

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie  
und Unfallchirurgie der Universität zu Köln  
Stellv. Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. L. P. Müller

# **Der Einfluss von Ellenbogenpositionierung und Gelenksufflation auf die Lage der Nn. medianus und radialis - eine dreidimensionale bildgestützte Analyse**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität zu Köln

vorgelegt von  
Martin Sebastian Lappen  
aus Neuss

promoviert am 01. Juni 2022

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie  
und Unfallchirurgie der Universität zu Köln  
Stellv. Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. L. P. Müller

# **Der Einfluss von Ellenbogenpositionierung und Gelenksufflation auf die Lage der Nn. medianus und radialis - eine dreidimensionale bildgestützte Analyse**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität zu Köln

vorgelegt von  
Martin Sebastian Lappen  
aus Neuss

promoviert am 01. Juni 2022

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln  
Druckjahr 2022

Dekan:           Universitätsprofessor. Dr. med. G. R. Fink  
1. Gutachter: Professor Dr. med. K. Wegmann  
2. Gutachter: Professor Dr. med. J.-P. Michael

#### Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützung von folgenden Personen erhalten: Herr Prof. Dr. med. Kilian Wegmann, Herr PD Dr. med. Michael Hackl und Herrn PD Dr. med. Tim Leschinger

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die in dieser Arbeit angegebenen Experimente inkl. Präparation und die Erstellung der radiologischen Datensätze sind nach entsprechender Anleitung durch Herrn Prof. Dr. med. Kilian Wegmann von mir mit Unterstützung von Herrn PD Dr. med. Michael Hackl und Herrn PD Dr. med. Tim Leschinger durchgeführt worden.

Der dieser Arbeit zugrunde liegenden Datensatz wurden von mir und Herrn PD Dr. med. Michael Hackl ausgewertet.

#### Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

München, den 23.11.2021

Unterschrift: .....

## **Danksagung**

Ich möchte mich hiermit bei meinen Betreuern, Kollegen, Freunden und Familie bedanken, die mich in unterschiedlicher Weise bei der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit unterstützt haben.

Der erste Dank gebührt Prof. Dr. med. Kilian Wegmann, der mir während des gesamten Prozesses als Mentor, Vorbild und Gefährte beiseite stand. Neben der Überlassung des Themas möchte ich mich für die freundschaftliche Unterstützung und hervorragenden Betreuung bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei PD Dr. med. Michael Hackl bedanken. Dank der engen und kollegialen Zusammenarbeit war die gemeinsame Arbeit eine in jeder Hinsicht positive Erfahrung.

Weiterer Dank gebührt PD Dr. med. Tim Leschinger für die tatkräftige und konstruktive Unterstützung sowie Jutta Knifka für die angenehme Zusammenarbeit.

Darüber hinaus gilt mein großer Dank meiner Mutter, die mir mit ihrer Unterstützung die Möglichkeit und Autarkie verschafft hat, die Arbeit zu vollenden.

Zusätzlich möchte ich mich bei meiner gesamten Familie, insbesondere bei meinen Schwestern Andrea und Tini sowie bei Ulli für die Unterstützung bedanken.

**Gewidmet meiner Mutter,  
für die uneingeschränkte Unterstützung  
und meinem Vater,  
der die Fertigstellung dieser Arbeit nicht mehr miterleben konnte.**

