass auf deren Kartierung verzichtet wird.

Die Zusammenfügung von topografischer Anatomie und systematische Erfassung der Verteilung der Propriozeption wird bei Verletzungen und Krankheiten des Bindegewebes sowie Operationen in der MCP-Region und die dadurch beschädigte Propriozeption eine weitere Erklärung von feinmotorischen Bewegungseinschränkungen in der Hand sowie der Finger bieten. Zudem kann sie zur Auswahl der operativen Schnittführung herangezogen werden, ebenso wie für die Therapieplanungen.

KAPITEL 2

Material und Methoden

Verwendete Materialien:

- Makroskopische Probenentnahme:
 - Kamera: Canon EOS 500D
 - Markieren der Gewebeproben: Medite, Tissue Marking Dye 2, blue, Burgdorf, Deutschland
- Histologie:
 - Intermedium: Roth, Roticlear, Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland
 - Paraffin: McCormick Scientific, Paraplast plus, St. Louis, Missouri, USA
 - Paraffin-Einbettssystem: Medite, Tes Valid, Burgdorf, Deutschland
 - Rotationsmikrotom: Leica RM2155, Wetzlar, Deutschland
 - Mikroskop: ZEISS Axioplan mit der Software AxioVision 4.8.2 für eine Fotodokumentation, Mikroskop-Objektive: 2,5x, 10x, 40x

2.1 *Körperspenden*

Es wurden 24 Hände von 12 Körperspendern präpariert, die beiden Geschlechtern angehören (5♀, 7♂). Das Alter liegt zwischen 60 und 94 Jahren und das Durchschnittsalter beträgt 83 Jahre.

Die Körperspender haben sich zu Studienzwecken und Zwecken der medizinischen Aus-, Fort- und Weiterbildung zur Verfügung gestellt. Von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf liegt ein positives Ethikvotum vor (Studennummer 5202).

2.2 Makroskopische Präparation

Die zur Verfügung gestellten Körperspender wurden bereits in dem Kursus der Makroskopischen Anatomie präpariert.

Zur histologischen Methodenkontrolle wurde das Gewebe einer Körperspende vor der Fixierung entnommen und erst danach fixiert.

Zu einem Ausschluss der Körperspender kam es bei Voroperationen, anatomischen Varianten und bereits makroskopisch sichtbaren Verletzung der im Kursus dargestellten Palmaraponeurose. Falls es während der Präparation zur Gewinnung des *LMTP* zu sichtbaren Verletzungen des *LMTP* gekommen war oder die umgebenden Strukturen beschädigt wurden, kam es auch bei dieser Körperspende zum Ausschluss für die weitere Bearbeitung.

Der erste horizontale Schnitt erfolgte proximal, ein zweiter Schnitt distal des 2. MCP-Gelenkes. Beide Schnitte wurden an der radialen Außenseite des Gelenkes miteinander verbunden und die Gelenkkapsel von radial eröffnet. Von dorsal ließ sich so auf die palmare Platte blicken, welche von den Knochen des Metakarpalkopfes und des *Phalanx proximalis* abgetrennt wurde.

Am 3. MCP-Gelenk wurde ein proximaler und distaler Schnitt gesetzt und diese horizontal mit den zuvor gesetzten Schnitten am 2. MCP-Gelenk verbunden.

Zur Entnahme des Gewebes zwischen den Metakarpalknochen wurde ulnar des 2. MCP-Gelenkes tief nach dorsal präpariert, um das dort liegende Gewebe zu entnehmen.

Die Gelenkkapsel des 3. MCP-Gelenkes wurde ebenfalls von radial eröffnet und die palmare Platte vom Knochen freipräpariert.

Auf diese Weise konnte bis zur Eröffnung des 5. MCP-Gelenkes präpariert werden. An diesem Gelenk wurden die proximalen und distalen Schnitte des Gelenksspalts an der ulnaren Außenseite miteinander verbunden. Danach konnte die zusammenhängende Probe entnommen werden.

Die fertige Präparation wurde fotodokumentiert (Canon EOS 500D) und ist in Abbildung 2.1 abgebildet. In Abbildung 2.1 (b) ist die entnommene Gewebeprobe dargestellt und zur Orientierung beschriftet worden.



(a) Ursprüngliche Lage des präparierten Gewebes

(b) Mobilisierung des präparierten Gewebes und Blick auf die Metakarpalköpfe 2.-5.

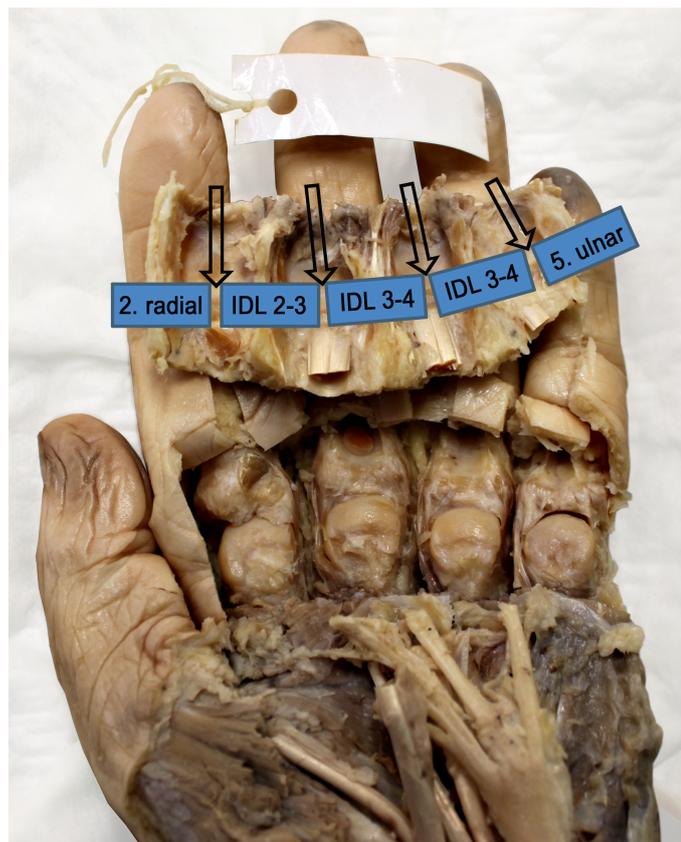
Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 2.1: Präparierte Metakarpophalangealregion 2.-5., ♀, 89jährig, linke Hand.

2.2. MAKROSKOPISCHE PRÄPARATION

Für die histologische Bearbeitung und zur Einteilung des Gewebes wurde dieser Gewebeschnitt in 5 weitere Proben aufgeteilt. Dabei wurde von proximal nach distal durch die palmaren Platten geschnitten (s. Abbildung 2.2). Diese Proben lassen sich den folgenden Lokalisationen zuordnen:

- 2. radial (rechts bzw. links)
- *Interdigital rechts (IDR)* bzw. *Interdigital links (IDL)* 2-3
- *IDR* bzw. *IDL* 3-4
- *IDR* bzw. *IDL* 4-5
- 5. ulnar (rechts bzw. links)



IDL=Interdigital links. Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 2.2: Makroskopische Einteilung des entnommenen Gewebes der Metakarpophalangealregion 2.-5., ♀, 89jährig, linke Hand: Der Schnitt erfolgte von proximal nach distal durch die palmare Platte (schwarzer Pfeil).

Alle Gewebeproben wurden an ihrer proximalen Seite mit einer blauen Farbe (Mediate, Tissue Marking Dye 2, blue, Burgdorf, Deutschland) markiert, um eine einheitliche Orientierung der Proben zu ermöglichen.

2.3 *Histologie*

Zur Anfertigung von histologischen Schnitten ist es erforderlich, dem Gewebe das Formaldehyd mit Wasser und darauf folgend das Wasser mit Alkohol zu entziehen.

Das anschließende Paraffin, welches den Gewebeproben die nötige Stabilität zum Schneiden unter einem Rotationsmikrotom (Leica RM2155, Wetzlar, Germany) verschafft, kann sich nicht mit dem Alkohol verbinden, sodass erst ein Intermedium (Roth, Roticlear, Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland) verwendet werden muss.

Die HE-Färbung und EvG-Färbung erfolgt modifiziert nach der Anleitung aus dem Romeis, 18. Auflage [85].

2.3.1 Herstellung der histologischen Schnitte

- Gewebeproben für 7 Tage in H₂O
- Aufsteigende Alkoholreihe: 70%, 90%, 96%, 100% Isopropanol für je 48 Stunden
- Gewebeproben für 3 Tage in ein Intermedium (Roth, Roticlear, Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
- 4 mal in flüssiges Paraffin (McCormick Scientific, Paraplast plus, St. Louis, Missouri, USA), 60°Celsius, für je 24 Stunden
- Gewebeproben in flüssiges Paraffin (60°Celsius)
- Aushärten mit einem Paraffin-Einbettssystem (-4°C., Medite, Tes Valida, Burgdorf, Germany)
- Schneiden von 7µm Schnitten mit einem Rotationsmikrotom (Leica RM2155, Wetzlar, Germany)
- Histologische Untersuchung mit ZEISS Axioplan, Mikroskop-Objektive: 2,5x, 10x, 40x

2.3.2 HE-Färbung

Herstellung der Färbelösung:

- Hämalalaun nach Mayer
 - 1g Hämatoxylin in 1000ml *Aqua destillata* lösen
 - 0,2g Natriumiodat hinzugeben
 - unter Rühren 50g Kalialalaun hinzugeben
 - 50g Chloralhydrat hinzugeben
 - 1g Zitronensäure hinzugeben
 - Lösung filtrieren

Protokoll der HE-Färbung:

- Entparaffinieren in Xylol
- Rehydrieren unter absteigender Alkoholreihe: 100%, 90%, 80%, 70% Alkohol für je 2 Minuten
- Auswaschen unter *Aqua bidest*
- Färben in Hämalalaun nach Mayer für 8 Minuten
- Bläuen unter H₂O für 5 Minuten
- Färben mit 0,3% wässrigem Eosin für 1.5 Minuten
- Auswaschen unter H₂O
- Dehydrieren unter aufsteigender Alkoholreihe: 70%, 80%, 90%, 2 mal 100% Alkohol für je 2 Minuten
- Entfernung des Alkohols: 2 mal Xylol für 2 Minuten
- Eindecken mit DePeX (Xylolhaltiges Eindeckmedium)

2.3.3 EvG-Färbung

Herstellung der Färbelösungen:

- Resorcinfuchsinfärbelösung (auch Elastikalösung genannt) nach Weigert
 - 0.5g basisches Fuchsin und 1g Resorcin in 50ml *Aqua bidest* unter Erwärmung lösen
 - 2g Eisen-3-Chlorid in 10ml *Aqua bidest* lösen
 - Lösungen aus 1) und 2) vereinen
 - Unter Erhitzung für 5 Minuten bei kleiner Flamme kochen
 - Abkühlen und filtrieren
 - Niederschlag mit 100ml 96% Ethanol filtrieren
 - Niederschlag unter Erhitzung auflösen
 - Abkühlen
 - 0.7ml konzentrierte Chlorwasserstoffsäure hinzugeben
 - Lösung Filtrieren
- Hämatoxylinlösung nach Weigert
 - 1g Hämatoxylin in 100ml 96% Ethanol lösen
 - 1.16g Eisen-3-Chlorid in 99ml *Aqua bidest* lösen, 1ml 25% Chlorwasserstoffsäure hinzugeben
 - Lösungen aus 1) und 2) zu gleichen Teilen mischen

KAPITEL 2. MATERIAL UND METHODEN

- Pikrofuchsinlösung (auch van-Gieson-Gemisch genannt)
 - Bis Sedimentbildung Pikrinsäurekristalle in 1000ml *Aqua bidest* lösen
 - Lösung Filtrieren
 - zu 100ml 5ml 1% wässrige Säurefuchsinlösung hinzugeben

Protokoll der EvG-Färbung:

- Entparaffinieren in Xylol
- Rehydrieren unter absteigender Alkoholreihe: 100%, 90%, 80%, 70% Alkohol für je 2 Minuten
- Färben in Elastikalösung für 15 Minuten
- Auswaschen unter demineralisiertem Wasser
- Färben in Hämatoxylin nach Weigert für 5 Minuten
- Auswaschen unter demineralisiertem Wasser
- Bläuen unter Leitungswasser für 10 Minuten
- Auswaschen unter demineralisiertem Wasser
- Färben in Pikrofuchsinlösung für 1 Minute
- Auswaschen unter demineralisiertem Wasser
- Dehydrieren unter aufsteigender Alkoholreihe: 2 mal 96% Alkohol und 2 mal 100% für je 2 Minuten
- Entfernung des Alkohols: 2 mal Xylol für je 2 Minuten
- Eindecken mit DePeX (Xylolhaltiges Eindeckmedium)

2.4 Visualisierung

Die MCP-Region 2.-5. wurde in 2 Ebenen betrachtet: Ebene A beschreibt die proximalen Ausläufer des *LMTP*, Ebene B liegt *5mm* distal der Ebene A und auf Höhe des *LMTP*. Es wurden mit Hilfe von makroskopischen wie auch mikroskopischen Fotos des entnommenen Gewebes Abbildungen in 2D-Rekonstruktion der MCP-Region erstellt. Zur grafischen Darstellung der Topografie der Propriozeptoren und Vergleichbarkeit der unterschiedlichen und auf einem engen Raum liegenden Strukturen wurde die MCP-Region in die folgenden Kompartimente⁸ eingeteilt.

- Beugesehnen: Sehnen des *FDP* und *FDS* mit dem A1-Ringband
- palmare Platte
- *Ligg. collateralia*
- Lumbricalis-Kompartiment (LuK): Mit den *Mm. lumbricales* sowie den begleitenden Leitungsbahnen. Begrenzt nach lateral durch die *Legueu und Juvara-Septen*, palmar durch die *Fasciculi transversi* und nach dorsal durch das *LMTP*
- *LMTP*
- Interosseus-Kompartiment (IntK): Mit den *Mm. interossei*. Begrenzt nach palmar durch das *LMTP* und nach lateral durch die *Ligg. collateralia*.
- Hypothenar-Kompartiment (HtK): Mit dem *AbDM*, *FDM* und *ODM*.

Die Erstellung der topografischen Kartierungen erfolgte mit dem Bildbearbeitungsprogramm *Paint.net* (Version 3.5.10, *Freeware*). Diese visualisieren das Verteilungsmuster und die Lokalisationen der Propriozeptoren durch Summation von 24 Spenderhänden von 12 Körperspendern. Die Abbildungen der linken Hände wurden dafür gespiegelt und gemeinsam mit den Abbildungen der rechten Hände zu Summationsbildern zusammengefasst.

Bei der Kartierung der Propriozeptoren war die Bildung von Summationsbildern erforderlich, da die einzelne Hand der Körperspende in ihrer Individualität und geringer Anzahl an Propriozeptoren keine Tendenz eines Verteilungsmusters bietet. Erst die Summationsbilder zeigen die topographische Verteilung.

Bei der Auswertung der topografischen Kartierungen muss daher stets bedacht werden, dass sich die Summationsbilder auf alle Hände der 12 Körperspenden beziehen. So gibt es auch Körperspender, in denen sich die unterschiedlichen Propriozeptoren in den Kompartimenten nur selten oder gar nicht finden ließen.

Bei der Bildung von Summationsbildern muss eine sinnvolle Anzahl an Körperspendern gewählt werden: Zu viele Körperspender und eine hohe Anzahl an Propriozeptoren lassen keinen Fokus auf ein Verteilungsmuster zu. Bei einer zu geringen Anzahl an Körperspendern fehlt ein Verteilungsmuster bzw. bereits wenige Propriozeptoren in einem Kompartiment erwecken den Eindruck eines Verteilungsmusters. Die Propriozeptoren einer Körperspende in der MCP-Region wurden in jeweils eigene Kartierungen für RuK (s. Abbildungen 3.17 und 3.18), VPK (s. Abbildungen 3.21 und 3.22), GMK (s. Abbildungen 3.24 und 3.25) und MS (s. Abbildungen 3.27 und 3.28) eingezeichnet. Diese wurden anschließend in gemeinsame Kartierungen für Ebene A (s. Abbildung 3.31) und Ebene B (s. Abbildung 3.32) zusammengefasst.

⁸Ein Kompartiment wird als ein für sich alleinstehender und weitgehend abgeschlossener Teilbereich des Körpers definiert [61].

Die Propriozeptoren in den Kartierungen werden durch Punkte wiedergegeben:

- RuK: rot ●
- VPK: blau ●
- GMK: lila ●
- MS: grün ●

Anzahl, Lokalisationen und Verteilungsmuster der Propriozeptoren der MCP-Region 2.-5. wurden in Säulendiagrammen und topografischen Kartierungen ausgewertet. Beide Darstellungsformen unterstützen sich in der Visualisierung des Verteilungsmusters und ordnen gemeinsam die Propriozeption in der MCP-Region ein: Die Säulendiagramme geben Anzahl und Kompartimentenzugehörigkeit an, die Kartierungen visualisieren das Verteilungsmuster, zeigen die topographische Lage der Propriozeptoren innerhalb eines Kompartimentes und stellen Beziehungen zwischen den Kompartimenten auf.

Eine alleinige Betrachtung der Säulendiagramme reicht nicht aus, da diese nicht die topographische Verteilung der Propriozeptoren innerhalb eines Kompartimentes verdeutlichen und auch nicht die Beziehungen zwischen den verschiedenen Kompartimenten darstellen. Die alleinige Betrachtung der Kartierungen hingegen, besonders bei den Propriozeptoren mit einer geringen Anzahl, bietet nicht einen schnellen und deutlichen Fokus auf die Kompartimente.

Die Propriozeptoren RuK, VPK, GMK und MS wurden mit der Software „IBM SPSS Statistics 24“ in ihrer Verteilung bezüglich der rechten bzw. linken Hand, des Geschlechtes sowie in Abhängigkeit zum *LMTP* (Ebene A=proximale Ausläufer des *LMTP* und Ebene B=auf Höhe des *LMTP*) verglichen.

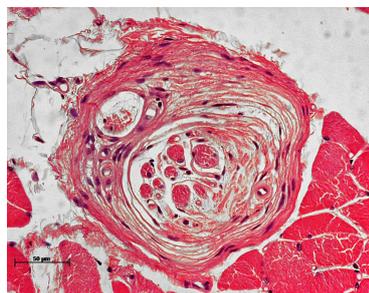
Dabei wurden für den Vergleich der Häufigkeit der Propriozeptoren zwischen der rechten und linken Hand sowie im Vergleich der Geschlechter der Chi-Quadrat-Test genutzt. Dieser setzt nominalskalierte Variablen einer Zufallsstichprobe voraus und prüft, ob ein signifikanter Unterschied bezüglich der Häufigkeit der Propriozeptoren vorliegt. [43]

Anhand des Kolmogorov-Smirnov-Test für 2 Stichproben lässt sich die Häufigkeit der Propriozeptoren in Abhängigkeit der Ebene vergleichen und eine Normalverteilung prüfen [43]. Bei vorliegender Normalverteilung wurde der Levene-Test (Vergleich der Varianzen) angewendet. Diese müssen gleich sein, um den parametrischen t-Test für unabhängige Stichproben nutzen zu können. Dieser benötigt desweiteren eine Intervallskala und vergleicht die Mittelwerte der unabhängigen Stichproben. Bei nicht vorliegender Normalverteilung benötigt es den nichtparametrischen Mann-Whitney-Test, der die Signifikanz der Übereinstimmung zweier Verteilungen prüft.[43]

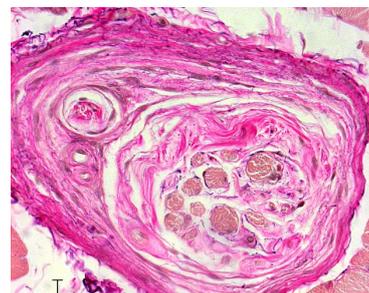
KAPITEL 3

Auswertung

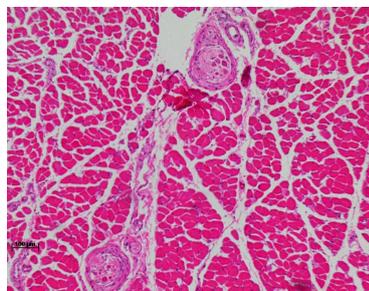
Die MCP-Region 2.-5. wurde lichtmikroskopisch in 2 Ebenen betrachtet: Ebene A bildet den proximalen Beginn der Ausläufer des *LMTP*, Ebene B befindet sich 5mm distal der Ebene A auf Höhe des *LMTP*. Die histologischen Schnitte wurden mit einer HE-Färbung sowie EvG-Färbung angefärbt. In der EvG-Färbung stellen sich die kollagenen Fasern der MS-Kapsel rot dar, die *intrafusale* und *extrafusale* Muskulatur im Unterschied zu der HE-Färbung hingegen gelb (s. Abbildung 3.1). Die zusätzliche EvG-Färbung erleichterte das Auffinden der Propriozeptoren (s. Abbildung 3.1).



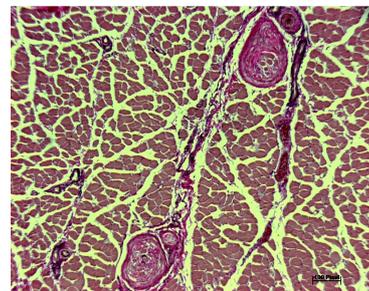
(a) Muskelspindel in HE-Färbung. Die Zellkerne sind blau gefärbt, Muskulatur und Bindegewebe in Abstufungen rosa bis rot.



(b) Muskelspindel in EvG-Färbung. Die Zellkerne sind (blau)schwarz, kollagene Fasern rot und Muskulatur gelb gefärbt.



(c) Muskelspindeln in der HE-Färbung.



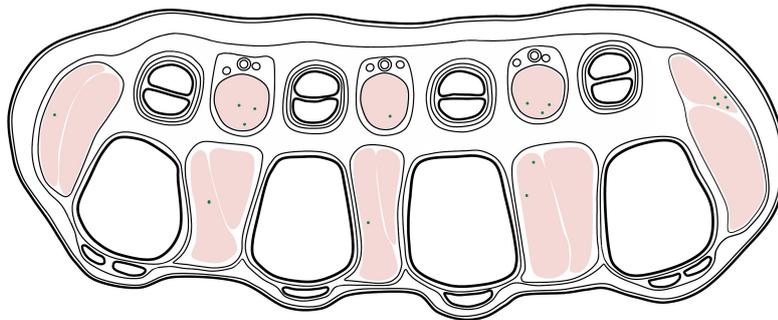
(d) Auf Grund der gelblich gefärbten Muskulatur treten die Muskelspindeln in der EvG-Färbung hervor.

Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.1: Vergleich der Muskelspindeln in HE-Färbung und EvG-Färbung, 40x.

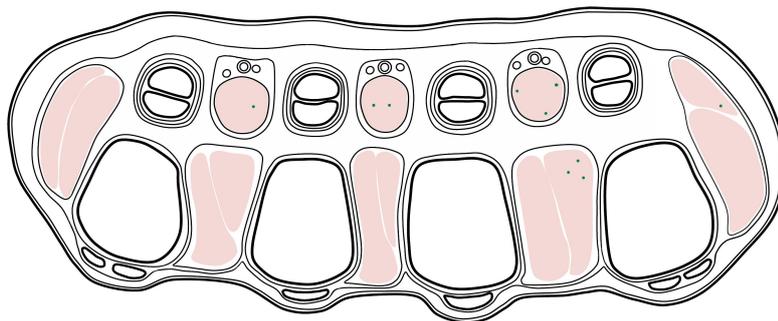
KAPITEL 3. AUSWERTUNG

Zur Erstellung von topografischen Kartierungen durch Summation der gefundenen MS werden exemplarisch die Abbildungen der rechten Hand zweier Körperspender gezeigt (s. Abbildungen 3.2 und 3.3). Die MS der rechten Hand aller 12 Körperspender wurden in einer eigenständigen Abbildung summiert (s. Abbildung 3.4). Es lässt sich feststellen, dass erst die Summation der Propriozeptoren das eigentliche Verteilungsmuster der MS zeigt.



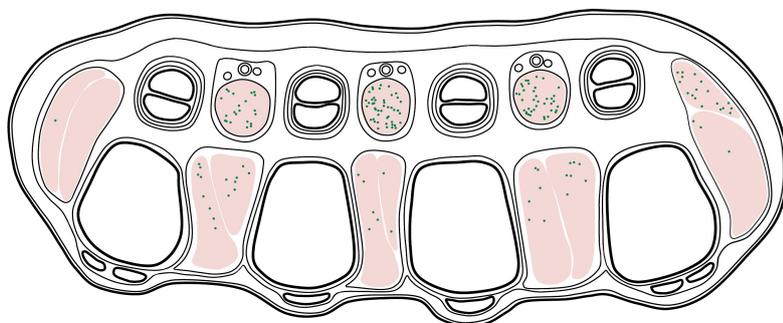
●=Muskelspindeln. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.2: Muskelspindeln der Körperspende X (♀, 94jährig, rechte Hand): Auf Grund der geringen Anzahl an Muskelspindeln ist kein Verteilungsmuster erkennbar.



●=Muskelspindeln. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.3: Muskelspindeln der Körperspende Y (♂, 83jährig, rechte Hand): Auf Grund der geringen Anzahl an Muskelspindeln ist kein Verteilungsmuster erkennbar.



●=Muskelspindeln. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.4: Alle summierten Muskelspindeln der Ebene A, rechte Hand: Es zeigt sich ein Verteilungsmuster und eine Schwerpunktsetzung in den *Mm. lumbricales*.

Für die Statistik werden die absoluten Anzahlen der Propriozeptoren verwendet, die sich bei der lichtmikroskopischen Betrachtung der Feinschnitte finden ließen. Anzahl, Lokalisationen und Verteilungsmuster der Propriozeptoren der MCP-Region 2.-5. werden in Säulendiagrammen und topografischen Kartierungen dargestellt und in der Auswertung zueinander in Beziehung gesetzt.

Die aufgrund ihrer Histomorphologie nicht eindeutig erkennbaren Propriozeptoren wurden aussortiert (24 Propriozeptoren). Sollte ein Propriozeptor mehrfach angeschnitten worden sein (in Ebene A und B), so sind beide Anschnitte des Propriozeptors in die Auswertung eingegangen.

Beachtet werden muss, dass die absolute Anzahl an MS in den *Mm. interossei* eingeschränkt zu bewerten ist, da die Entnahme der tief dorsal verlaufenden Muskulatur zwischen den Metakarpalknochen begrenzt ist. In Ebene B befindet sich der *FDM* bereits im Übergang zur Sehne und der *ODM* konnte nur als Sehne in Ebene B betrachtet werden.

Die folgenden Hypothesen wurden bei einem Signifikanzniveau von 0,05 mit dem Programm „SPSS“ auf ihre Signifikanz geprüft.

Die Arbeitshypothesen⁹ lauten:

- H_1 : Die Propriozeptoren sind rechts und links nicht identisch verteilt.
- H_2 : Die Propriozeptoren sind bei Mann und Frau nicht identisch verteilt.
- H_3 : Die Propriozeptoren sind abhängig von der Lage zum *LMTP* unterschiedlich verteilt.

Die entsprechenden Nullhypothesen¹⁰ lauten:

- $H_0(H_1)$: Die Propriozeptoren sind rechts und links identisch verteilt.
- $H_0(H_2)$: Die Propriozeptoren sind bei Mann und Frau identisch verteilt.
- $H_0(H_3)$: Die Propriozeptoren sind unabhängig von der Lage zum *LMTP* gleich verteilt.

Auf die Überprüfung der Verteilung der GMK bezüglich der Lage zum *LMTP* wurde aufgrund der geringen Anzahl an GMK (12) verzichtet.

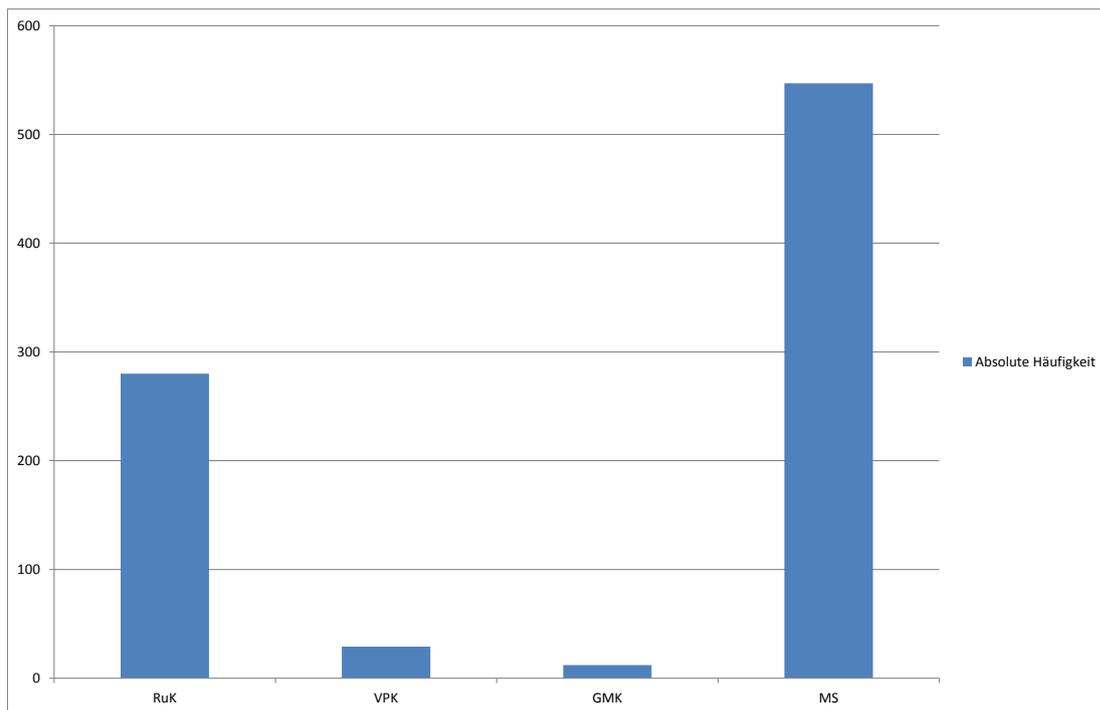
⁹Als H_1 bis H_3 durchnummeriert

¹⁰Als H_0 „von H_1 “, H_0 „von H_2 “ bzw. H_0 „von H_3 “ bezeichnet

3.1 Anzahl und Topografie der Propriozeptoren

Die Propriozeptoren RuK, VPK, GMK und MS lassen sich in beiden Ebenen sowie in den eingeteilten Kompartimenten finden.

Dabei kommen bei einer Anzahl von 12 Körperspendern insgesamt die Anschnitte von 868 Propriozeptoren und mit 547 die MS am häufigsten vor, gefolgt von 280 RuK, 29 VPK und 12 GMK (s. Abbildung 3.5).



RuK=Ruffini-Körperchen, VPK=Vater-Pacini-Körperchen, GMK=Golgi-Mazzoni-Körperchen, MS=Muskelspindeln.

Abbildung 3.5: Absolute Häufigkeit der Propriozeptoren (868 Anschnitte): 547 Muskelspindeln, 280 Ruffini-Körperchen, 29 Vater-Pacini-Körperchen und 12 Golgi-Mazzoni-Körperchen.

3.1.1 Ruffini-Körperchen

RuK (s. Abbildung 3.6) liegen in allen benannten Kompartimenten und lassen sich am häufigsten an den *Ligg. collateralia* (93 RuK, Mittelwert=7,75), an den Beugesehnen (60 RuK, Mittelwert = 5) und in den IntK (48 RuK, Mittelwert=4) finden (s. Abbildung 3.7). Dabei kommen die RuK an den Beugesehnen außerhalb des A1-Ringbandes und außerhalb des äußeren sowie innerhalb des inneren Synovialblattes in direkter Beziehung zu der Sehne des *FDP* bzw. *FDS* vor.

In den LuK liegen 24 RuK (Mittelwert=2), in dem HtK 21 RuK (Mittelwert=1,75) und 19 RuK in Assoziation zu dem *LMTP* (Mittelwert=1,58), hingegen nur 15 RuK assoziiert zu der palmaren Platte (Mittelwert=1,25) (s. Abbildung 3.7).

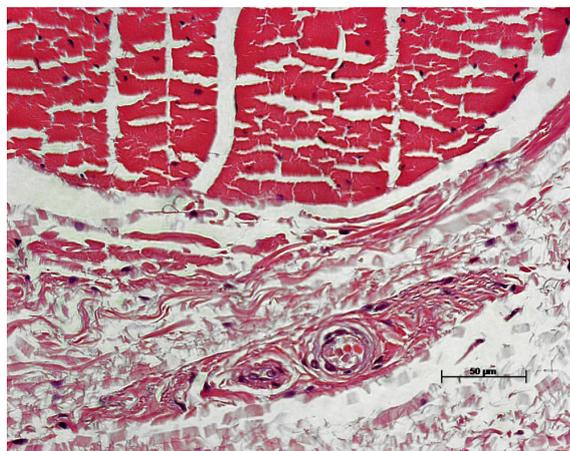
Betrachtet man die Anzahl der RuK an den *Ligg. collateralia* in Abhängigkeit zu der Lokalisation der Entnahmestelle 2. radial, *IDR* bzw. *IDL* 2-3, 3-4, 4-5 und 5. ulnar, so liegen diese an der ulnaren (25 RuK, Mittelwert=2,08), an der radialen Außenseite (21 RuK, Mittelwert=1,75) und ebenfalls 21 RuK im Bereich der *IDR* bzw. *IDL* 2-3 (Mittelwert=1,75). Im Bereich von *IDR* bzw. *IDL* 3-4 liegen 15 RuK (Mittelwert=1,25) und im Bereich von *IDR* bzw. *IDL* 4-5 kommen mit 11 RuK die wenigsten RuK vor (Mittelwert=0,92) (s. Abbildung 3.8). Es folgt: Ulnar>radial=*IDR* bzw. *IDL* 2-3>*IDR* bzw. *IDL* 3-4>*IDR* bzw. *IDL* 4-5.

Für alle Kompartimente lautet der Medianwert=1.

Für den Vergleich der Verteilung der RuK bezüglich der rechten und linken Hand gilt, dass die Nullhypothese $H_0(H_1)$ behalten wird. Linke und rechte Hände sind gleich ausgestattet (asymptotische Signifikanz $p=0,684$ im Chi-Quadrat-Test).

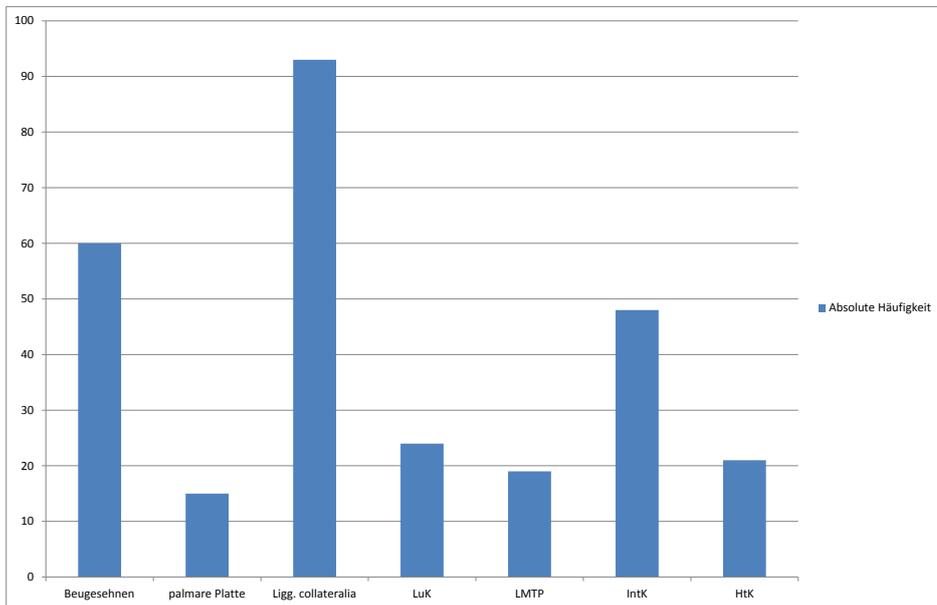
Bezüglich des Vergleichs der Geschlechter gilt, dass sich die Arbeitshypothese H_2 zutrifft. Die Hände beider Geschlechter sind nicht gleich ausgestattet (asymptotische Signifikanz $p=0,01$ im Chi-Quadrat-Test).

Für die Verteilung aller RuK in Abhängigkeit zum *LMTP* gilt, dass sie normalverteilt sind (Kolmogorov-Smirnov-Test $p=1,0$). Die Nullhypothese $H_0(H_3)$ einer Häufigkeitsverteilung unabhängig von der Ebene im Mann-Whitney-Test (asymptotische zweiseitige Signifikanz $p=0,824$) trifft zu und das *LMTP* zeigt keinen Einfluss auf die Verteilung der RuK.



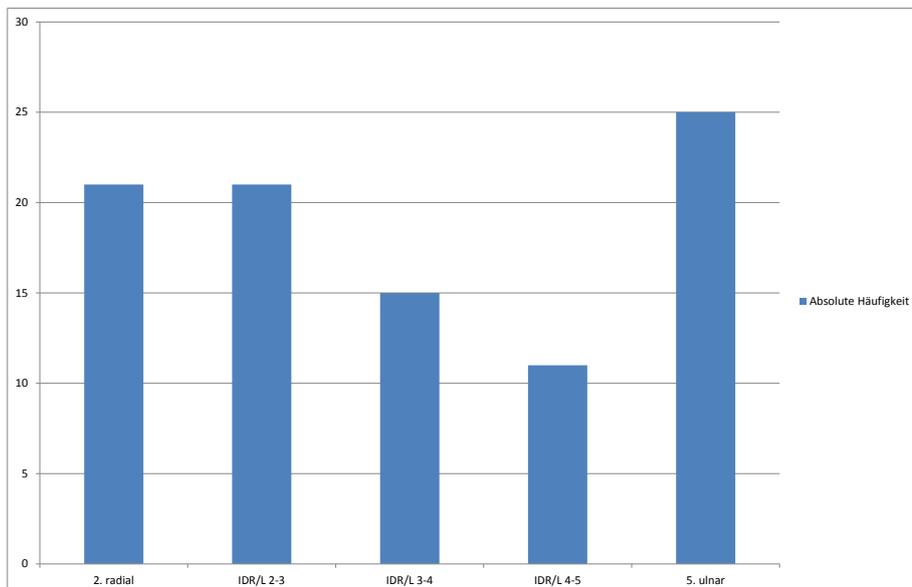
Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.6: Ruffini-Körperchen in HE-Färbung an der Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, Ebene A, 40x.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, LMTP=*Lig. metacarpale transversum profundum*,
IntK=Interosseus-Kompartiment, HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.7: Absolute Häufigkeit der Ruffini-Körperchen in den Kompartimenten: Der Schwerpunkt der Verteilung liegt an den *Ligg. collateralia* (93 Ruffini-Körperchen), Beugesehnen (60 Ruffini-Körperchen) und in den Interosseus-Kompartimenten (48 Ruffini-Körperchen).



IDR bzw. IDL=Interdigital rechts bzw. links.

Abbildung 3.8: Absolute Häufigkeit der Ruffini-Körperchen entlang der *Ligg. collateralia* mit Schwerpunktsetzung im radialen und ulnaren Bereich.

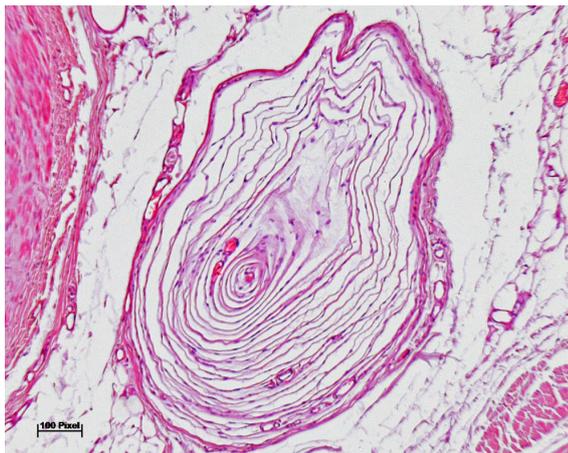
3.1.2 Vater-Pacini-Körperchen

Die Mehrheit der 29 VPK (s. Abbildung 3.9) liegen in den LuK (15 VPK, Mittelwert=1,25) (s. Abbildung 3.10). Am zweithäufigsten lassen sie sich in Assoziation zu den Beugesehen finden (6 VPK, Mittelwert=0,5), folgend mit 4 VPK am bzw. auch im *AbDM* (Mittelwert=0,33). 2 VPK sind assoziiert zu dem *LMTP* (Mittelwert=0,17), 1 VPK an der palmaren Platte und ebenfalls 1 VPK an den *Ligg. collateralia* (Mittelwert=0,08). In den Kompartimenten der IntK liegen keine VPK (s. Abbildung 3.10).

Für alle Kompartimente lautet der Medianwert=1.

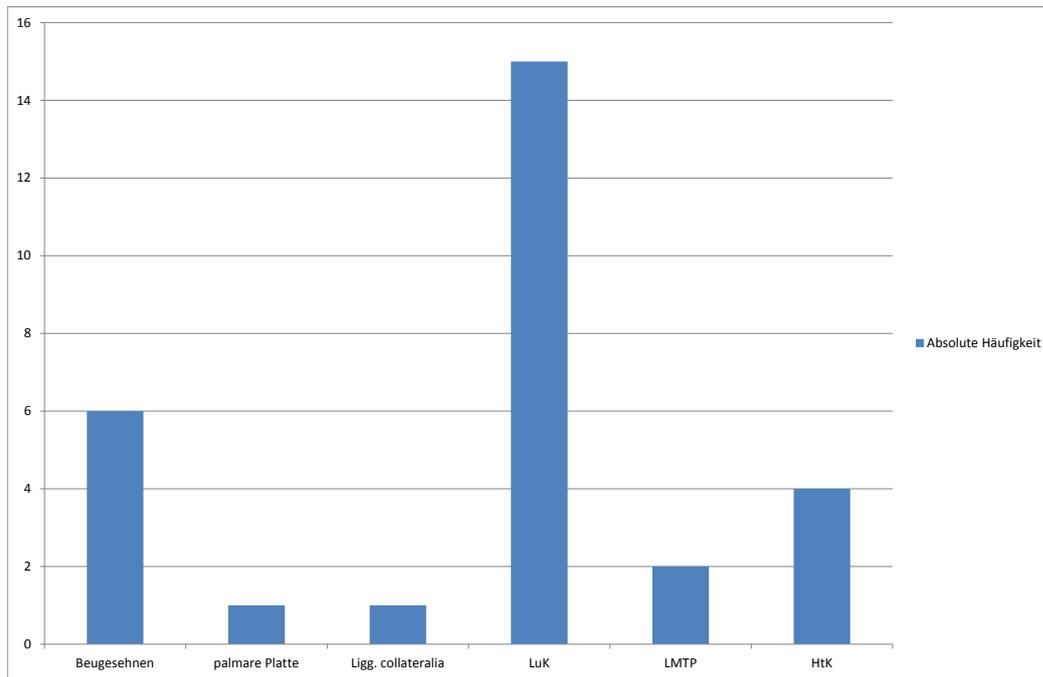
Im Vergleich der Verteilung der VPK bezüglich der rechten und linken Hand sowie der Geschlechter der Spender gilt, dass die Nullhypothesen $H_0(H_1)$ und $H_0(H_2)$ zutreffen. Linke und rechte Hände sind gleich ausgestattet (asymptotische Signifikanz $p=0,695$ im Chi-Quadrat-Test) ebenso wie die Hände beider Geschlechter (asymptotische Signifikanz $p=0,695$ im Chi-Quadrat-Test).

Bezüglich der Verteilung der VPK in Abhängigkeit zum *LMTP* gilt für diese, dass sie normalverteilt sind (Kolmogorov-Smirnov-Test $p=1,0$). Die Nullhypothese $H_0(H_3)$ unabhängig von der Ebene im Mann-Whitney-Test (asymptotische zweiseitige Signifikanz $p=0,690$) stellt sich als wahr heraus und das *LMTP* zeigt keinen Einfluss auf die Verteilung der VPK.



Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.9: Vater-Pacini-Körperchen in HE-Färbung palmar im Lumbricalis-Kompartiment und in der Nähe zur *A. digitalis palmaris*, Ebene A, 40x.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, LMTP=*Lig. metacarpale transversum profundum*,
HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.10: Absolute Häufigkeit der Vater-Pacini-Körperchen in den Kompartimenten mit einem Schwerpunkt der Verteilung in den Lumbricalis-Kompartimenten (15 Vater-Pacini-Körperchen).

3.1.3 Golgi-Mazzoni-Körperchen

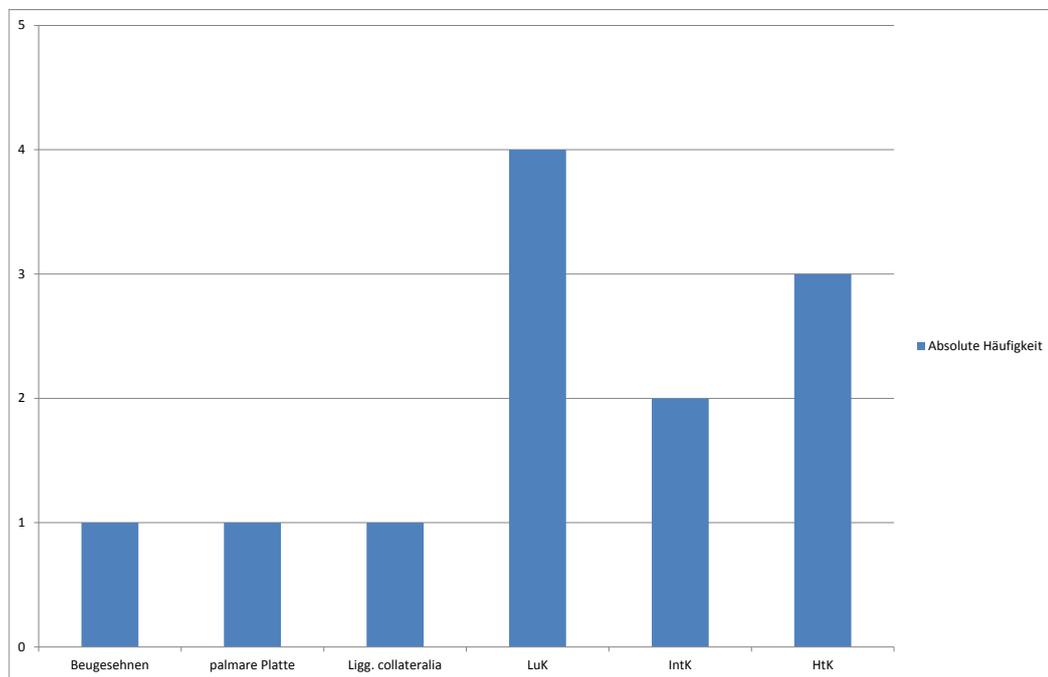
GMK (s. Abbildung 3.11) liegen mit 4 GMK zumeist in den LuK (Mittelwert=0,33), folgend mit 3 GMK in Beziehung zu dem *AbDM* (Mittelwert=0,25) und 2 GMK in den IntK (Mittelwert=0,17) (s. Abbildung 3.12). Jeweils 1 GMK findet man an den *Ligg. collateralia*, an der palmaren Platte sowie assoziiert zu den Beugesehnen (Mittelwerte=0,08) (s. Abbildung 3.12). Für alle Kompartimente lautet der Medianwert=1.

Die Nullhypothesen $H_0(H_1)$ und $H_0(H_2)$ bestätigen sich: Rechte und linke Hände (asymptotische Signifikanz $p=0,564$ im Chi-Quadrat-Test) sind an GMK ebenso wie die Hände im Vergleich der Geschlechter (asymptotische Signifikanz $p=0,21$ im Chi-Quadrat-Test) gleich ausgestattet.



Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.11: Golgi-Mazzoni-Körperchen in HE-Färbung in der Nähe zur Sehne des *M. flexor digitorum profundus*, Ebene A, 40x.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, LMTP=*Lig. metacarpale transversum profundum*,
IntK=Interosseus-Kompartiment, HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.12: Absolute Häufigkeit der Golgi-Mazzoni-Körperchen in den Kompartimenten mit Schwerpunkt der Verteilung in den Lumbricalis-Kompartimenten (4 Golgi-Mazzoni-Körperchen).

3.1.4 Muskelspindeln

MS (s. Abbildung 3.13) lassen sich am häufigsten in den *Mm. lumbricales* finden (423 MS, Mittelwert=35,25, Medianwert=2), sowie in den *Mm. interossei* (118 MS, Mittelwert=9,83, Medianwert=2) und 6 MS in dem *AbDM* (Mittelwert=0,5, Medianwert=1.5) (s. Abbildung 3.14). In dem *FDM* und der Sehne des *ODM* lassen sich keine MS finden.

Vergleicht man die Anzahl MS der *Mm. lumbricales* untereinander, so lassen sich im *M. lumbricalis I* 64 MS (Mittelwert=5,33, Medianwert=2), 129 MS im *M. lumbricalis II* (Mittelwert=10,75, Medianwert=3), 130 MS im *M. lumbricalis III* (Mittelwert=10,83, Medianwert=3) und im *M. lumbricalis IV* 100 MS finden (Mittelwert=8,33, Medianwert=2) (s. Abbildung 3.15).

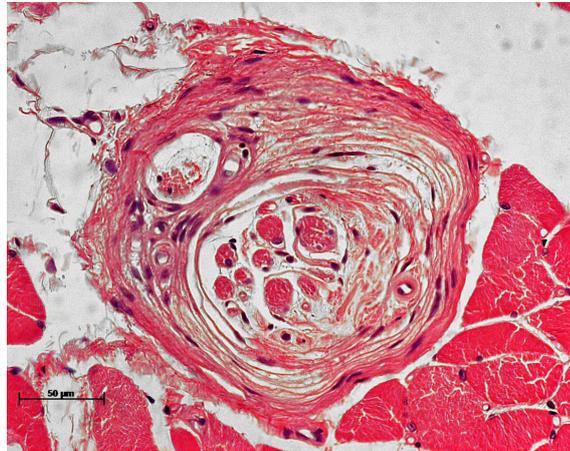
Für den Vergleich der Verteilung der MS bezüglich der rechten und linken Hand sowie der Geschlechter der Spender gilt, dass die Nullhypothesen $H_0(H_1)$ und $H_0(H_2)$ zustimmen. Linke und rechte Hände sind gleich ausgestattet (asymptotische Signifikanz $p=0,547$ im Chi-Quadrat-Test) ebenso wie die Hände beider Geschlechter (asymptotische Signifikanz $p=0,841$ im Chi-Quadrat-Test).

Die Nullhypothese $H_0(H_3)$ einer Normalverteilung aller MS unabhängig zur Lage des *LMTP* lässt sich bei einem p-Wert von 0,058 im Kolmogorov-Smirnov-Test für 2 Stichproben festhalten. Allerdings sind die extremsten Differenzen (+0,179 und -0,179) nicht entsprechend hoch, dass ein nichtparametrischer Test eingesetzt werden müsste. Der Umfang an Stichproben ist außerdem groß genug. Zudem sind die Daten intervallskaliert, sodass die Voraussetzungen für einen t-Test für unabhängige Stichproben erfüllt sind.

Der t-Wert liegt bei 2,929 für ungleiche Varianzen (Levene-Test $p=0,000$). Somit ist der t-Wert größer als das Signifikanzniveau von 5% (2,25% bei zweiseitiger Betrachtung). Bei einer zweiseitigen Signifikanz von $p=0,004$ muss die Nullhypothese $H_0(H_3)$ der Gleichverteilung verworfen werden und es bestätigt sich die Arbeitshypothese H_3 . Die MS zeigen eine von dem *LMTP* abhängige Verteilung.

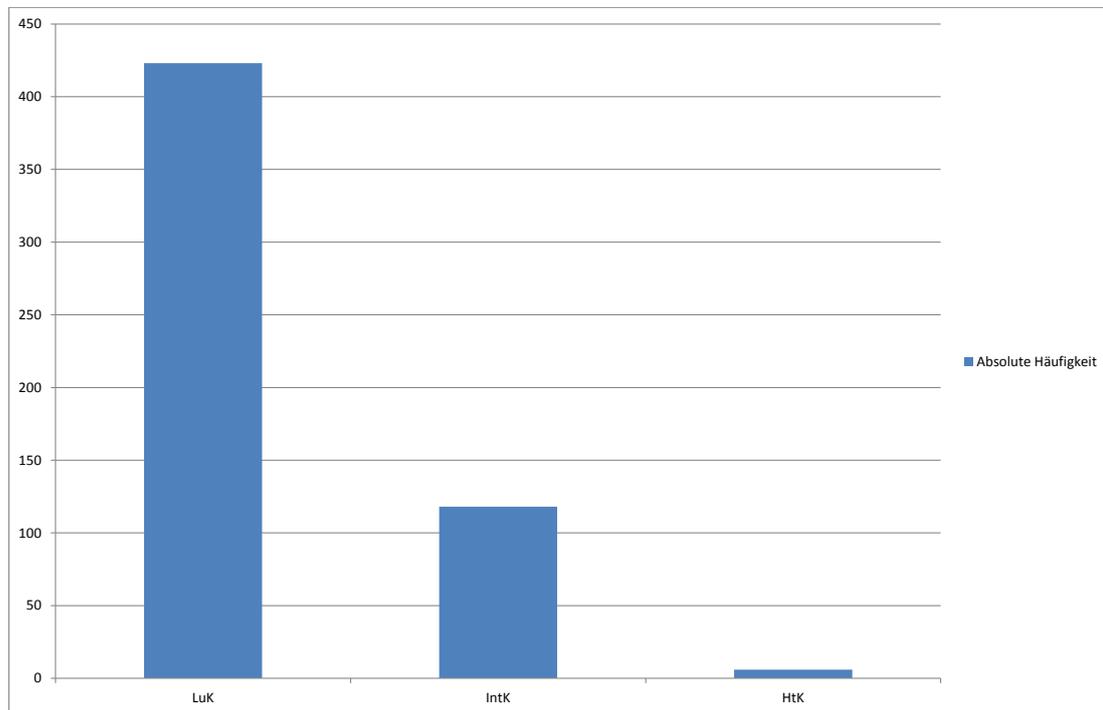
Diese abhängige Verteilung lässt sich durch einen Unterschied in der Verteilung der MS zwischen den *Mm. interossei* und den *Mm. lumbricales* erklären. Daher werden diese beiden Kompartimente noch einmal einzeln gegeneinander getestet.

Die *Mm. interossei* zeigen eine Normalverteilung (zweiseitige Signifikanz $p=0,742$ im Kolmogorov-Smirnov-Test). Die Varianzen sind gleich (Levene-Tests $p=0,129$). Der t-Wert ist mit 1,225 kleiner als der angenommene α -Fehler von 5 % (2,25% bei zweiseitiger Betrachtung). Bei einer zweiseitigen Signifikanz von 0,225 wird die Nullhypothese $H_0(H_3)$ behalten und die MS sind in den *Mm. interossei* unabhängig von der Lage zum Band gleich verteilt. Die *Mm. lumbricales* zeigen im Kolmogorov-Smirnov-Test keine Normalverteilung (zweiseitige Signifikanz $p=0,015$). Bei einer asymptotischen zweiseitigen Signifikanz von 0,001 im Mann-Whitney-Test lässt sich die Arbeitshypothese H_3 festhalten. Die MS sind in den *Mm. lumbricales* abhängig von der Lage zum *LMTP* unterschiedlich verteilt.



Bearbeitet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.13: Muskelspindel in HE-Färbung im *M. lumbricalis II*, Ebene A, 40x.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, IntK=Interosseus-Kompartiment,
HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.14: Absolute Häufigkeit der Muskelspindeln in den Kompartimenten: 423 Muskelspindeln in den *Mm. lumbricales*, 118 Muskelspindeln in den *Mm. interossei* und 6 Muskelspindeln in dem *M. abductor digiti minimi*.

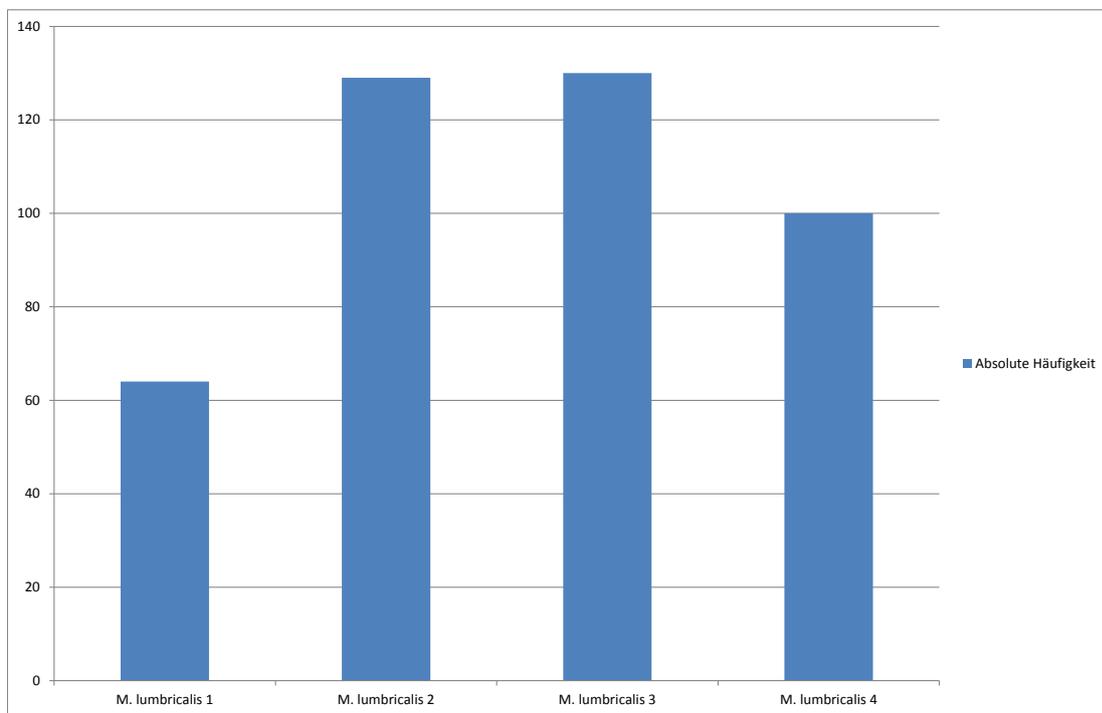


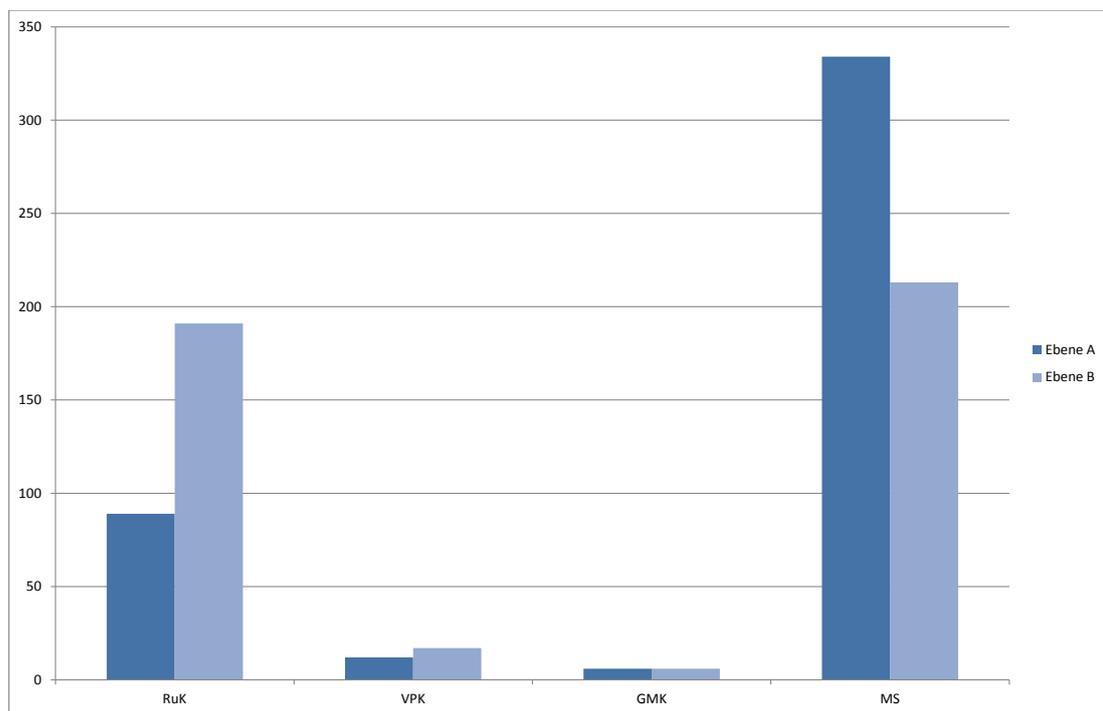
Abbildung 3.15: Absolute Häufigkeit der Muskelspindeln in den *Mm. lumbricales*: In den *Mm. lumbricales II et III* lassen sich etwa gleich viele (129 bzw. 130 Muskelspindeln), im *Mm. lumbricales I* die wenigsten Muskelspindeln (64) finden.

3.2. VERGLEICH DER EBENE A UND B HINSICHTLICH DER VERTEILUNG UND TOPOGRAFIE DER PROPRIOZEPTOREN

3.2 *Vergleich der Ebene A und B hinsichtlich der Verteilung und Topografie der Propriozeptoren*

In den summierten Kartierungen lassen sich in Ebene A insgesamt 441 und in Ebene B 427 Propriozeptorenanschnitte finden.

Dabei findet man in Ebene A und B jeweils 6 GMK, die Anzahl der VPK steigt von 12 (Ebene A) auf 17 (Ebene B) an. Die größten Unterschiede liegen in der Häufigkeit von MS und RuK: Die Anzahl an MS sinkt von 334 (Ebene A) auf 213 (Ebene B), die der RuK erhöht sich von 89 (Ebene A) auf 191 (Ebene B) (s. Abbildung 3.16).



RuK=Ruffini-Körperchen, VPK=Vater-Pacini-Körperchen, GMK= Golgi-Mazzoni-Körperchen, MS=Muskelspindeln.

Abbildung 3.16: Absolute Anzahl der Propriozeptoren mit Vergleich von Ebene A und B: Große Unterschiede in der Anzahl der Propriozeptoren lassen sich für die Ruffini-Körperchen (89 bzw. 191) und Muskelspindeln (334 bzw. 213) finden.

3.2.1 Ruffini-Körperchen

In Ebene A liegen 89 RuK und in Ebene B 191 RuK (s. Abbildung 3.16).

In Ebene A liegen die RuK zumeist an den Beugesehnen (36 RuK, Mittelwert=3) und am zweithäufigsten mit 22 RuK an den *Ligg. collateralia* (Mittelwert=1,83). Jeweils weniger als 10 RuK lassen sich in den folgenden Kompartimenten finden: IntK (9 RuK, Mittelwert=0,75), *LMTP* (8 9 RuK, Mittelwert=0,67), HtK (69 RuK, Mittelwert=0,5), LuK (49 RuK, Mittelwert=0,34) und an der palmaren Platte (49 RuK, Mittelwert=0,34) (s. Abbildungen 3.17 und 3.19).

In Ebene B zeigt sich ein anderer Schwerpunkt der Verteilung:

71 RuK befinden sich an den *Ligg. collateralia* (Mittelwert=5,62), 39 RuK an den *Mm. interossei* (Mittelwert=3,25) und 24 RuK an den Beugesehnen (Mittelwert=2) (s. Abbildungen 3.18 und 3.19).

Für beide Ebenen gilt Medianwert=1.

Setzt man die *Ligg. collateralia* in Beziehung zu der Lokalisation der Entnahmestelle, so fällt Folgendes auf:

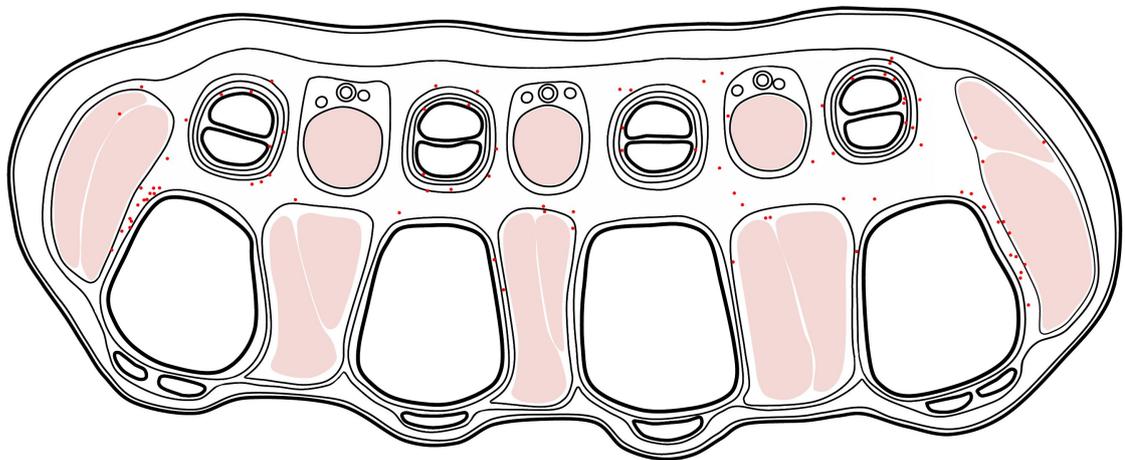
In Ebene A befinden sich 8 der insgesamt 22 RuK radial des 2. (Mittelwert=0,67) und 10 RuK ulnar des 5. Metakarpalknochens (Mittelwert=0,83). Nur einzelne RuK liegen zwischen dem 2. und 5. Metakarpalknochen an den *Ligg. collateralia* (s. Abbildung 3.20).

In Ebene B befinden sich die meisten RuK (20 RuK, Mittelwert = 1,67, Medianwert=2) an der Lokalisation *IDR* bzw. *IDL* 2-3. An der radialen bzw. ulnaren Außenseite der Metakarpalknochen liegen 13 RuK (Mittelwert=1,08) bzw. 15 RuK (Mittelwert=1,25) und an der Lokalisation *IDR* bzw. *IDL* 3-4 und 4-5 ebenfalls 13 RuK (Mittelwert=1,08) bzw. 10 RuK (Mittelwert=0,83) (s. Abbildung 3.20). Es ergibt sich insgesamt: *IDR* bzw. *IDL* 2-3 > ulnar > radial = *IDR* bzw. *IDL* 3-4 > *IDR* bzw. *IDL* 4-5.

Die übrigen Medianwerte betragen einen Wert von 1.

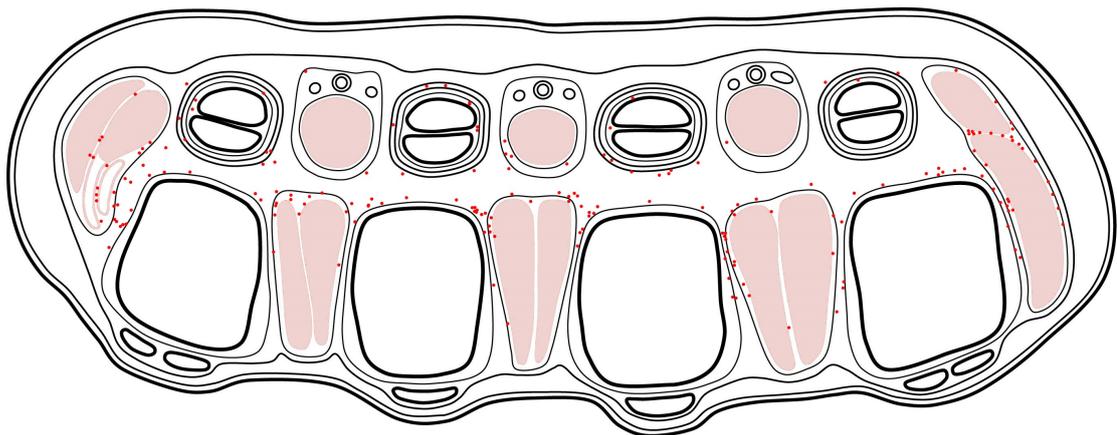
Die RuK an den *Ligg. collateralia* in Ebene B zeigen im Gegensatz zur Ebene A nicht den Schwerpunkt, an der radialen bzw. ulnaren Außenseite des 2. und 5. Metakarpalknochens zu liegen, sondern verteilen sich dorsal des *LMTP* und der palmaren Platte entlang der *Ligg. collateralia*. Dabei liegen sie im Wesentlichen mit den RuK der IntK auf gleicher Höhe der palmaren Fläche der Metakarpalknochen (s. Abbildung 3.18).

Desweiteren befinden sich in Ebene B mehr RuK an den Muskeln bzw. Sehnen der Hypothenarmuskulatur, ebenso wie an der radialen Außenseite der *Mm. lumbricalis 1 et interossei 1* und insbesondere zwischen diesen (s. Abbildung 3.18). Für Ebene A und B gilt, dass sich nur vereinzelt RuK zwischen dem A1-Ringband der Beugesehnen und dem LuK befinden (s. Abbildungen 3.17 und 3.18).



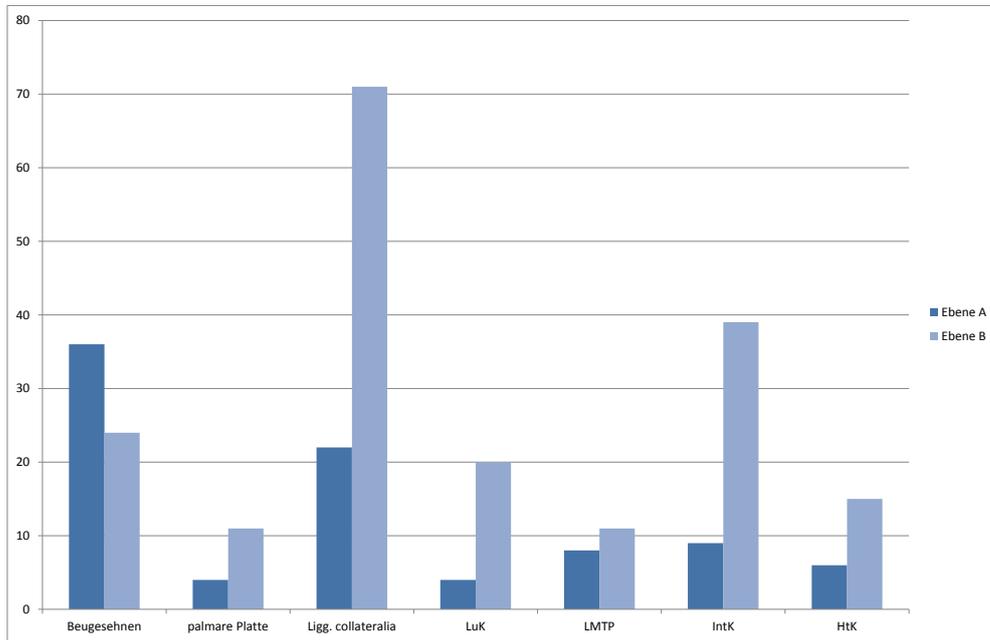
•=Ruffini-Körperchen. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.17: Kartierung der Ruffini-Körperchen der Ebene A mit Verteilungsmuster insbesondere an den Beugesehnen sowie an der radialen bzw. ulnaren Außenseite des 2. und 5. Metakarpalknochens.



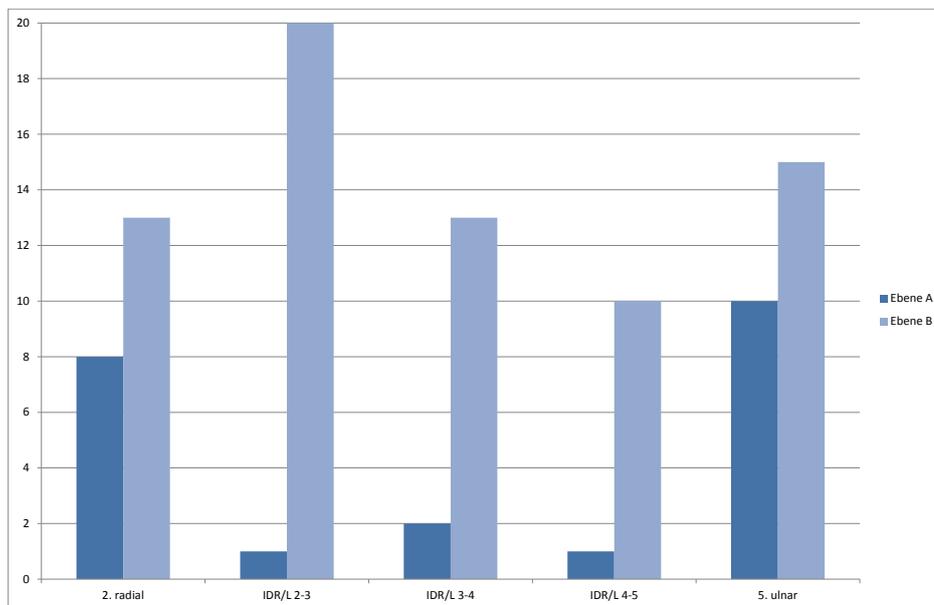
•=Ruffini-Körperchen. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.18: Kartierung der Ruffini-Körperchen der Ebene B mit Verteilungsmuster insbesondere entlang der *Ligg. collateralia* sowie im Hypothenar-Kompartiment und zwischen dem *Mm. lumbricalis 1 et interosseus 1*.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, LMTP=*Lig. metacarpale transversum profundum*,
IntK=Interosseus-Kompartiment, HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.19: Absolute Anzahl der Ruffini-Körperchen in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B: Der Schwerpunkt der Verteilung liegt an den *Ligg. collateralia*, den Beugesehnen sowie den Interosseus-Kompartimenten.



IDR bzw. IDL=Interdigital rechts bzw. links.

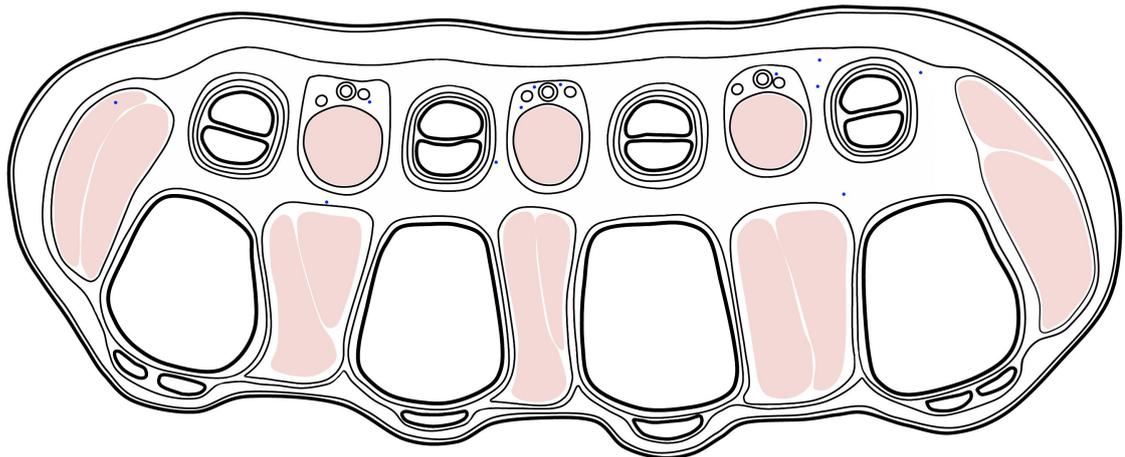
Abbildung 3.20: Absolute Häufigkeit der Ruffini-Körperchen entlang der *Ligg. collateralia* mit Vergleich von Ebene A und B: In Ebene A zeigt sich ein Schwerpunkt in „2. radial“ und „5. ulnar“, für Ebene B ergibt sich eine gleichmäßigere Verteilung.

3.2.2 Vater-Pacini-Körperchen

In der Ebene A liegen von den insgesamt 12 VPK die VPK gehäuft in den LuK (5 VPK, Mittelwert=0,42) sowie an den Beugesehnen (4 VPK, Mittelwert=0,33, Medianwert=2). In Assoziation zu dem *LMTP* liegen 2 VPK (Mittelwert=0,17) und als eine Besonderheit lässt sich 1 VPK im *AbDM* festhalten (Mittelwert=0,08) (s. Abbildungen 3.21 und 3.23). Die übrigen Medianwerte betragen einen Wert von 1.

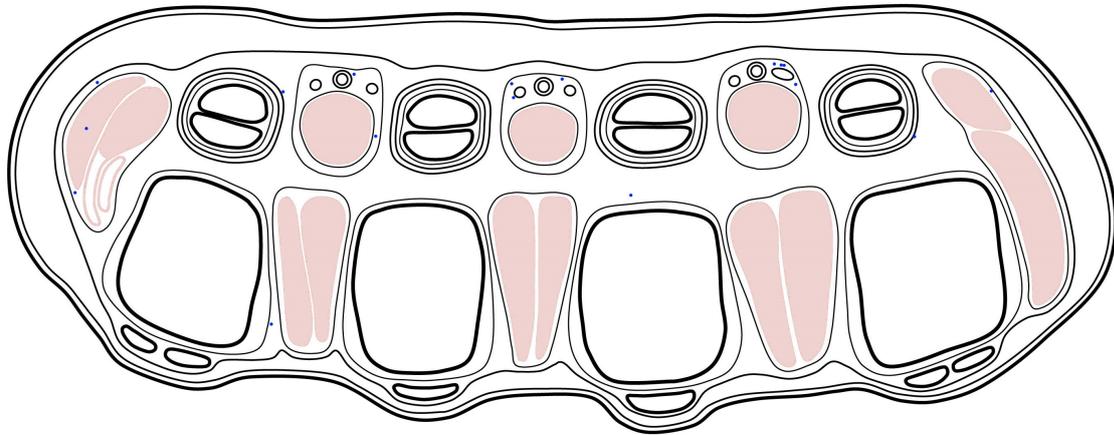
In Ebene B liegen 10 VPK der insgesamt 17 VPK in den LuK (Mittelwert=0,83) (s. Abbildung 3.23). Auffällig dabei ist besonders das LuK 2, in dem 4 VPK eng beieinander liegen sowie das 3. LuK mit 3 VPK (s. Abbildungen 3.22 und 3.23). An den Beugesehnen lassen sich 2 VPK (Mittelwert=0,17), in Beziehung zu der palmaren Platte sowie den *Ligg. collateralia* 1 VPK (Mittelwert=0,08) und an dem *AbDM* 3 VPK feststellen (Mittelwert=0,25). 1 VPK liegt dabei im *AbDM*, die beiden anderen sind dorsal und palmar des *AbDM* (s. Abbildungen 3.22 und 3.23). Für die VPK in den Kompartimenten der Ebene B beträgt der Medianwert=1.

24 der 29 VPK liegen palmar des *LMTP* (s. Abbildungen 3.21 und 3.22).



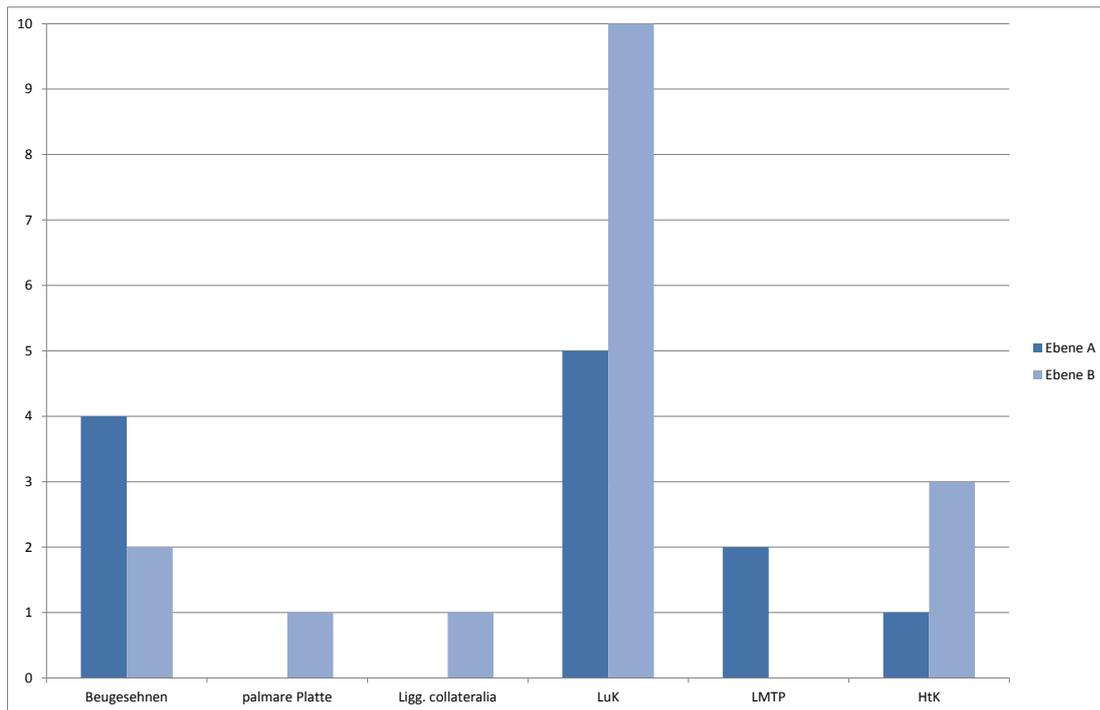
•=Vater-Pacini-Körperchen. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.21: Kartierung der Vater-Pacini-Körperchen der Ebene A mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten.



•=Vater-Pacini-Körperchen Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.22: Kartierung der Vater-Pacini-Körperchen der Ebene B, ebenfalls mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, LMTP=*Lig. metacarpale transversum profundum*,
HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.23: Absolute Anzahl der Vater-Pacini-Körperchen in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B; Insbesondere in den Lumbricalis-Kompartimenten liegen vermehrt Vater-Pacini-Körperchen, doch auch an den Beugesehnen sowie im Hypothenar-Kompartiment.

3.2.3 Golgi-Mazzoni-Körperchen

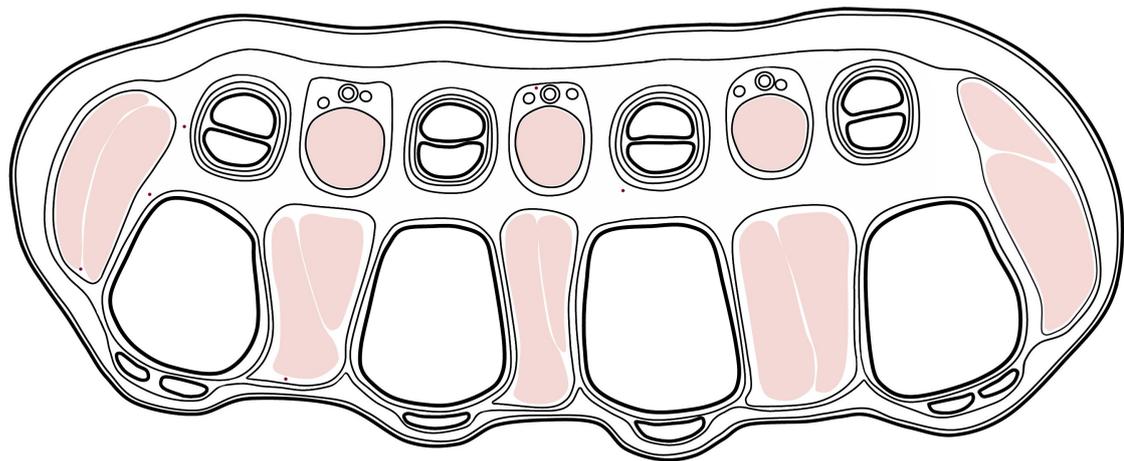
In beiden Ebenen kommen jeweils 6 GMK vor (s. Abbildung 3.26).

In Ebene A sind die GMK über die Kompartimente verteilt: Jeweils 1 GMK liegt in den Kompartimenten der Beugesehne, der palmaren Platte, der *Ligg. collateralia*, des LuK, des IntK sowie des *AbDM* (Mittelwerte=0,08, Medianwerte=1) (s. Abbildungen 3.24 und 3.26). Herausheben lässt sich, dass 3 GMK ulnar des 5. Metakarpalknochens vorkommen (s. Abbildung 3.24).

In Ebene B kommen die GMK in nur 3 Kompartimenten vor und dabei besonders in den LuK (3 GMK, Mittelwert=0,25). Am *AbDM* befinden sich 2 GMK (Mittelwert=0,17) (s. Abbildungen 3.25 und 3.26) und 1 GMK liegt im IntK (Mittelwert=0,08) (s. Abbildungen 3.25 und 3.26).

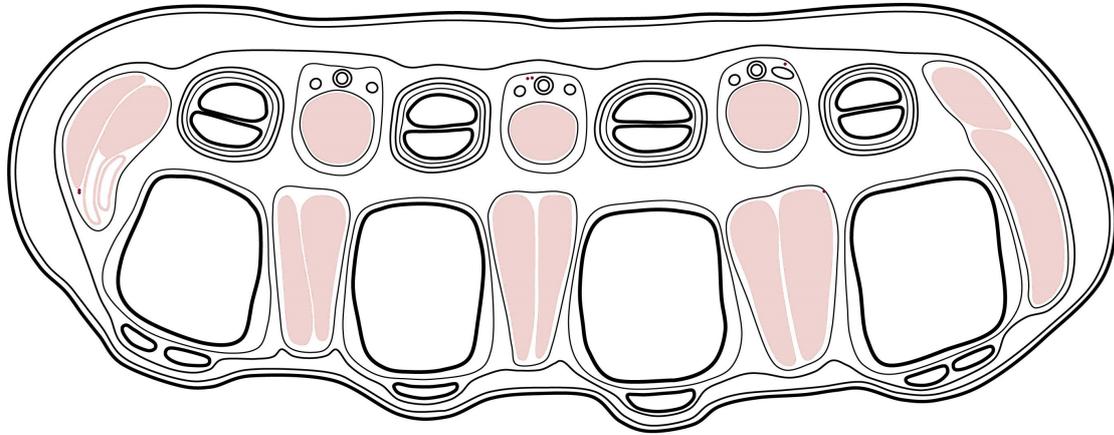
Für alle genannten Kompartimente beträgt der Medianwert=1.

Auffällig ist, dass aus beiden Ebenen die 3 GMK dorsal des *AbDM* an ähnlicher Lokalisation liegen ebenso an ähnlicher Stelle wie das VPK aus der Ebene B (s. 3.25).



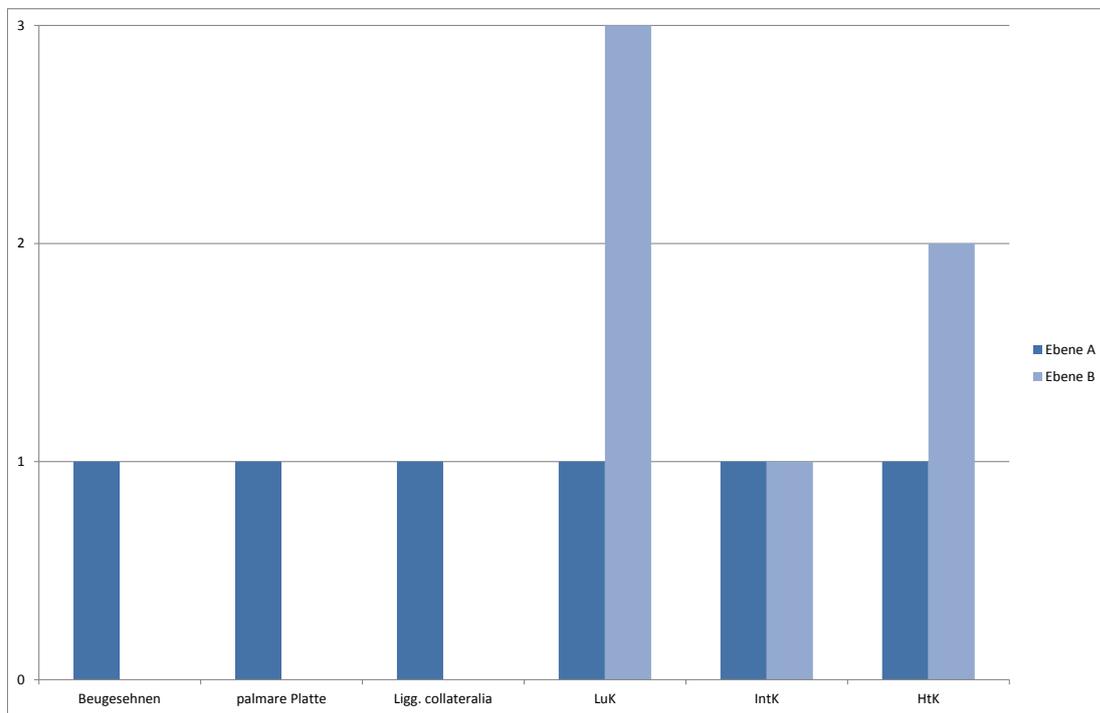
•=Golgi-Mazzoni-Körperchen. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.24: Kartierung der Golgi-Mazzoni-Körperchen der Ebene A ohne eindeutig erkennbare Verteilungsmuster.