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	- 6 -
1. Zusammenfassung .....	- 7 -
2. Einleitung .....	- 8 -
2.1. Die Anatomie des Ellenbogengelenks .....	- 8 -
2.1.1. Knochen und gelenkige Verbindungen .....	- 8 -
2.1.2. Kapselbandapparat .....	- 12 -
2.1.3. Neuroanatomie .....	- 14 -
2.1.4. Muskulatur .....	- 20 -
2.1.5. Gefäßversorgung .....	- 23 -
2.2. Ellenbogensteife .....	- 24 -
2.2.1. Epidemiologie, Pathophysiologie und Ätiologie .....	- 25 -
2.2.2. Klassifikation .....	- 26 -
2.2.3. Diagnostik .....	- 27 -
2.2.4. Therapie .....	- 27 -
2.3 Fragestellungen und Ziel der Arbeit .....	- 33 -
3. Material und Methoden .....	- 34 -
3.1 Versuchsanstalt und Präparate .....	- 34 -
3.2 Verwendete Gerätschaft und Software .....	- 34 -
3.3 Versuchsablauf .....	- 35 -
3.3.1 Bereitstellung und Untersuchung der Leichenpräparate .....	- 35 -
3.3.2 Präparation .....	- 35 -
3.3.3 Bildgebung .....	- 38 -
3.3.4 Digitale Messungen .....	- 40 -
3.4 Statistik .....	- 44 -
4. Ergebnisse .....	- 45 -
4.1 Knöcherne Anatomie .....	- 45 -
4.2 Einfluss der Ellenbogenpositionierung .....	- 45 -
4.2.1 Nervus medianus .....	- 45 -
4.2.2 Nervus radialis .....	- 47 -
4.3 Einfluss der Unterarmrotation .....	- 49 -
4.3.1 Nervus medianus .....	- 49 -
4.3.2 Nervus radialis .....	- 51 -
4.4 Einfluss der Gelenksufflation .....	- 52 -
4.4.1 Nervus medianus .....	- 52 -
4.4.2 Nervus radialis .....	- 54 -
5. Diskussion .....	- 56 -
5.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse .....	- 56 -
5.2 Einordnung in die wissenschaftliche Literatur .....	- 56 -
5.2.1 Lagebeziehungen der Nerven zu den knöchernen Landmarken .....	- 57 -
5.2.2 Einfluss von Ellenbogenpositionierung und Gelenksufflation .....	- 59 -
5.2.3 Einfluss von Unterarmrotation .....	- 60 -
5.3 Limitationen .....	- 60 -
6. Literaturverzeichnis .....	- 62 -
7. Vorabveröffentlichung von Ergebnissen .....	- 70 -

## Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
AMCL	Anterior medial collateral ligament
bzw.	beziehungsweise
et al.	et alii / et aliae
LCL	Lateral collateral ligament
LCLC	Lateral collateral ligament complex
Lig.	Ligamentum
LUCL	Lateral ulnar collateral ligament
M.	Musculus
MCL	Medial collateral ligament
Mm.	Musculi
mm	Millimeter
N.	Nervus
Nn.	Nervi
PMCL	Posterior medial collateral ligament
Proc.	Processus
R.	Ramus
Rr.	Rami
SD	Standardabweichung
sog.	sogenannt
u. a.	unter anderem
V.	Vena
Vv.	Venae



## 1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Lageverhältnisse des N. medianus und N. radialis zu den ossären Strukturen des Ellenbogens bestimmt. Außerdem wurde der Einfluss der Ellenbogen- und Unterarmpositionierung sowie der Gelenksufflation untersucht.

Die Lagekenntnis der beiden Nerven sind insbesondere bei der Durchführung einer anterioren Kapsulektomie von Bedeutung. Der N. medianus wurde vor dem medialen Viertel der Trochlea humeri gesehen, kann jedoch auch in einigen Fällen medial der Trochleagrenze liegen. Bei der Kapsulektomie des medialen Teils der anterioren Gelenkkapsel muss dies beachtet werden. Der N. radialis medialisiert durch 90° Flexion des Ellenbogens von seiner Lage vor der medialen Grenze des Capitulum humeri in Extension zum medialen Rand des Capitulum humeri. Dieses Wissen kann genutzt werden, um durch eine Extension des Ellenbogens bei der Kapsulektomie vor dem lateralen Rand der Trochlea humeri und eine Flexion während der Kapsulektomie des lateralen Teils der Gelenkkapsel das Verletzungsrisiko des N. radialis zu verringern.

Zusätzlich wurde eine Verdopplung der Abstände des N. medianus und des N. radialis zur anterioren Begrenzung der knöchernen Strukturen von Extension auf 90° Ellenbogenflexion sowie eine Verdreifachung nach zusätzlicher Gelenksufflation mit 20 ml Flüssigkeit beobachtet. Dies lässt auf ein erhöhtes Risiko iatrogenen Nervenverletzungen bei der arthroskopischen Ellenbogenarthrolyse von Patienten mit Arthrofibrose schließen, da bei diesen Patienten die Möglichkeit der Gelenksufflation des Ellenbogens reduziert sein kann.

## **2. Einleitung**

Die Arthroskopie stellt eine wichtige Innovation der Orthopädie und Unfallchirurgie im 20. Jahrhundert dar [1]. Ihre Geschichte reicht zurück bis ins Jahr 1806, als der deutsche Arzt Philip Bozzini seinen Lichtleiter als Teil eines Zystoskops entwickelte und damit den Grundstein der endoskopischen Chirurgie legte [2]. Während bereits 1912 durch Severin Nordentoft die erste in-vivo-Kniearthroskopie durchgeführt wurde [3], erfolgte die erste arthroskopische Untersuchung eines Ellenbogengelenks im Jahr 1932 von Burman im Rahmen einer Studie an Leichenpräparaten [4]. Mehr als 50 Jahre später wurde 1986 die erste Ellenbogenarthroskopie am Patienten von Andrews und Carson beschrieben [5]. Heutzutage hat sich das arthroskopische Vorgehen für eine Vielzahl von operativen Verfahren am Ellenbogen bewährt [6].

Minimalinvasive Verfahren bieten einige Vorteile gegenüber offenen Eingriffen, wie u. a. eine geringere Tendenz postoperativer Vernarbungen, ein vermindertes Infektionsrisiko, weniger postoperative Schmerzen und eine bessere intraoperative Übersicht über das Gelenk [7]. Allerdings können auch Komplikationen wie iatrogene Nervenläsionen auftreten, welche schwerwiegende Konsequenzen für betroffene Patienten bedeuten können [8].

Um ein bestmögliches operatives Ergebnis zu erhalten und das Komplikationsrisiko zu minimieren, ist eine genaue Kenntnis der anatomischen Verhältnisse, des vorliegenden Krankheitsbildes und der Indikationsstellung des gewählten operativen Verfahrens notwendig.

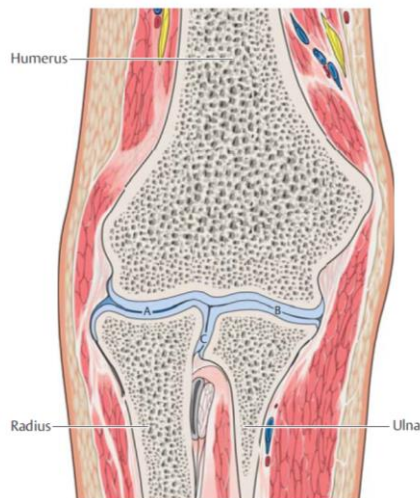
### **2.1. Die Anatomie des Ellenbogengelenks**

Das Ellenbogengelenk verbindet die Schulter mit der Hand und ermöglicht eine präzise Positionierung der Hand im Raum [9]. Die komplexe Funktionalität spiegelt sich im Aufbau des Ellenbogengelenks wider. Eine genaue Kenntnis der anatomischen Verhältnisse ist insbesondere für die operative Behandlung des Ellenbogengelenks von großer Bedeutung.

#### **2.1.1. Knochen und gelenkige Verbindungen**

Das Ellenbogengelenk (Articulatio cubiti) ermöglicht als Drehscharniergelenk (Trochoginglymus) Extensions- und Flexions-, sowie Pronations- und Supinationsbewegungen [10]. Es besteht aus drei Teilgelenken – Radiokapitellar-, Radiohumeral- und Ulnohumeralgelenk – in denen der distale Humerus, der proximale

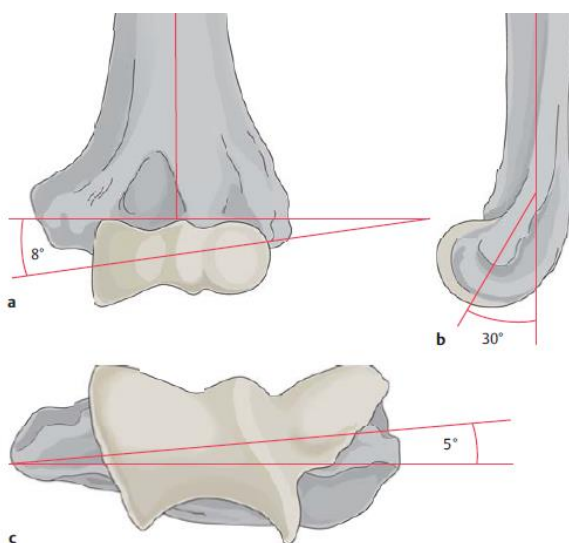
Radius und die proximale Ulna artikulieren (*Abbildung 1*) [11]. Das Ellenbogenrelief wird ventral von der Fossa cubitalis (regio cubitalis anterior), dorsal vom Olecranon (regio cubitalis posterior) sowie medial und lateral von den Epicondylen bestimmt [11].