•=Golgi-Mazzoni-Körperchen. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.25: Kartierung der Golgi-Mazzoni-Körperchen der Ebene B mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten sowie dorsal des *M. abductor digiti minimi*.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, IntK=Interosseus-Kompartiment,
HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.26: Absolute Anzahl der Golgi-Mazzoni-Körperchen in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B: Es zeigt sich eine Verteilung über mehrere Kompartimente mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten.

3.2.4 Muskelspindeln

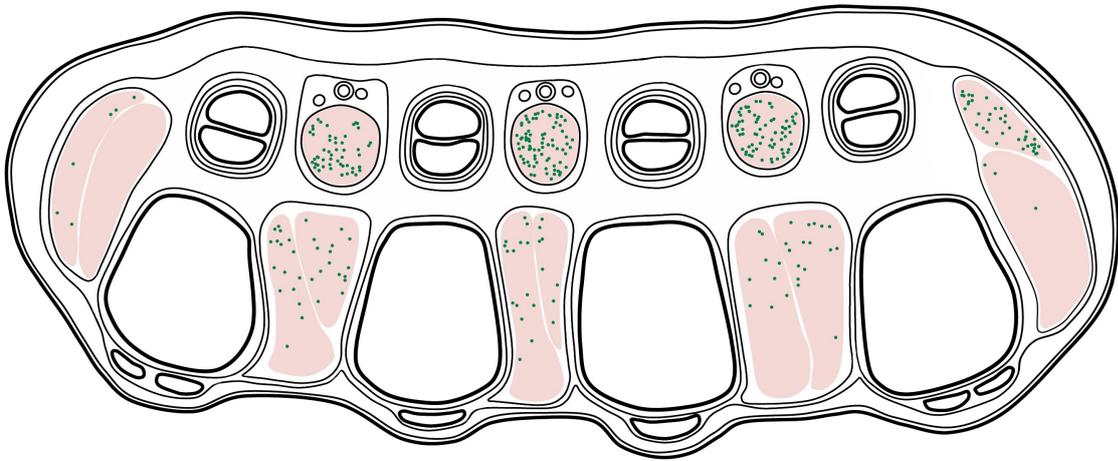
Beide Ebenen zeigen eine vergleichbare Verteilung der MS (s. Abbildung 3.29).

In Ebene A befinden sich MS besonders in den *Mm. lumbricales* (240 MS, Mittelwert=20, Medianwert=3), wobei sich die Anzahl der MS in den verschiedenen *Mm. lumbricales* unterscheidet (*M. lumbricalis I* mit 38 MS, Mittelwert=3,17, Medianwert=2; *M. lumbricalis II* mit 70 MS, Mittelwert=5,83, Medianwert=3; *M. lumbricalis III* mit 78 MS, Mittelwert=6,5, Medianwert=4; *M. lumbricalis IV* mit 54 MS, Mittelwert=4,5, Medianwert=3) (s. Abbildung 3.30).

Im Vergleich dazu sind es deutlich weniger MS in den *Mm. interossei* (88 MS, Mittelwert=7,33, Medianwert=2) (s. Abbildung 3.29), deren Verteilung an MS etwa gleichmäßig ist, mit Ausnahme des *M. interosseus I*, in dem sich nur 3 MS finden lassen (s. Abbildung 3.27). Im *AbDM* befinden sich 6 MS (Mittelwert=0,5, Medianwert=1,5).

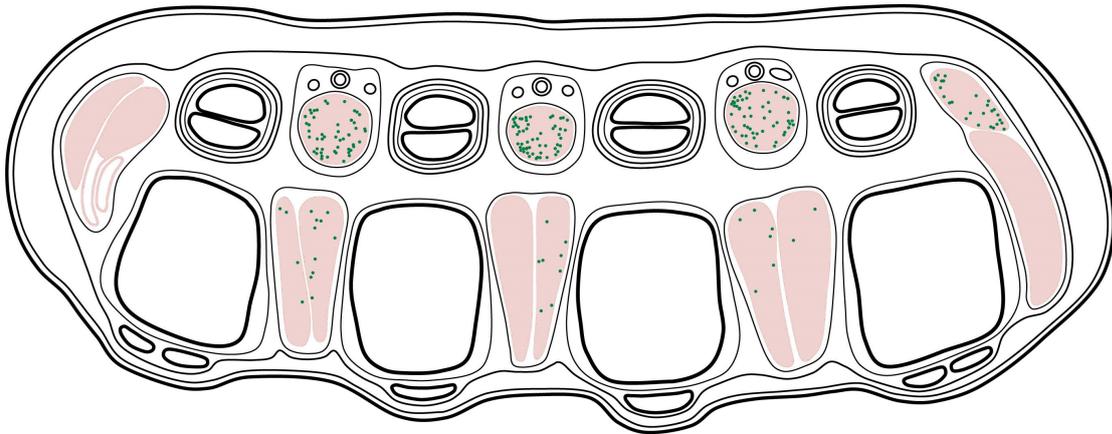
In der Ebene B ist die Verteilung und Lokalisation ähnlich (s. Abbildung 3.29). Es liegen mit 183 MS in den *Mm. lumbricales* (Mittelwert=15,25, Medianwert=2) deutlich mehr MS als in den *Mm. interossei* mit 30 MS (Mittelwert=2,5, Medianwert=1).

Die Anzahl der MS in den *Mm. lumbricales II-IV* ist von radial nach ulnar abnehmend (*M. lumbricalis II* mit 59 MS, Mittelwert=4,92, Medianwert=2,5; *M. lumbricalis III* mit 52 MS, Mittelwert=4,33, Medianwert=2; *M. lumbricalis IV* mit 46 MS, Mittelwert=3,83, Medianwert=2). Der *M. lumbricalis I* weist die wenigsten MS auf (26 MS, Mittelwert = 2,17) (s. Abbildungen 3.28 und 3.30). In dem *AbDM* sowie *M. interosseus I* liegen keine MS (s. Abbildungen 3.28 und 3.30).



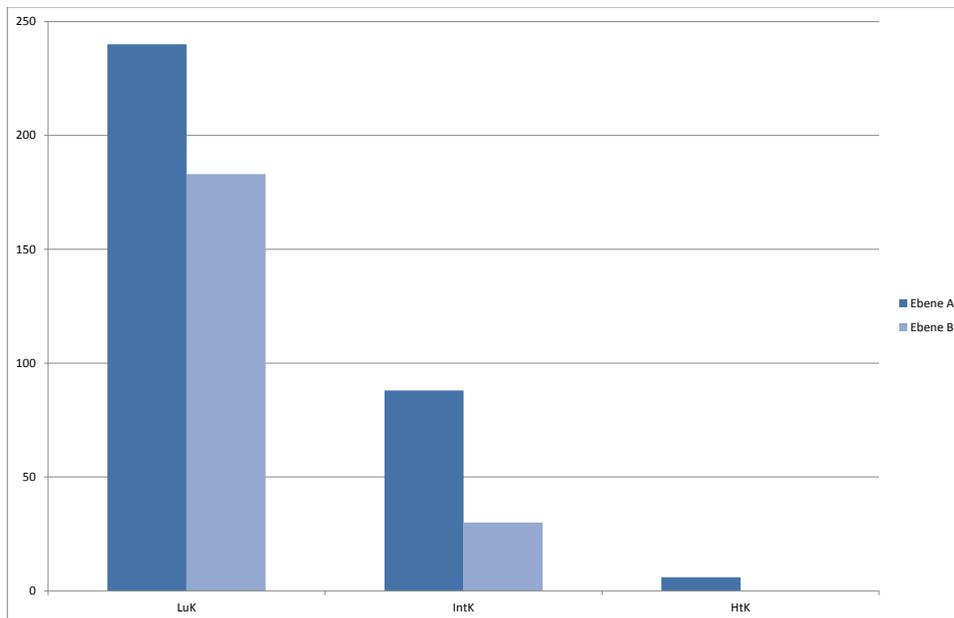
●=Muskelspindeln. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.27: Kartierung der Muskelspindeln der Ebene A mit deutlich mehr Muskelspindeln in den *Mm. lumbricales* als in den *Mm. interossei*. Im *M. abductor digiti minimi* befinden sich 6 Muskelspindeln.



●=Muskelspindeln. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.28: Kartierung der Muskelspindeln der Ebene B mit einem ähnlichen Verteilungsmuster wie in Ebene A (insgesamt weniger Muskelspindeln, s. Abbildung 3.27). Im *M. abductor digiti minimi* befinden sich keine Muskelspindeln.



LuK=Lumbricalis-Kompartiment, IntK=Interosseus-Kompartiment,
HtK=Hypothenar-Kompartiment.

Abbildung 3.29: Absolute Anzahl der Muskelspindeln in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B: In Ebene B lassen sich jeweils weniger Muskelspindeln als in Ebene A finden.

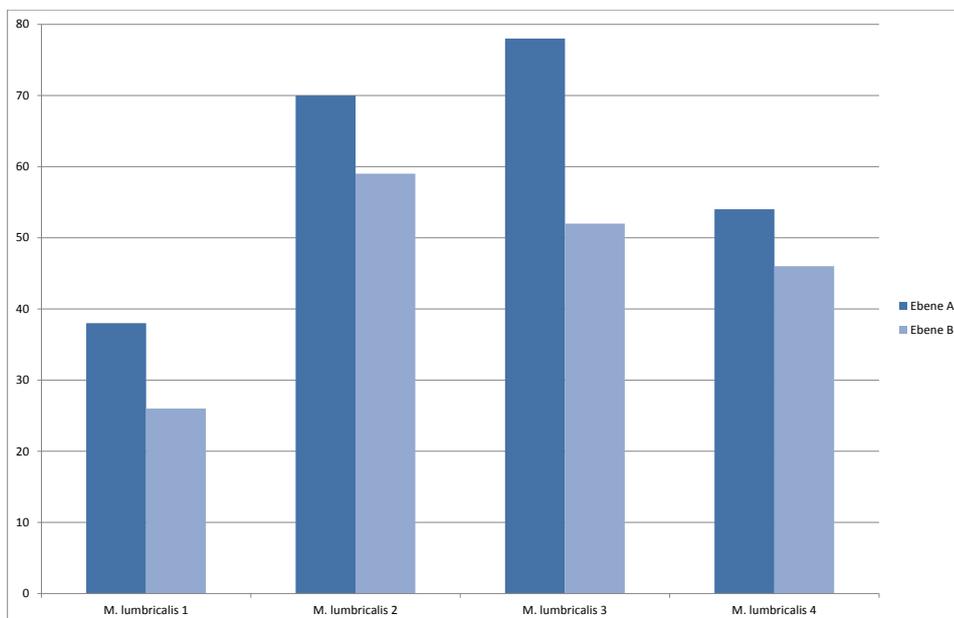
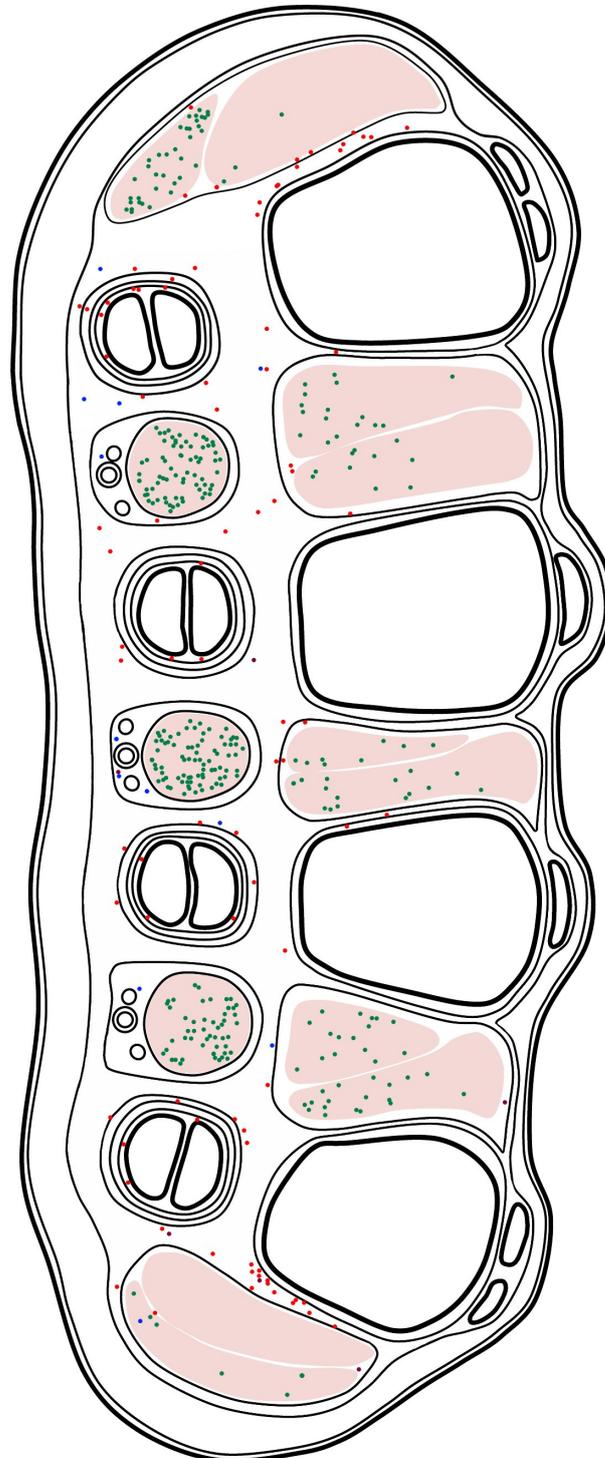


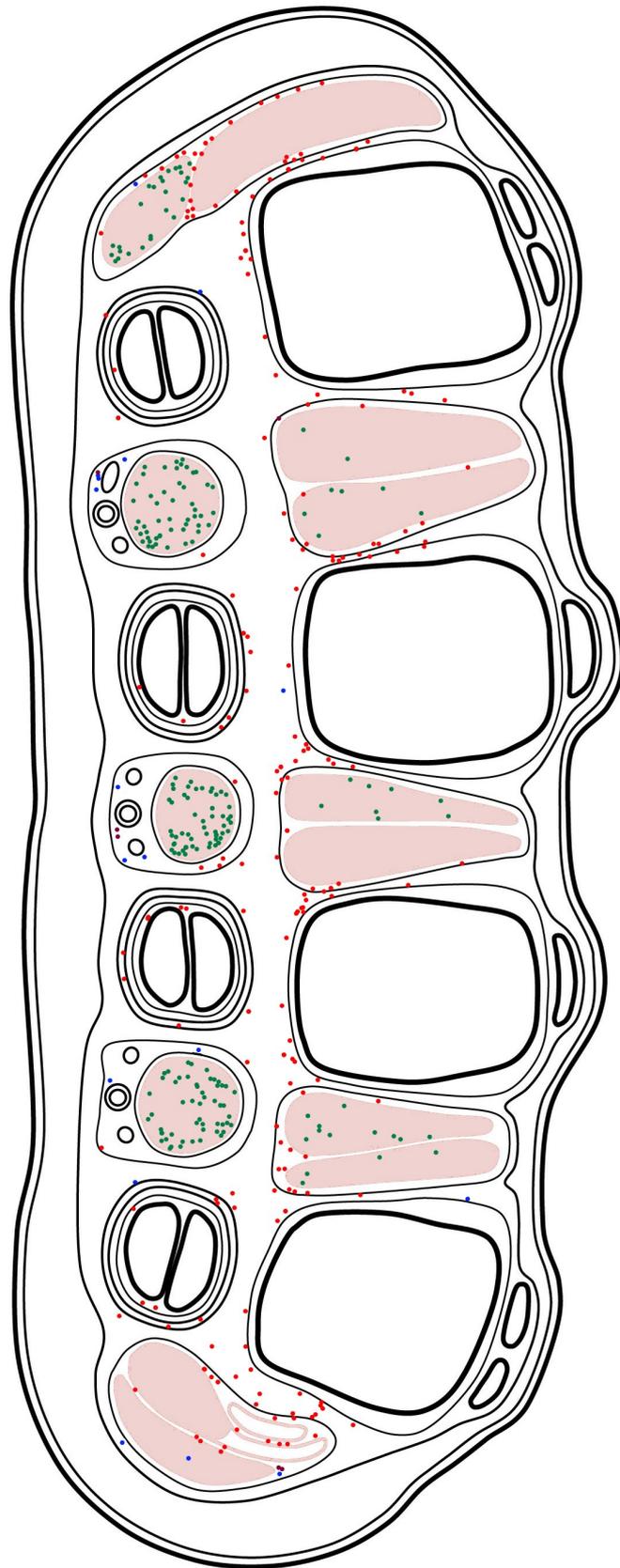
Abbildung 3.30: Absolute Anzahl der Muskelspindeln in den *Mm. lumbricales* mit Vergleich von Ebene A und B: Im *M. lumbricalis I* lassen sich die wenigsten Muskelspindeln finden.

Abbildungen 3.31 (Ebene A) und 3.32 (Ebene B) zeigen zusammenfassend das Verteilungsmuster der Propriozeptoren RuK, VPK, GMK und MS der Metakarpophalangealregion 2.-5. in den Ebenen A und B.



●=Ruffini-Körperchen, ●=Vater-Pacini-Körperchen, ●=Golgi-Mazzoni-Körperchen,
●=Muskelspindeln. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.31: Zusammenfassende Kartierung aller Propriozeptoren der Ebene A.



●=Ruffini-Körperchen, ●=Vater-Pacini-Körperchen, ●=Golgi-Mazzoni-Körperchen,
●=Muskelspindeln. Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

Abbildung 3.32: Zusammenfassende Kartierung aller Propriozeptoren der Ebene B. 61

KAPITEL 4

Diskussion

Das Ziel der Dissertation war es, ein kartiertes Verteilungsmuster der Propriozeptoren RuK, VPK, GMK und MS in der MCP-Region 2.-5. zu erstellen. Dieses Ziel wurde erreicht und das Verteilungsmuster lässt sich in das funktionelle System der MCP-Region einordnen und die propriozeptiven Eigenschaften des *LMTP*, der umliegenden Gewebe und der MCP-Region im Ganzen interpretieren.

4.1 Methodenkritik

Körperspenden:

Aufgrund eines hohen Durchschnittsalters der Körperspender der Heinrich-Heine-Universität war die Auswahl der Körperspender für diese Dissertation vorselektiert. Die Körperspender waren im Alter von 60 bis 94 Jahren und haben ein Durchschnittsalter von 83 Jahren.

Makroskopische Präparation:

Die Anleitung der Makroskopischen Präparation zur Entnahme des Gewebes der MCP-Region (s. Kapitel 2.2) stellt eine gute Vorgehensweise dar, das *LMTP* mit den umliegenden Strukturen und Geweben im Ganzen zu entnehmen, ohne die dabei relevanten Bereiche zu verletzen und einen Ausschluss der Körperspende zu bewirken.

Eine leichte Einschränkung zeigt sich in der Entnahme des Gewebes zwischen den Metakarpalia nach dorsal. Aufgrund des engen Raumes zwischen den Metakarpalknochen ist die Führung des Skalpell nur eingeschränkt möglich, ebenso wie die Mobilisation des freipräparierten Gewebes ohne Schädigung nach palmar (um von möglichst weit dorsal nach lateral zur nächsten Gelenkkapsel weiter präparieren zu können). Somit konnten nicht alle *Mm. interossei* im Ganzen entnommen werden.

Histologie:

Bei der Erfassung der Propriozeptoren kann es aufgrund der Histomorphologie zu Fehlinterpretationen kommen:

Da RuK Blutgefäße enthalten können, konnten auch Anschnitte kleiner Gefäße als RuK und umgekehrt interpretiert werden. Liegen 2 VPK eng beieinander, lassen sich diese als 1 GMK fehldeuten. Ein zu weit proximal oder distal angeschnittenes VPK, ohne Anschnitt des Innenkolbens, lässt sich mit dem Anschnitt eines Nervens verwechseln (insbesondere beim gleichzeitigen Vorliegen von histologischen Artefakten). Falls bei einem GMK nur ein Innenkolben angeschnitten wurde, lässt sich dieses mit einem VPK verwechseln. Bei

den MS kann es vorkommen, dass die *intrafusalen* Muskelfasern noch nicht angeschnitten worden sind, sodass diese Propriozeptoren mit Nerven verwechselt werden können.

Da insbesondere MS eine Länge von über 5mm erreichen können, ist ebenso ein doppelter Anschnitt des Propriozeptors möglich. Sollte dieselbe MS wie aus Ebene A in Ebene B ein weiteres Mal angeschnitten worden sein, wurde diese mit in die Auswertung einbezogen. Es ist im Nachhinein nicht möglich, allein aufgrund der ähnlichen Lokalisation festzustellen, ob es sich tatsächlich um den selben Propriozeptor wie aus Ebene A oder ob es sich um eine weitere MS handelt, die zufällig an der selben Lokalisation liegt.

Für die topografische Kartierung ist es dabei entscheidend, dass beide Anschnitte eingezeichnet wurden, um das Verteilungsmuster der MS für beide Ebenen abbilden zu können. Mit einer vollständigen Betrachtung der histologischen Schnitte zwischen Ebene A und Ebene B ließe sich diese Möglichkeit eines doppelten Anschnittes und somit die korrekte Anzahl an MS erfassen. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist dabei allerdings sehr groß und es wird davon ausgegangen, dass zu früh angeschnittene, nicht erkannte MS und doppelt gezählte MS sich im statistischen Mittel annähernd aufheben.

Neben den Altersveränderungen der Strukturen konnten auch bei der histologischen Bearbeitung Fixierungs-, Schnitt-, Färbe- und Schrumpfungartefakte entstehen.

Nicht eindeutige Propriozeptoren (insgesamt 24 Propriozeptoren) wurden nicht in die Statistik mit aufgenommen. Dies zeigt jedoch, aufgrund der hohen Anzahl an Propriozeptoren (868), die in die Statistik aufgenommenen worden sind, keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Statistische Auswertung:

Für einen Signifikanztest sollte die Stichprobenzahl hoch genug sein, um ein verlässliches Ergebnis zu bekommen. Für die Anschnitte von insgesamt 280 RuK und 547 MS trifft dies zu. Die Anzahl von 29 VPK und 12 GMK ist jedoch vergleichsweise gering und die Signifikanztests für diese beiden Propriozeptoren müssen eingeschränkt beurteilt werden. Neben der Visualisierung eines Verteilungsmusters liegt ein weiterer Vorteil der topografischen Kartierungen darin, dass mögliche Fehlinterpretationen von falsch negativen oder falsch positiven Propriozeptoren und ihre Lokalisation weniger deutlich hervortreten als in den Kartierungen der einzelnen Hände der Körperspender. In den Kartierungen treten nur an den Lokalisationen vermehrt Propriozeptoren auf wie sie in mehreren Körperspendern gefunden wurden. Einzeln auftretende Propriozeptoren bieten keinen Fokus und fallen nicht im Verteilungsmuster auf. Dieser Vorteil gilt jedoch nur eingeschränkt für die Propriozeptoren mit geringer Anzahl.

Eine Einschränkung der Kartierungen besteht in der begrenzten Möglichkeit, die Lokalisationen der individuell vorliegenden Propriozeptoren und deren Assoziationen zu den Verläufen von Strukturen wie Gefäßen und Nerven in eine für alle Körperspenden einheitliche Abbildung einzuzeichnen.

Bei Betrachtung der topografischen Kartierungen lassen diese insgesamt ein Verteilungsmuster für RuK und MS zu und auch eine Tendenz zur Verteilung der VPK lässt sich erkennen. Das Verteilungsmuster an GMK ließe sich durch mehr Körperspender noch erkennbarer bilden und sollte demnach nicht überbewertet werden.

Insgesamt lässt sich die Erstellung der Propriozeptorenkartierungen im Bereich der MCP-Region 2.-5. in dieser Studie hervorheben, da diese (nach bestem Wissen), bislang noch nicht erstellt wurden.

4.2 Funktionelle Einordnung der Propriozeptoren in die Metakarpophalangealregion 2.-5.

Die MCP-Region 2.-5. stellt den distalsten Bereich der Mittelhand dar, bevor die Muskeln, Sehnen und versorgende Leitungsstrukturen in die Finger ziehen und kann daher nicht für sich alleine betrachtet werden, sondern die Bewegungen der Finger müssen mit einbezogen werden.

Die Region enthält neben den MCP-Gelenken, Muskeln und Leitungsstrukturen verschiedene Bänder, welche untereinander in Verbindung stehen, die MCP-Region stabilisieren und vor unphysiologischen Bewegungen schützen. Das *LMTP* nimmt dabei eine wichtige Rolle ein, und eine besonders zentrale bei der Verteilung und Brechung der Kräfte bei einer *Hyperextension* der Finger [24, 55, 71, 75, 78].

Die Auswertung zeigt, dass sich in der MCP-Region 2.-5. eine hohe Anzahl der Propriozeptoren RuK, VPK, GMK und MS finden lassen, welche gemeinsam die Propriozeption für das *LMTP* und dessen Nachbarstrukturen bilden. Die Propriozeptoren in der MCP-Region liegen dabei nicht zufällig verteilt, sondern bilden Verteilungsmuster.

Ein Vorkommen von Propriozeptoren entlang der Sehnen der *FDP* und *FDS* war bereits bekannt [89], doch diese Dissertation zeigt darüber hinaus, dass sich in jedem Kompartiment im Bereich der MCP-Region Propriozeptoren finden lassen.

Die folgenden Arbeits- bzw. Nullhypothesen lassen sich festhalten:

- $H_0(H_1)$ (die Propriozeptoren sind rechts und links identisch verteilt) lässt sich für alle Propriozeptoren behalten.
- H_2 (die Propriozeptoren sind bei Mann und Frau nicht identisch verteilt) lässt sich für RuK bestätigen. Für VPK, GMK und MS gilt $H_0(H_2)$.
- $H_0(H_3)$ (die Propriozeptoren sind unabhängig von der Lage zum *LMTP* gleich verteilt) liegt für RuK und VPK vor. Für alle MS wird H_3 behalten. Dabei gilt für die MS in den *Mm. interossei* $H_0(H_3)$ und für die MS in den *Mm. lumbricales* H_3 (eine von der Lage zum *LMTP* abhängige Verteilung).

Aufgrund der bekannten Eigenschaften der Propriozeptoren und den nun erstellten topografischen Kartierungen lässt sich die Funktion der Propriozeptoren innerhalb der MCP-Region interpretieren. Dabei handelt es sich jedoch um logische Schlussfolgerungen, die durch weitere Studien überprüft werden müssen.

Die Autoren, deren Beschreibung von Verletzungen und Krankheiten als Beispiele zur Darstellung der klinischen Relevanz der MCP-Region 2.-5. gewählt wurden, äußern sich nicht zu Veränderungen der sensorischen Inputs oder postoperativen feinmotorischen Störungen. Einzig Josty *et al.* erwähnen die postoperativen Einschränkungen in der Benutzung einer Schere nach Ruptur im ulnaren Bereich des *LMTP*. Auf konkrete Details gehen sie dabei allerdings nicht ein [45].

Bei Verletzungen bzw. Erkrankungen innerhalb der MCP-Region sind die nachfolgend interpretierten Funktionen der Propriozeptoren nur noch eingeschränkt möglich bzw. aufgehoben. Als Beispiel lässt sich ein solcher Zustand auf die feinmotorischen Einschränkungen beim Benutzen der Schere des Patienten von Josty *et al.* übertragen (beim Halten der Schere mit dem Daumen und den ulnaren Finger):

Bei einer Ruptur im ulnaren Bereich des *LMTP* bzw. im postoperativen Zustand sind die Bewegungen nur eingeschränkt möglich, z.B. auf Grund von Schmerzen. Doch auch die Erfassung der Bewegungen durch die Propriozeptoren ist beeinträchtigt.

Insbesondere die RuK im ulnaren Bereich der MCP-Region sind betroffen und können ihrer Funktion zur Erfassung der Gelenkstellung nicht exakt nachkommen. Auch die Durchtrennung der im Fallbeispiel genannten A1-Ringbänder der Finger 3. bis 5. [45] führt zu einer Schädigung der RuK, da sie an dieser Lokalisation vermehrt liegen (s. Abbildungen 3.17 und 3.18). Folglich können die feinen Bewegungen der Sehnen der *FDP* und *FDS* nur eingeschränkt registriert werden. Da das *LMTP* als Ansatz für die Hypothenarmuskulatur dient, ist bei Durchtrennung des *LMTP* eine erhöhte Beweglichkeit durch den Einfluss der Hypothenarmuskulatur nicht mehr gegeben, ebenso wie die Regulierung der Feinmotorik (insbesondere die des *AbDM*) durch alle Propriozeptoren. Sollte während der Operation die Muskulatur beschädigt worden sein, können die MS feinmotorische Bewegungen nicht mehr kontrollieren, und es folgen feinmotorische Einschränkungen.

Auch diese Aussagen beruhen lediglich auf theoretischen Überlegungen und müssen durch klinische Studien, z.B. funktionelle bzw. propriozeptive Einschränkungen vor und nach einer Operation, überprüft werden. Die Kartierungen können dabei als Ausgangsbasis für die Fragestellung „An welchen Lokalisationen ist mit welchen feinmotorischen Ausfällen zu rechnen?“ dienen.

Die Aufgabe des *LMTP*, neben Funktionen im physiologischen Bereich wie der Fixierung der Metakarpalköpfe, Stabilisierung des Weichteilgewebes und Führung der Sehnen des *FDP* und *FDS* [71], liegt bei unphysiologischen Bewegungen in der Brechung und Verteilung der Kraft bei z.B. der *Hyperextension* eines Fingers [24]. Diese Übertragung auf die MCP-Region wird von den Propriozeptoren gemessen:

RuK kommen in hoher Anzahl auf Höhe des *LMTP* vor und bestimmen dort die Stellung der MCP-Gelenke und nehmen unphysiologische Bewegungen wahr. Insbesondere aufgrund ihrer Lage an den *Ligg. collateralia* sowie an den Faszien der *Mm. interossei* und Hypothenarmuskulatur können sie eine *Hyperextension* durch die Druckänderungen während der Verteilung einer solchen Kraft wahrnehmen.

Die VPK registrieren eine *Hyperextension* insbesondere bei einer schnellen Beschleunigung der Finger, doch auch durch eine Druckerhöhung der Bandstrukturen wie der palmaren Platte oder des *LMTP*. Ebenso registrieren sie die Stärke der Kontraktion der *Mm. lumbricales*, indem sie die Vibrationen in Folge der Kontraktion erfassen. Die an den Bandstrukturen gelegenen GMK haben eine vergleichbare Funktion wie die VPK und ermitteln zudem die Bewegungsgrenze der Gelenke. Die MS messen eine Dehnung wie auch plötzliche Bewegung der Muskulatur bei *Hyperextension*.

Durch die gemeinsame Funktion aller Propriozeptoren, eine *Extension* bzw. *Hyperextension* wahrzunehmen, lässt sich ein regulatorischer Schutzmechanismus diskutieren.

Die Propriozeptoren messen eine Druckänderung der Bänder und Faszien oder erfassen eine schnelle und plötzliche Bewegung bzw. Dehnung und über eine Verschaltung mit den γ -Motorneuronen im Rückenmark wird die benachbarte Muskulatur motorisch aktiviert [44]. Dies führt in den Muskeln und Sehnen der MCP-Region zu einem erhöhten Muskeltonus bzw. zu einer Flexion, um der *Extension* entgegen zu wirken und die MCP-Gelenke zu schützen. Dabei haben die *Mm. lumbricales* eine geringere, die motorisch stärkeren *Mm. interossei* eine höhere Bedeutung.

4.2.1 Ruffini-Körperchen

RuK reagieren auf sich ändernde Reize wie Dehnungs- und Druckänderungen [30, 32, 42], können Geschwindigkeit und Ausmaß von Bewegungen, die Stellung [28, 44, 67] und Bewegungsgrenzen der Gelenke insbesondere unter *Extension* erfassen [90].

Sie liegen in allen Kompartimenten, doch 3 Kompartimente enthalten besonders viele RuK: An den *Ligg. collateralia*, IntK und assoziiert zu den Beugesehnen (s. Abbildung 3.19). In den topografischen Kartierungen ist zu erkennen, dass sich die RuK an den *Ligg. collateralia* an der lateralen Außenfläche des 2. und 5. Metakarpalknochens (insbesondere in Ebene A) sowie entlang der palmaren Fläche der Metakarpalknochen befinden (Ebene B). Diese liegen auf gleicher Höhe wie die RuK in den IntK und in unmittelbarer Nähe zu den MCP-Gelenken (s. Abbildungen 3.17 und 3.18).

RuK registrieren durch ihren engen topografischen Bezug zu den MCP-Gelenken zum einen direkt die Gelenkposition und zum anderen indirekt, in dem es bei der Kontraktion der *Mm. interossei* zu Druck- und Lageveränderung kommt. Die RuK erfassen dabei die Verschiebung der Muskulatur [44] und lassen Rückschlüsse auf die Stellung der MCP-Gelenke zu.

Zum anderen nehmen RuK die *Hyperextension* eines Fingers wahr. Hogervorst und Brand stellten bereits am vorderen Kreuzband humaner wie auch tierischer Kniegelenke heraus, dass die Propriozeptoren im Bereich von Gelenken neben der *Flexion* besonders bei *Hyperextension* stimuliert werden, die unter Rotation noch verstärkt werden kann [37].

Die Kraft einer *Hyperextension* bei der Überstreckung eines Fingers wird nach lateral über die *Ligg. collateralia* verteilt und dabei auf die Faszien der IntK sowie der Hypothenarmuskulatur übertragen [24]. RuK in diesen Kompartimenten nehmen eine Dehnungs- und Druckänderungen wahr. Diese Messungen sind entscheidend für einen neuromuskulären Reflex, welcher zu einer Muskelantwort führt und der *Hyperextension* entgegenwirkt [58].

Neben der Wahrnehmung der *Hyperextension* haben RuK innerhalb der Kompartimente der IntK und Hypothenarmuskulatur noch eine weitere Aufgabe, die sich ebenso auf die RuK an den Sehnen der *FDP* und *FDS* übertragen lässt: Sie messen Verschiebungen und das Bewegungsausmaß der Muskeln [44], welches sich auf die Gelenkstellung der MCP-Gelenke umrechnen lässt. Daraus folgt, dass dies ebenso für die Stellung der Interphalangealgelenke gilt. Die übrigen RuK liegen entlang des Bandapparates der MCP-Region und erfassen durch Registrierung der Dehnung der Bänder die Bewegungsgrenze der Gelenke und schützen diese vor unphysiologischen Bewegungen.

Desweiteren lässt sich feststellen, dass sich im Vergleich der Geschlechter (5♀, 7♂) Männer eine höhere Anzahl an RuK aufweisen. Statistisch gesehen zeigen Männer allerdings im Unterschied zu Frauen schlechtere Ergebnisse in feinmotorischen Tests, welche die Finger- und Handmuskulatur auf Schnelligkeit und Genauigkeit untersuchen. Frauen können demnach die Muskulatur in den Händen sowie Fingern schneller und genauer steuern und besser „verschiedene Einzelbewegungen zu einer komplexen motorischen Handlung vereinen“ [48]. Die Diskrepanz zwischen dem schlechteren Abschneiden in feinmotorischen Tests sowie einer erhöhten Anzahl an RuK in männlichen Händen lässt sich damit erklären, dass eine gröbere Hand- und Fingermotorik zum Schutz der Person bzw. der Hände eine bessere Kontrolle seitens der Propriozeptoren braucht.

Zusammengefasst messen RuK die Gelenkstellung durch direkte Messung in Nähe zu dem Gelenkspalt und indirekt durch Erfassung der Stellung der Muskeln und Sehnen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Empfinden der *Hyperextension* eines Fingers entlang der Bänder und Faszien: Durch diese Wahrnehmung kann es zu Muskelaktivität kommen, die der *Extension* durch *Flexion* entgegenwirkt und einen Schutzmechanismus darstellt.

4.2.2 Vater-Pacini-Körperchen

VPK messen als schnell adaptierende Propriozeptoren mit einem geringen Schwellenwert hochfrequente Vibrationen, aber auch Beschleunigungen und nehmen schnelle Änderungen von Kräften und Drücken wahr [27, 28, 42].

Die meisten VPK lassen sich Längsstrukturen wie den *Mm. lumbricales*, Sehnen der *FDP* und *FDS* und dem *AbDM* zuordnen (s. Abbildungen 3.21, 3.22 und 3.23). Der Schwerpunkt der Verteilung liegt dabei deutlich an den *Mm. lumbricales* (15 der insgesamt 29 VPK). Die übrigen VPK sind an dem Bandapparat der MCP-Region verteilt (s. Abbildung 3.23).

Nach Wang *et al.* sind besonders die *Mm. lumbricales* für präzise Bewegungen zuständig und in diesem Kompartiment befinden sich neben den MS viele VPK [83]. Daraus lässt sich ableiten, dass die VPK die feinmotorische Regulation der *Mm. lumbricales* mit beeinflussen.

Kommt es zudem zu einer schnellen Beschleunigung der Finger (z.B. Überstreckung), messen VPK diese Bewegung der Muskulatur und es folgt eine Reizübertragung auf die Muskeln der MCP-Region, sodass diese der Fingerüberstreckung durch Flexion entgegenwirken. Darüber hinaus erfassen VPK Vibrationen in Folge von Kontraktionen der *Mm. lumbricales*, welche z.B. bei vorheriger Dehnung der Muskulatur durch die MS erzeugt werden. Diese lassen Rückschlüsse auf die angewandte Kraft zu.

Eine weitere Häufung der VPK liegt an dem *AbDM*, der häufig im ulnaren Bereich des *LMTP* ansetzt [1, 23] (s. Abbildungen 3.21 und 3.22). Dieser Muskel wird durch die VPK während seiner Aktivität zur Bewegung des 5. Fingers feinreguliert, z.B. beim Festhalten von Gegenständen oder beim Faustschluss.

Zimny *et al.* fanden VPK und RuK entlang des *FDP* und *FDS*, welche die Aktivität sowie die Position der Finger wahrnehmen und überwachen [89]. Diese Aussage lässt sich zusammengefasst, zumindest für die VPK und RuK, mit dieser Dissertation bekräftigen und die Funktion ebenso auf die Muskulatur der *Mm. lumbricales* und des *AbDM* übertragen.

Die übrigen VPK befinden sich im Bezug zu Bandstrukturen (s. Abbildung 3.23). Mobargha *et al.* fanden VPK an den *Ligg. carpometacarpale obliquum anterius profundum et carpometacarpale dorsoradiale*, beschrieben dies jedoch als eine ungewöhnliche Lokalisation [58]. Dennoch lässt sich vermuten, dass VPK besonders auf Höhe der palmaren Platte bzw. des *LMTP* die Druckerhöhung der Bandstrukturen unter Belastung (z.B. Verteilung der Kraft einer *Hyperextension*) messen können.

Betrachtet man das *LMTP* als Referenzstruktur, die zwischen palmar und dorsal der MCP-Region unterscheidet, liegen 24 VPK palmar des *LMTP*. Palmar gelegen können sie die Vibrationen und Drücke wahrnehmen, die von der Handfläche ausgehen z.B. beim Festhalten von Gegenständen (s. Abbildungen 3.21 und 3.22).

Desweiteren liegen, bis auf eine Ausnahme, die VPK in den LuK palmar der *Mm. lumbricales* (s. Abbildungen 3.21 und 3.22) und somit in Beziehung zu den *Nn. digitales palmares proprii* und *Aa. digitales palmares communes*. Barbolini *et al.* diskutieren eine vasokonstriktive Funktion der VPK [3], sodass aufgrund dieser Lokalisation die Durchblutung der Finger reguliert werden könnte.

Zusammengefasst haben die an den Muskeln gelegenen VPK eine feinjustierende Funktion in der Fingerbewegung, registrieren darüber hinaus eine Beschleunigung der Muskulatur und frühzeitig die Gefährdung der MCP-Gelenke bei einer *Hyperextension*. Zudem regulieren sie die Durchblutung der Finger aufgrund ihrer topografischen Beziehung zu den *Aa. digitales palmares communes* und nehmen Vibrationen der Kontraktionen der Muskulatur sowie bei Berührung der Handfläche wahr.

4.2.3 Golgi-Mazzoni-Körperchen

GMK lassen sich morphologisch den VPK gegenüber eindeutig abgrenzen: Sie enthalten mindestens 2 Innenkolben und subkapsulär keine Blutgefäße [13, 42, 51]. Mehrere Referenzen beschränken sich jedoch auf eine morphologische Abgrenzung und nennen keinen funktionellen Unterschied gegenüber VPK [13, 22, 34, 51, 84, 88]. Im Lehrbuch der Histologie „Welsch“ wird z.B. lediglich geschrieben: „Lamellenkörper mit 2 oder mehr Innenkolben werden auch Golgi-Mazzoni-Körperchen genannt“ [84]. Nach diesen Referenzen haben VPK dieselben funktionellen Eigenschaften wie GMK.

Da die Morphologie (und Lage) jedoch die Funktion eines Propriozeptors bestimmt, muss es funktionelle Unterschiede zwischen GMK und VPK geben. Es lassen sich insgesamt nicht viele funktionell beschreibende Referenzen für GMK finden, sodass sich zusätzliche anatomische Studien für weitere Informationen über GMK empfehlen lassen.

Im funktionellen Unterschied zu den VPK wird die Erfassung von niederfrequenten Vibrationen [42] sowie die auf Gelenke einwirkenden Kräfte [11, 53] und deren ermittelte Bewegungsgrenzen [11] genannt.

Insgesamt lassen sich in beiden Ebenen 12 GMK finden (s. Abbildung 3.26).

Dabei ähnelt die Verteilung an GMK insgesamt die der VPK, da sie gehäuft in den LuK und dabei palmar der *Mm. lumbricales* sowie dorsal des *AbDM* vorkommen (s. Abbildungen 3.24 und 3.25). Die Tendenz der Verteilung lässt sich erst in Ebene B erkennen. In Ebene A liegt jeweils 1 GMK in einem Kompartiment (s. Abbildung 3.26). Das Verteilungsmuster der GMK muss aufgrund der geringen Anzahl der GMK eingeschränkt beurteilt werden, da bereits wenige Propriozeptoren in einem Kompartiment einen scheinbaren Fokus bilden.

Die GMK dorsal des *AbDM* sowie in den LuK haben bei einer ähnlichen Morphologie und Lage wie die der VPK vergleichbare funktionelle Eigenschaften.

Funktionelle Unterschiede gegenüber den VPK liegen darin, dass sie keine vasomotorische Funktion haben und den messbaren Frequenzbereich um niederfrequente Vibrationen erweitern. Desweiteren registrieren insbesondere die an den Bandstrukturen gelegenen GMK die Bewegungsgrenze der Gelenke und schützen die Gelenke vor unphysiologischen Bewegungen.

4.2.4 Muskelspindeln

MS messen die Geschwindigkeit der Kontraktionsveränderung, die Muskeldehnung sowie den Tonus der Muskulatur bzw. deren Spannung. Zudem messen sie eine plötzliche Bewegung des Muskels [51]. Verkürzt sich der Muskel, so entspannen MS [54, 83, 84]. Bei wahrgenommenen Veränderungen können MS den Muskeltonus erhöhen [44].

MS lassen sich distal der MCP-Gelenke häufiger finden als proximal. Zumindest an Spitzmausbeutelratten stellten Maass *et al.* fest, dass MS distal des Schultergelenkes in höherer Anzahl als proximal vorkommen [52], sodass sich eine Übereinstimmung finden lässt. Diese muss aufgrund der Studie an Tieren aber eingeschränkt beurteilt werden.

Dabei befinden sich die MS besonders in den palmar des *LMTP* verlaufenden *Mm. lumbricales* (s. Abbildung 3.29).

In den *Mm. interossei* liegen deutlich weniger MS als in den *Mm. lumbricales*, wobei sich die Verteilung der MS besonders auf die *Mm. interossei II-IV* bezieht, in dem *M. interosseus I* lassen sich nahezu keine MS finden. In dem *AbDM* liegen nur in Ebene A 6 MS (s. Abbildungen 3.27, 3.28 und 3.29).

Wang *et al.* weisen den *Mm. lumbricales* eine nur schwache motorische Funktion zu, die bei 10% der Kraft der *Mm. interossei* liegt. Für sie liegt die Bedeutung der *Mm. lumbricales* vielmehr in einer sensorischen Funktion mit propriozeptiver Rückmeldung beider Interphalangealgelenke während der *Extension* sowie während des „*Precision-Pinch*“¹¹ [83]. Grundlage für die sensorische Funktion liegt neben der konstanten Anatomie der *Mm. lumbricales I+II*, und demzufolge die wichtigere Funktion als die der *Mm. lumbricales III+IV*, in der hohen Anzahl an MS, die besonders in den *Mm. lumbricales I+II* liegen [83]. Die Ergebnisse dieser Dissertation widersprechen dem Vorkommen der meisten MS in den *Mm. lumbricales*, da im *M. lumbricalis I* die wenigsten MS liegen.

Insgesamt jedoch lassen sich die meisten MS in den *Mm. lumbricales* finden, sodass diese Ergebnisse die Vermutung von Wang *et al.* stärken, dass die *Mm. lumbricales* für feinmotorische Bewegungen der Finger zuständig sind.

Das *LMTP* fixiert im ulnaren Handbereich die Metakarpalköpfe weniger straff, sodass in diesem Bereich eine höhere Beweglichkeit möglich ist [1, 23]. Diese wird dadurch erhöht, dass zumeist die Hypothenarmuskulatur und dabei besonders der *AbDM* einen Ansatz im *LMTP* findet [1, 23]. Die erhöhte Mobilität im distalen, ulnaren Handbereich ist wichtig für der Bewegung der Hand (z.B. beim Faustschluss), sodass auch diese Bewegung über die MS im *AbDM* feingesteuert wird.

Allerdings lassen sich nur in Ebene A 6 MS im *AbDM* finden, sodass eine eigene Untersuchung des *AbDM* nach vermehrten MS weiter proximal interessant wäre. Dennoch lässt sich festhalten, dass der *AbDM* MS für feinmotorische Bewegungen des 5. Fingers sowie für eine genaue Steuerung des ulnaren Bereiches des *LMTP* enthält.

Weiterhin lässt sich die Funktion der MS bei der *Hyperextension* eines Fingers bzw. Dehnung der *Mm. lumbricales* interpretieren.

MS messen Dehnungen sowie plötzliche Bewegungen und können somit eine (schnelle) *Hyperextension* ermitteln. Daraufhin lassen sich Muskelaktivitäten hervorrufen, um der *Hyperextension* durch *Flexion* bzw. erhöhten Muskeltonus in der Muskulatur entgegen-

¹¹Der „*Precision-Pinch*“, als Begriff von Mary Marzke eingeführt, beschreibt das feine Halten von Gegenständen zwischen dem Daumen und mindestens einem weiteren Finger, meist dem zweiten oder dritten Finger [83].

zuwirken und somit die MCP-Gelenke zu stabilisieren und die MCP-Region zu schützen. Nach Wang *et al.* haben die *Mm. lumbricales* jedoch nur eine geringe motorische Kraft [83], sodass diese Muskeln einer *Extension* nur wenig entgegen wirken können.

Da die Kraft einer *Hyperextension* auch auf die *Mm. interossei* übertragen wird [24], und diese zu einer deutlich stärkeren *Flexion* in den MCP-Gelenken fähig sind als die *Mm. lumbricales* [83], liegt hier die motorisch wichtige, reflektorische Gegenregulation bei einer *Hyperextension*.

Die *Mm. lumbricales* dienen hingegen durch ihre palmare Lage bei *Hyperextension* mehr zur Wahrnehmung, um eine *Hyperextension* bereits frühzeitig zu ermitteln.

Außerdem zeigt die Auswertung, dass MS in den *Mm. lumbricales* im Unterschied zu den *Mm. interossei* abhängig von der Lage zum *LMTP* unterschiedlich verteilt sind und sich palmar der proximalen Ausläufer des *LMTP* (Ebene A) signifikant mehr MS finden lassen. Der Unterschied könnte in einer sich ändernden Querschnittsfläche der Muskulatur liegen. Diese ließe sich durch eine alleinige Entnahme der *Mm. lumbricales* und einer Reihenuntersuchung der histologischen Querschnitte dieser Muskeln ermitteln, in dem jeweils die Fläche der Muskeln im Querschnitt berechnet wird und diese Querschnittsflächen von proximal nach distal verglichen werden. Zusammen mit der Muskellänge zwischen den Ebenen ließe sich zudem das Muskelvolumen der verschiedenen *Mm. lumbricales*, und somit die Anzahl an MS in Abhängigkeit zum Volumen, vergleichen. Dabei sollten insbesondere Schrumpfungsfaktoren vermieden werden. Somit lässt sich in dieser Dissertation nur der Unterschied in der Anzahl der MS zwischen Ebene A und B feststellen und erst in folgenden Arbeiten ließe sich dieser Unterschied untersuchen.

Zusammengefasst lassen sich den Muskeln der MCP-Region durch ihre hohe Anzahl an MS 2 wesentliche Funktionen zuweisen: Zum einen lassen sich feinmotorische Bewegungen durchführen und zum anderen wird eine *Extension* durch Dehnung der MS wahrgenommen und bei fortschreitender *Hyperextension* dieser entgegengewirkt.

4.3 *Schlussfolgerung*

Diese vorliegende Dissertationsschrift hatte das Ziel, die Propriozeptoren RuK, VPK, GMK und MS der MCP-Region 2.-5. in topografischen Kartierungen darzustellen und diese in das dortige funktionelle System einzuordnen.

Insgesamt stellt sich die Realisierbarkeit der Kartierungsstrategie heraus. Die Anzahl von 12 Körperspendern stellt sich als sinnvoll gewählt heraus. Lediglich die Summe der GMK ließe sich durch mehr Körperspender erhöhen und somit deren Verteilungsmuster deutlicher herausarbeiten.

Mit Hilfe der Kartierungen und den bereits bekannten Eigenschaften der Propriozeptoren konnten deren Funktionen innerhalb der MCP-Region 2.-5. interpretiert werden und für das *LMTP* zeigt sich zusammenfassend eine nicht nur passive, sondern aktive sensorische Funktion.

Bei den Interpretationen handelt es sich nicht um Beweise, sondern um Schlussfolgerungen. Diese müssen durch weitere, klinische Studien mit Probanden überprüft werden. Ebenso sollten Nachfolgestudien die Verteilung der MS in den *Mm. interossei* mit den Ergebnissen dieser Studie vergleichen und dabei ein jüngeres Durchschnittsalter gewählt werden.

Es lässt sich empfehlen, auch an weiteren Körperstellen topografische Kartierungen zu erstellen, um als großes Ziel einen Atlas von humanen Propriozeptoren zu erstellen. Anfangs sollten bevorzugt Gelenkregionen gewählt werden: Diese zeichnen sich durch eine komplexe Anatomie auf engen Raum, ihre Relevanz in der Feinmotorik, dem vermehrten Auftreten von Propriozeptoren zur Registrierung der Gelenkstellung bzw. der Bewegungen und der daraus folgenden klinischen Bedeutung aus. Es lässt sich zunächst die Erfassung der Propriozeption des 1. MCP-Gelenkes vorschlagen, um diese mit der Propriozeption der MCP-Region 2.-5. funktionell vergleichen und verknüpfen zu können.

Die Kartierungen der Verteilungsmuster der Propriozeptoren helfen, die propriozeptiven Eigenschaften der Gewebe innerhalb einer Region nachzuvollziehen und können darüber hinaus dazu dienen, iatrogene Verletzungen der Propriozeptoren während Operationen zu vermeiden und Therapieplanungen zu erstellen.

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
AbDM	M. abductor digiti minimi
EvG-Färbung	Elastika-van-Gieson-Färbung
FDM	M. flexor digiti minimi
FDP	M. flexor digitorum profundus
FDS	M. flexor digitorum superficialis
GMK	Golgi-Mazzoni-Körperchen
HE-Färbung	Hämalaun-Eosin-Färbung
HtK	Hypothenar-Kompartiment
IDR	Interdigital rechts
IDL	Interdigital links
IntK	Interosseus-Kompartiment
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
LMTP	Ligamentum metacarpale transversum profundum
LuK	Lumbricalis-Kompartiment
M.	Musculus
MCP-Region	Metakarpophalangealregion
MCP-Gelenke	Articulationes metacarpophalangeales
Mm.	Musculi
MS	Muskelspindeln
Nn.	Nervi
ODM	M. opponens digiti minimi

KAPITEL 4. DISKUSSION

RuK	Ruffini-Körperchen
RA	rapid-adapting
SA	slow-adapting
VPK	Vater-Pacini-Körperchen

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der Metakarpophalangealregion im Querschnitt auf Höhe der Metakarpalköpfe, Ansicht von proximal.	2
1.2	Fotomontage der Metakarpophalangealregion zwischen dem 2. und 3. Metakarpalkopf, linke Hand, Ansicht von proximal.	3
1.3	Darstellung der <i>Fasciculi metacarpales longitudinales profundi</i> : Diese weisen eine Verbindung zum <i>Lig. metacarpale transversum profundum</i> sowie zu den Faszien der <i>Mm. interossei</i> auf und verteilen die auf das <i>Lig. metacarpale transversum profundum</i> einwirkende Kräfte.	6
1.4	Kapselbandapparat der Metakarpophalangealgelenke: Die Gelenkkapsel wird aus den <i>Ligg. collaterale, collaterale accessorium et phalangoglenoidale</i> gebildet.	7
1.5	Darstellung der palmaren Platte mit einer am Metakarpalkopf schwachen und einer am <i>Phalanx proximalis</i> festen Anheftung.	8
1.6	Darstellung der Palmaraponeurose und den nach distal weiter verlaufenden <i>Fasciculi longitudinales</i> : Diese weisen eine Verbindung zu den <i>Fasciculi transversi</i> und somit indirekt zum <i>Lig. metacarpale transversum profundum</i> auf.	9
1.7	Schematische Darstellung der in der Metakarpophalangealregion verlaufenden Muskulatur: Die <i>Mm. lumbricales</i> verlaufen palmar, die <i>Mm. interossei</i> dorsal des <i>Lig. metacarpale transversum profundum</i>	11
1.8	Querschnitt auf Höhe eines Metakarpalkopfes mit Darstellung der umliegenden Muskulatur sowie des Kapselbandapparates.	11
1.9	Schematische Darstellung der gemeinsamen Merkmale eines kapsulären Propriozeptors: Im <i>subkapsulären</i> Raum liegen Kollagenfasern, <i>Fibroblasten</i> und <i>Makrophagen</i> , beim Eintreten durch die Kapsel (Perineuralzellen) verliert der Nerv seine Myelinschicht.	19
1.10	Darstellung eines Ruffini-Körperchens: Das Axon tritt in der Längsseite des Propriozeptors ein und zweigt sich auf.	20
1.11	Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchens: Zentral verläuft ein afferentes Axon, welches die Myelinschicht beim Eintritt in den Propriozeptor verliert.	22
1.12	Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchens im Querschnitt: Subkapsulär lassen sich Blutgefäße finden.	22
1.13	Darstellung der verschiedenen Morphologien des Golgi-Mazzoni-Körperchen.	24
1.14	Darstellung eines Golgi-Mazzoni-Körperchens mit 2 Kolben im Querschnitt: Es zeigen sich mindestens 2 eintretende Axone bzw. 2 Innenkolben, Blutgefäße lassen sich nicht finden.	24

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.15	Darstellung einer Muskelspindel: Die <i>intrafusale</i> Muskulatur ist von einer dünnen Kapsel umgeben. Zwischen dieser und der äußeren, dickeren Kapsel liegen Gefäße und Nerven. Parallel zu den Muskelspindeln verläuft die <i>extrafusale</i> Muskulatur.	25
2.1	Präparierte Metakarpophalangealregion 2.-5., ♀, 89jährig, linke Hand.	30
2.2	Makroskopische Einteilung des entnommenen Gewebes der Metakarpophalangealregion 2.-5., ♀, 89jährig, linke Hand: Der Schnitt erfolgte von proximal nach distal durch die palmare Platte (schwarzer Pfeil).	31
3.1	Vergleich der Muskelspindeln in HE-Färbung und EvG-Färbung, 40x.	37
3.2	Muskelspindeln der Körperspende X (♀, 94jährig, rechte Hand): Auf Grund der geringen Anzahl an Muskelspindeln ist kein Verteilungsmuster erkennbar.	38
3.3	Muskelspindeln der Körperspende Y (♂, 83jährig, rechte Hand): Auf Grund der geringen Anzahl an Muskelspindeln ist kein Verteilungsmuster erkennbar.	38
3.4	Alle summierten Muskelspindeln der Ebene A, rechte Hand: Es zeigt sich ein Verteilungsmuster und eine Schwerpunktsetzung in den <i>Mm. lumbricales</i>	38
3.5	Absolute Häufigkeit der Propriozeptoren (868 Anschnitte): 547 Muskelspindeln, 280 Ruffini-Körperchen, 29 Vater-Pacini-Körperchen und 12 Golgi-Mazzoni-Körperchen.	40
3.6	Ruffini-Körperchen in HE-Färbung an der Sehne des <i>M. flexor digitorum profundus</i> , Ebene A, 40x.	41
3.7	Absolute Häufigkeit der Ruffini-Körperchen in den Kompartimenten: Der Schwerpunkt der Verteilung liegt an den <i>Ligg. collateralia</i> (93 Ruffini-Körperchen), Beugesehnen (60 Ruffini-Körperchen) und in den Interosseus-Kompartimenten (48 Ruffini-Körperchen).	42
3.8	Absolute Häufigkeit der Ruffini-Körperchen entlang der <i>Ligg. collateralia</i> mit Schwerpunktsetzung im radialen und ulnaren Bereich.	42
3.9	Vater-Pacini-Körperchen in HE-Färbung palmar im Lumbricalis-Kompartiment und in der Nähe zur <i>A. digitalis palmaris</i> , Ebene A, 40x.	43
3.10	Absolute Häufigkeit der Vater-Pacini-Körperchen in den Kompartimenten mit einem Schwerpunkt der Verteilung in den Lumbricalis-Kompartimenten (15 Vater-Pacini-Körperchen).	44
3.11	Golgi-Mazzoni-Körperchen in HE-Färbung in der Nähe zur Sehne des <i>M. flexor digitorum profundus</i> , Ebene A, 40x.	45
3.12	Absolute Häufigkeit der Golgi-Mazzoni-Körperchen in den Kompartimenten mit Schwerpunkt der Verteilung in den Lumbricalis-Kompartimenten (4 Golgi-Mazzoni-Körperchen).	45
3.13	Muskelspindel in HE-Färbung im <i>M. lumbricalis II</i> , Ebene A, 40x.	47
3.14	Absolute Häufigkeit der Muskelspindeln in den Kompartimenten: 423 Muskelspindeln in den <i>Mm. lumbricales</i> , 118 Muskelspindeln in den <i>Mm. interossei</i> und 6 Muskelspindeln in dem <i>M. abductor digiti minimi</i>	47
3.15	Absolute Häufigkeit der Muskelspindeln in den <i>Mm. lumbricales</i> : In den <i>Mm. lumbricales II et III</i> lassen sich etwa gleich viele (129 bzw. 130 Muskelspindeln), im <i>Mm. lumbricales I</i> die wenigsten Muskelspindeln (64) finden.	48
3.16	Absolute Anzahl der Propriozeptoren mit Vergleich von Ebene A und B: Große Unterschiede in der Anzahl der Propriozeptoren lassen sich für die Ruffini-Körperchen (89 bzw. 191) und Muskelspindeln (334 bzw. 213) finden.	49

3.17	Kartierung der Ruffini-Körperchen der Ebene A mit Verteilungsmuster insbesondere an den Beugesehnen sowie an der radialen bzw. ulnaren Außenseite des 2. und 5. Metakarpalknochens.	51
3.18	Kartierung der Ruffini-Körperchen der Ebene B mit Verteilungsmuster insbesondere entlang der <i>Ligg. collateralia</i> sowie im Hypothenar-Kompartiment und zwischen dem <i>Mm. lumbricalis 1 et interosseus 1</i>	51
3.19	Absolute Anzahl der Ruffini-Körperchen in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B: Der Schwerpunkt der Verteilung liegt an den <i>Ligg. collateralia</i> , den Beugesehnen sowie den Interosseus-Kompartimenten.	52
3.20	Absolute Häufigkeit der Ruffini-Körperchen entlang der <i>Ligg. collateralia</i> mit Vergleich von Ebene A und B: In Ebene A zeigt sich ein Schwerpunkt in „2. radial“ und „5. ulnar“, für Ebene B ergibt sich eine gleichmäßigere Verteilung.	52
3.21	Kartierung der Vater-Pacini-Körperchen der Ebene A mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten.	53
3.22	Kartierung der Vater-Pacini-Körperchen der Ebene B, ebenfalls mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten.	54
3.23	Absolute Anzahl der Vater-Pacini-Körperchen in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B: Insbesondere in den Lumbricalis-Kompartimenten liegen vermehrt Vater-Pacini-Körperchen, doch auch an den Beugesehnen sowie im Hypothenar-Kompartiment.	54
3.24	Kartierung der Golgi-Mazzoni-Körperchen der Ebene A ohne eindeutig erkennbarem Verteilungsmuster.	55
3.25	Kartierung der Golgi-Mazzoni-Körperchen der Ebene B mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten sowie dorsal des <i>M. abductor digiti minimi</i>	56
3.26	Absolute Anzahl der Golgi-Mazzoni-Körperchen in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B: Es zeigt sich eine Verteilung über mehrere Kompartimente mit Schwerpunktsetzung in den Lumbricalis-Kompartimenten.	56
3.27	Kartierung der Muskelspindeln der Ebene A mit deutlich mehr Muskelspindeln in den <i>Mm. lumbricales</i> als in den <i>Mm. interossei</i> . Im <i>M. abductor digiti minimi</i> befinden sich 6 Muskelspindeln.	58
3.28	Kartierung der Muskelspindeln der Ebene B mit einem ähnlichen Verteilungsmuster wie in Ebene A (insgesamt weniger Muskelspindeln, s. Abbildung 3.27). Im <i>M. abductor digiti minimi</i> befinden sich keine Muskelspindeln.	58
3.29	Absolute Anzahl der Muskelspindeln in den Kompartimenten mit Vergleich von Ebene A und B: In Ebene B lassen sich jeweils weniger Muskelspindeln als in Ebene A finden.	59
3.30	Absolute Anzahl der Muskelspindeln in den <i>Mm. lumbricales</i> mit Vergleich von Ebene A und B: Im <i>M. lumbricalis I</i> lassen sich die wenigsten Muskelspindeln finden.	59
3.31	Zusammenfassende Kartierung aller Propriozeptoren der Ebene A.	60
3.32	Zusammenfassende Kartierung aller Propriozeptoren der Ebene B.	61

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Literaturverzeichnis

- [1] AL-QATTAN, M. M. ; ROBERTSON, G. A.: An anatomical study of the deep transverse metacarpal ligament. In: *J Anat* 182 (Pt 3) (1993), S. 443–446
- [2] AMMER, K. : Epidemiologie und Risikofaktoren der Arthrose von Extremitätengelenken. In: *Österr. Z. Phys. Med .Rehabil* 15 (2005), Nr. 2, S. 41–59
- [3] BARBOLINI, G. ; TISCHENDORF, F. ; CURRI, S. B.: Histology, histochemistry, and function of the human digital arteriovenous anastomoses (Hoyer-Grosser's organs, Masson's glomera). In: *Microvasc Res* 3 (1971), Nr. 2, S. 142–153, 323–336
- [4] BARRETT, D. S.: Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction. In: *J Bone Joint Surg Br* 73 (1991), Nr. 5, S. 833–837
- [5] BENTIVOGLIO, M. ; PACINI, P. : Filippo Pacini: a determined observer. In: *Brain Res Bull* 38 (1995), Nr. 2, S. 161–5
- [6] BIEMESDERFER, D. ; MUNGER, B. L. ; BINCK, J. ; DUBNER, R. : The pilo-Ruffini complex: a non-sinus hair and associated slowly-adapting mechanoreceptor in primate facial skin. In: *Brain Res* 142 (1978), Nr. 2, S. 197–222
- [7] BILDERBACK, K. K. ; RAYAN, G. M.: The Septa of Legueu and Juvara: An Anatomic Study. In: *J Hand Surg Am* 29 (2004), Nr. 3, S. 494–9
- [8] BLUM, J. ; RUDIGIER, J. : Die operative Behandlung der Tendovaginitis stenosans. In: *Deutsches Ärzteblatt* 87 (1990), Nr. 49
- [9] BOUSSAKRI, H. ; ELIDRISSI, M. ; AZARKANE, M. ; BENZAAD, S. ; BACHIRI, M. ; SHIMI, M. ; ELIBRAHIMI, A. ; ELMRINI, A. : Fractures of the neck of the fifth metacarpal bone, treated by percutaneous intramedullary nailing: surgical technique, radiological and clinical results study (28 cases). In: *Pan Afr Med J* 18 (2014), S. 187
- [10] BRAND, R. A.: A neurosensory hypothesis of ligament function. In: *Med Hypotheses* 29 (1989), Nr. 4, S. 245–250
- [11] CERVERO, F. ; BENNETT, G. J. ; HEADLEY, P. M.: *Processing of Sensory Information in the Superficial Dorsal Horn of the Spinal Cord*. Bd. 176. New York : Springer, 1989. – ISBN 978–1461281016
- [12] CHOCHKOV, C. : *Cutaneous Receptors*. Berlin Heidelberg : Springer, 1978 (Advances in Anatomy, Embryology and Cell Biology). – ISBN 978–3–540–08826–4
- [13] CHOCHKOV, C. N.: The fine structure of small encapsulated receptors in human digital glabrous skin. In: *J Anat* 114 (1973), Nr. Pt 1, S. 25–33

LITERATURVERZEICHNIS

- [14] CHUNG, K. C. ; BURNS, P. B. ; KIM, H. M. ; BURKE, F. D. ; WILGIS, E. F. ; FOX, D. A.: Long-term followup for rheumatoid arthritis patients in a multicenter outcomes study of silicone metacarpophalangeal joint arthroplasty. In: *Arthritis Care Res (Hoboken)* 64 (2012), Nr. 9, S. 1292–300
- [15] DE AVILA, G. A. ; O'CONNOR, B. L. ; VISCO, D. M. ; SISK, T. D.: The mechanoreceptor innervation of the human fibular collateral ligament. In: *J Anat* 162 (1989), S. 1–7
- [16] DHILLON, M. S. ; BALI, K. ; PRABHAKAR, S. : Differences among mechanoreceptors in healthy and injured anterior cruciate ligaments and their clinical importance. In: *Muscles, Ligaments and Tendons* (2012), Nr. 2, S. 38–43
- [17] DRENCKHAHN, D. : *Herz-Kreislauf-System, Lymphatisches System, Endokrine Drüsen, Nervensystem, Sinnesorgane, Haut*. Bd. 2: *Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie*. 16. München : Urban und Fischer in Elsevier, 2004. – 888 S. – ISBN 9783437423512
- [18] DRENCKHAHN, D. : *Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Bd. 1: *Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie*. 17. München : Urban und Fischer in Elsevier, 2008. – 968 S. – ISBN 978-3-437-42342-0
- [19] FREEMAN, M. A. ; WYKE, B. : The innervation of the knee joint. An anatomical and histological study in the cat. In: *J Anat* 101 (1967), Nr. Pt 3, S. 505–532
- [20] GAO, F. ; ZHOU, J. ; HE, C. ; DING, J. ; LOU, Z. ; XIE, Q. ; LI, H. ; LI, F. ; LI, G. : A Morphologic and Quantitative Study of Mechanoreceptors in the Remnant Stump of the Human Anterior Cruciate Ligament. In: *Arthroscopy* 32 (2016), Nr. 2, S. 273–80
- [21] GAROLI, A. : Vibration und Gewebewiederherstellung. In: *Osteopathische Medizin* 15 (2014), Nr. 2, S. 12–16
- [22] GOHLKE, F. ; JANSSEN, E. ; LEIDEL, J. ; HEPPELMANN, B. ; EULERT, J. : Histomorphological findings on proprioception in the shoulder. In: *Der Orthopäde* 27 (1998), Nr. 8, S. 510–517
- [23] GOSAVI, S. N. ; JADHAV, S. D. ; ZAMBRE, B. R. ; VATSALA SWAMY, P. : Deep transverse metacarpal ligament: a cadaveric study. In: *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences* 2 (2012), Nr. 6, S. 1–3
- [24] GRATZER, J. ; VOKT, C. A. ; BRENNER, P. : Morphological and functional interface between palmar plates of metacarpophalangeal joints and intrinsic muscles of the hand. In: *Handchir Mikrochir Plast Chir* 33 (2001), Nr. 5, S. 299–309
- [25] GRAY, R. G. ; GOTTLIEB, N. L.: Hand flexor tenosynovitis in rheumatoid arthritis. Prevalence, distribution, and associated rheumatic features. In: *Arthritis Rheum* 20 (1977), Nr. 4, S. 1003–8
- [26] GUPTE, C. M. ; SHAERF, D. A. ; SANDISON, A. ; BULL, A. M. ; AMIS, A. A.: Neural Structures within Human Meniscofemoral Ligaments. In: *ISRN Anat* 2014 (2014), S. 1–6

- [27] HAGERT, E. : Proprioception of the wrist joint. A review of current concepts and possible implications on the rehabilitation of the wrist. In: *J Hand Ther* 23 (2010), Nr. 1, S. 2–16
- [28] HAGERT, E. ; FORSGREN, S. ; LJUNG, B.-O. : Differences in the presence of mechanoreceptors and nerve structures between wrist ligaments may imply differential roles in wrist stabilization. In: *J Orthop Res* 23 (2005), Nr. 4, S. 757–763
- [29] HAGERT, E. ; LLUCH, A. ; REIN, S. : The role of proprioception and neuromuscular stability in carpal instabilities. In: *J Hand Surg Eur Vol* (2015), S. 1–8
- [30] HALATA, Z. : The ultrastructure of the sensory nerve endings in the articular capsule of the knee joint of the domestic cat (Ruffini corpuscles and Pacinian corpuscles). In: *J Anat* 124 (1977), Nr. Pt 3, S. 717–729
- [31] HALATA, Z. ; WAGNER, C. ; BAUMANN, K. I.: Sensory nerve endings in the anterior cruciate ligament (Lig. cruciatum anterius) of sheep. In: *The Anatomical Record* 254 (1999), Nr. 1, S. 13–21
- [32] HALATA, Z. ; RETTIG, T. ; SCHULZE, W. : The ultrastructure of sensory nerve endings in the human knee joint capsule. In: *Anatomy and Embryology* 172 (1985), Nr. 3, S. 265–275
- [33] HARLEY, O. J. H. ; BRAIN, C. J. ; FLEMING, A. N.: A technique to reconstruct the deep transverse metacarpal ligament. In: *J Hand Surg Eur Vol* 37 (2012), Nr. 9, S. 890–891
- [34] HARRIS, P. ; NAGY, S. ; VARDAXIS, N. : *Mosby's Dictionary of Medicine, Nursing and Health Professions*. Bd. 3. Sydney : Elsevier, 2014. – ISBN 9780729541381
- [35] HAUS, J. ; HALATA, Z. ; REFIOR, H. J.: Proprioception in the anterior cruciate ligament of the human knee joint morphological bases. A light, scanning and transmission electron microscopy study. In: *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 130 (1992), Nr. 6, S. 484–494
- [36] HIRT, B. ; SEYHAN, H. ; WAGNER, M. ; ZUMHASCH, R. : *Anatomie und Biomechanik der Hand*. Bd. 3. Stuttgart u.a. : Thieme, 2015. – 126 S. – ISBN 978-3-13-166513-3
- [37] HOGERVORST, T. ; BRAND, R. A.: Mechanoreceptors in joint function. In: *J Bone Joint Surg Am* 80 (1998), Nr. 9, S. 1365–1378
- [38] HOUDEK, M. ; WAGNER, E. ; RIZZO, M. ; MORAN, S. : Metacarpophalangeal Joint Arthroplasty in the Setting of Trauma. In: *Hand Surgery* 40 (2015), Nr. 12, S. 2416–20
- [39] HUNDOZI, H. ; MURTEZANI, A. ; HYSENAI, V. ; MUSTAFA, A. : Rehabilitation after surgery repair of flexor tendon injuries of the hand with Kleinert early passive mobilization protocol. In: *Med Arch* 67 (2013), Nr. 2, S. 115–9
- [40] IBA, K. ; WADA, T. ; HIRAIWA, T. ; KANAYA, K. ; OKI, G. ; YAMASHITA, T. : Reconstruction of chronic thumb metacarpophalangeal joint radial collateral ligament injuries. In: *Hand Surgery* 38 (2013), Nr. 10, S. 1945–50
- [41] IGGO, A. : Cutaneous and subcutaneous sense organs. In: *Br Med Bull* 33 (1977), Nr. 2, S. 97–102

LITERATURVERZEICHNIS

- [42] IGGO, A. ; ANDRES, K. H.: Morphology of cutaneous receptors. In: *Annu Rev Neurosci* 5 (1982), S. 1–31
- [43] JANSSEN, J. ; LAATZ, W. : *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows*. Bd. 6. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2007. – 818 S. – ISBN 978-3-540-72977-8
- [44] JOHANSSON, H. : Role of knee ligaments in proprioception and regulation of muscle stiffness. In: *J Electromyogr Kinesiol* 1 (1991), Nr. 3, S. 158–179
- [45] JOSTY, I. C. ; LAING, J. H. ; DENT, C. : Reconstruction of disruptions of the deep transverse metacarpal ligament of the ring finger using the A1 pulleys. In: *J Hand Surg Br* 31 (2006), Nr. 4, S. 439–440
- [46] KARONITSCH, T. : Polyarthrose der Fingergelenke. In: *rheuma plus* (2009), Nr. 4
- [47] KOCH, A. ; VAANDRAGER, J. : Good results with the surgical treatment of trigger finger. In: *Ned Tijdschr Geneesk* (1991), Nr. 135(25), S. 1124–7
- [48] In: LAUTENBACHER, S. ; GÜNTÜRKÜN, O. ; HAUSMANN, M. : *Kognitive Geschlechtsunterschiede*. Bd. 1. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-71627-3, S. 358
- [49] LEE, J. ; LADD, A. ; HAGERT, E. : Immunofluorescent triplestaining technique to identify sensory nerve endings in human thumb ligaments. In: *Cells Tissues Organs* 195 (2012), Nr. 5, S. 456–464
- [50] LEE, K. S. ; BAEK, J. R. ; KIM, S. B.: The neglected rupture of deep transverse metacarpal ligament. In: *Hand Surg* 8 (2003), Nr. 2, S. 277–81
- [51] LEPHART, S. M. ; HALATA, Z. ; BAUMANN, K. L. ; COSTANTINI, A. ; GIACOMO, G. di ; ELLENBECKER, T. S.: *Atlas of Functional Shoulder Anatomy*. Milan : Springer, 2008 (Neuromuscular Control and Proprioception of the Shoulder). – ISBN 978-88-470-0758-1
- [52] MAASS, S. ; BAUMANN, K. I. ; HALATA, Z. : Topography of corpuscular mechanoreceptors in the shoulder joint region of *monodelphis domestica*. In: *Anat Rec* 263 (2001), Nr. 1, S. 35–40
- [53] MAGEE, D. J. ; ZACHAZEWSKI, J. E. ; QUILLEN, W. S.: *Scientific Foundations and Principles of Practice in Musculoskeletal Rehabilitation*. Missouri : Elsevier, 2007. – 720 S. – ISBN 978-1416002505
- [54] MEINERS, M. ; BERG, T. : Wahrnehmungsorientiertes Bewegen. In: *intensiv* 9 (2001), Nr. 5, S. 198–202
- [55] In: MERLE, M. : *Morbus Dupuytren*. Bd. 460. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 2009. – ISBN 9783131481511, S. 247–278
- [56] In: MERLE, M. ; REHART, S. : *Deformationen der Finger bei rheumatoider Arthritis*. Bd. 460. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 2009. – ISBN 9783131481511, S. 173–215
- [57] MICHELSON, J. D. ; HUTCHINS, C. : Mechanoreceptors in human ankle ligaments. In: *J Bone Joint Surg Br* 77 (1995), Nr. 2, S. 219–24

- [58] MOBARGHA, N. ; LUDWIG, C. ; LADD, A. L. ; HAGERT, E. : Ultrastructure and innervation of thumb carpometacarpal ligaments in surgical patients with osteoarthritis. In: *Clin Orthop Relat Res* 472 (2014), Nr. 4, S. 1146–1154
- [59] NIETHARD, F. U. ; PFEIL, J. ; BIBERTHALER, P. : *Duale Reihe. Bd. 7: Orthopädie und Unfallchirurgie*. Stuttgart : Georg Thieme, 2014. – 672 S. – ISBN 978-3-13-130817-7
- [60] PEIKERT, K. ; KASPER, M. ; MAY, C. A. : Distribution of caveolin in the muscle spindles of human skeletal muscle. In: *J Anat* 224 (2014), Nr. 6, S. 681–7
- [61] PSCHYREMBEL, W. : *Pschyrembel: Klinisches Wörterbuch*. 2012
- [62] RADOVANOVIC, D. ; PEIKERT, K. ; LINDSTROM, M. ; DOMELLOF, F. P. : Sympathetic innervation of human muscle spindles. In: *J Anat* 226 (2015), Nr. 6, S. 542–8
- [63] RALSTON, R. H. J. H. J. ; MILLER, M. R. ; KASAHARA, M. : Nerve endings in Human Fasciae, Tendons, Ligaments, Periosteum, and Joint Synovial Membrane. In: *Anat Rec* 136 (1960), S. 137–47
- [64] RASKOLNIKOV, D. ; WHITE, N. ; SWART, E. ; ZOUZIAS, I. ; ROSENWASSER, M. : Volar plate capsulodesis for metacarpophalangeal hyperextension with basal joint arthritis. In: *Am J Orthop* 43 (2014), Nr. 8, S. 354–8
- [65] RAUNEST, J. ; SAGER, M. ; BURGENER, E. : Proprioception of the cruciate ligaments. Receptor mapping in an animal model. In: *Arch Orthop Trauma Surg* 118 (1998), Nr. 3, S. 159–163
- [66] RAYAN, G. M. : Dupuytren disease: Anatomy, pathology, presentation, and treatment. In: *J Bone Joint Surg Am* 89 (2007), Nr. 1, S. 189–198
- [67] REIN, S. ; HAGERT, E. ; HANISCH, U. ; LWOWSKI, S. ; FIEGUTH, A. ; ZWIPP, H. : Immunohistochemical analysis of sensory nerve endings in ankle ligaments. A cadaver study. In: *Cells Tissues Organs* 197 (2013), Nr. 1, S. 64–76
- [68] ROBERTS, D. ; AGEBERG, E. ; ANDERSSON, G. ; FRIDEN, T. : Clinical measurements of proprioception, muscle strength and laxity in relation to function in the ACL-injured knee. In: *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 15 (2007), Nr. 1, S. 9–16
- [69] ROIJEZON, U. ; CLARK, N. C. ; TRELEAVEN, J. : Proprioception in musculoskeletal rehabilitation. In: *Man Ther* 20 (2015), Nr. 3, S. 368–377
- [70] SCHIERZ, A. ; PEREZ, D. : Isolierte Metacarpale V Luxation nach ulnar. In: *Unfallchirurg* 109 (2006), Nr. 10, S. 901–904
- [71] SCHMIDT, H.-M. ; LANZ, U. : *Chirurgische Anatomie der Hand. 2*. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 2003. – 164–172 S. – ISBN 3131306920
- [72] SCHMIDT, H.-M. ; LANZ, U. : *Chirurgische Anatomie der Hand. 2*. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 2003. – 130–134 S. – ISBN 3131306920
- [73] SOLOMONOW, M. : Ligamente als Entstehungsort berufsbedingter Störungen. In: *Osteopathische Medizin, Zeitschrift für ganzheitliche Heilverfahren* 10 (2009), Nr. 3, S. 4–13

LITERATURVERZEICHNIS

- [74] STATBA: *Diagnosedaten der Patienten und Patientinnen in Krankenhäusern*. Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden, 2015
- [75] STECCO, C. : *Functional atlas of the human fascial system*. 1. Edinburgh : Churchill Livingstone Elsevier, 2014. – 374 S. – ISBN 978-0-7020-4430-4
- [76] STRONG, A. J.: Muscle Spindles. In: *Res Medica* 4 (2013), Nr. 4
- [77] In: TAMISIERT, J.-N. ; REHART, S. : *Rheumatoider Arthritis*. Bd. 460. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 2009. – ISBN 9783131481511, S. 80–89
- [78] TOWFIGH, H. ; HIERNER, R. ; LANGER, M. ; FRIEDEL, R. : *Frakturen und Luxationen der Hand*. Bd. 1. Berlin-Heidelberg : Springer, 2011. – 29–159 S. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40469-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40469-6>. – ISBN 978-3-642-40468-9
- [79] TOWFIGH, H. ; HIERNER, R. ; LANGER, M. ; FRIEDEL, R. : *Tumore im Bereich der Hand*. Bd. 2: *Handchirurgie*. Berlin-Heidelberg : Springer, 2011. – 1738–1739 S. – ISBN 978-3642117572
- [80] TOWFIGH, H. ; HIERNER, R. ; LANGER, M. ; FRIEDEL, R. : *Arthrose und Arthritis*. Bd. 2: *Handchirurgie*. Berlin-Heidelberg : Springer, 2011. – 1413–1422 S. – ISBN 978-3642117572
- [81] VARGAS, A. ; CHIAPAS-GASCA, K. ; HERNANDEZ-DIAZ, C. ; CANOSO, J. J. ; SAAVEDRA, M. A. ; NAVARRO-ZARZA, J. E. ; VILLASENOR-OVIES, P. ; KALISH, R. A.: Clinical anatomy of the hand. In: *Reumatol Clin* 8 Suppl 2 (2012), S. 25–32
- [82] WALKER-BONE, K. ; PALMER, K. T. ; READING, I. ; COGGON, D. ; COOPER, C. : Prevalence and impact of musculoskeletal disorders of the upper limb in the general population. In: *Arthritis Rheum* 51 (2004), Nr. 4, S. 642–51
- [83] WANG, K. ; MCGLINN, E. P. ; CHUNG, K. C.: A biomechanical and evolutionary perspective on the function of the lumbrical muscle. In: *J Hand Surg Am* 39 (2014), Nr. 1, S. 149–155
- [84] WELSCH, U. ; DELLER, T. ; WELSCH (Hrsg.): *Histologie*. 3. München : Elsevier, 2010. – 523, 525, 527 S. – ISBN 978-3437444319
- [85] WELSCH, U. ; MULISCH, M. : *Romeis Mikroskopische Technik*. 18. Heidelberg : Springer Spektrum, 2010. – 198–223 S. – ISBN 978-3-8274-1676-6
- [86] WHEATLEY, M. J. ; LAYMAN, C. ; BURKE, J. B.: Closed rupture of the deep transverse metacarpal ligament: diagnosis and management. In: *J Hand Surg Am* 23 (1998), Nr. 3, S. 524–528
- [87] WU, X. ; SONG, W. ; ZHENG, C. ; ZHOU, S. ; BAI, S. : Morphological study of mechanoreceptors in collateral ligaments of the ankle joint. In: *J Orthop Surg Res* 10 (2015), S. 92
- [88] ZENKER, W. ; NEUHUBER, W. L.: *The primary afferent Neuron. A Survey of Recent Morpho-Functional Aspects*. Bd. 1. Springer, 1990. – 260 S. – ISBN 978-0-306-43480-8

- [89] ZIMNY, M. L. ; DEPAOLO, C. ; DABEZIES, E. : Mechanoreceptors in the flexor tendons of the hand. In: *The Journal of Hand Surgery* 14 (1989), Nr. 2, S. 229–231
- [90] ZIMNY, M. L. ; SCHUTTE, M. ; DABEZIES, E. : Mechanoreceptors in the human anterior cruciate ligament. In: *Anat Rec* 214 (1986), Nr. 2, S. 204–209

LITERATURVERZEICHNIS

Tabellenverzeichnis

1.1	Tabellarische Zusammenfassung des Ursprungs, Ansatzes, Funktion und Innervation der Muskulatur in der MCP-Region nach Drenckhahn [18]. Die <i>Mm. interossei palmares et dorsales</i> werden als eine Muskelgruppe zusammengefasst.	12
1.2	„ <i>Characteristics of articular nerve endings.</i> “ Klassifikation der Propriozeptoren nach Freeman und Wyke [19]. Typ 4 (freie Nervenendigungen) ist nicht mit aufgelistet.	18
1.3	Zusammenfassende Tabelle der Morphologie und Lokalisation der RuK, VPK, GMK und MS. Verwendete Referenzen: [3, 11–13, 19, 22, 27, 28, 30–32, 37, 41, 42, 44, 51, 53, 54, 58, 60, 62, 63, 67, 75, 76, 83, 84, 87, 88, 90] . .	26

TABELLENVERZEICHNIS

Danksagung

Folgenden Personen danke ich sehr herzlich für die Hilfestellung und Mitbetreuung meiner Dissertation:

Zunächst Herrn Prof. Dr. Timm J. Filler für die Überlassung der Arbeit! Ich danke ihm zudem für eine sehr gute Betreuung und die immer schnelle Beantwortung meiner Fragen.

Frau Dr. Birte Barbian für die Einarbeitung in die Thematik und insbesondere für die wöchentliche Unterstützung beim Verfassen der Dissertationsschrift!

Frau Christine Opfermann-Rüngeler sehr herzlich für die Erstellung der vielen schönen Grafiken und Abbildungen sowie für die Hilfe zur Gestaltung des Posters!

Herrn Robert Kubitza und Frau Andrea Paas für die Unterstützung bei den histologischen Tätigkeiten sowie für die vielen fröhlichen Gespräche zusammen mit Frau Cynthia Pinto Perez.

Dem Team der Präparatoren um Frau Sabine Wittschonke für die unkomplizierte Bereitstellung der anatomischen Utensilien und die Vorbereitung der Körperspender. Den Körperspendern danke ich für ihre Entscheidung, sich für Lehr- und Forschungszwecken zur Verfügung gestellt zu haben.

Meinem Bruder Robert Echelmeyer für die Einarbeitung und die vielen Hilfestellungen mit dem Schreibprogramm „Latex“ sowie für das Korrekturlesen.

Meiner Freundin Hannah Weber für den beständigen Zuspruch, die Unterstützung und die Entlastung während des Studiums. Auch ihr danke ich für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Meinen Eltern Carola und Gregor Echelmeyer für die Unterstützung des Studiums. Ohne deren auch finanzielle Hilfestellung wäre das Studium und die gleichzeitige Bearbeitung der Dissertation nicht möglich gewesen. Ich widme ihnen diese Dissertationsschrift.

Philipp Echelmeyer