**Abbildung 1:** Das Ellenbogengelenk setzt sich zusammen aus den drei Teilgelenken Art. humeroradialis, Art. humeroulnaris und Art. radioulnaris proximalis (Wegmann K, Burkhart KJ, Müller LP. Knöcherner Verletzungen des Ellenbogens. Orthop Unfallchir up2date 2012; 7: 339–364)

### 2.1.1.1. Der distale Humerus

Der distale Humerus zeigt eine Valgusstellung von ca.  $8^\circ$  sowie eine anteriore Rotation von  $30^\circ$  zur Schaftachse und ist zur Transversalachse um  $5^\circ$  innenrotiert (*Abbildung 2*) [9, 13]. Sein Schaft erweitert sich nach distal über die Cristae supracondylares in Epicondylus humeri medialis et lateralis, welche dem distalen Humerus seine charakteristische knöcherner Konfiguration verleihen [9, 13, 14].



**Abbildung 2:** Aufbau des distalen Humerus. **a** Der distale Humerus weist eine Valgusstellung im Verhältnis zur Schaftachse von  $8^\circ$  auf. **b** Die Kondylen sind im Verhältnis zur Schaftachse um  $30^\circ$  nach anterioren rotiert. **c** Im Verhältnis zur Transversalachse zeigt sich eine Innenrotation der Gelenkkondylen von  $5^\circ$ . (Wegmann K, Burkhart KJ, Müller LP. Knöcherner Verletzungen des Ellenbogens. Orthop Unfallchir up2date 2012; 7: 339–364)

Der mediale Epicondylus dient als Ursprung der Unterarmflexoren und -pronatoren sowie des medialen Kollateralbandkomplexes und geht distal in die sanduhrförmige, mit Knorpel überzogene Trochlea humeri über [13, 14]. Am lateralen Epicondylus setzen der laterale Kollateralbandkomplex sowie die Extensoren und Supinatoren des Unterarms an [11]. Er geht distal in das kugelförmige Capitulum humeri über, der anterior eine knorpelige Gelenkfläche aufweist und durch eine Rille von der Trochlea humeri getrennt ist [13, 14]. Etwa zwei Zentimeter kaudal Epicondylen liegt der Gelenkspalt, sodass diese Landmarken für die Orientierung im operativen Vorgehen genutzt werden können [9].

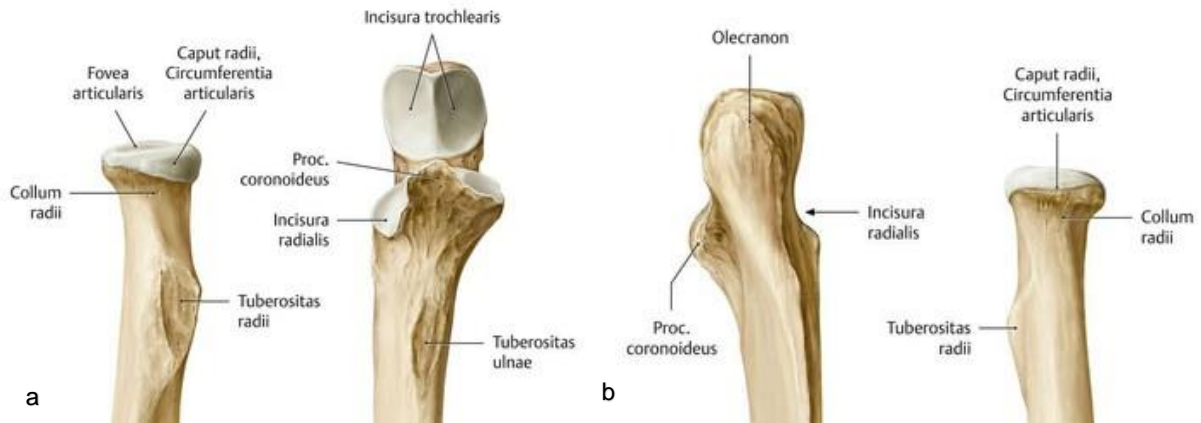
#### **2.1.1.2. Der proximale Radius**

Der proximale Radius besteht aus dem Radiuskopf, Radiushals und dem Radiuschaft [11]. Der Radiuskopf ist zylindrisch geformt, hat einen Durchmesser von 22 bis 24 mm [15] und eine 2 mm tiefen Eindellung, die Fovea articularis (*Abbildung 3*) [16]. Die Oberfläche sowie die anterolateralen Zweidrittel des Radiuskopfes sind mit Gelenkknorpel überzogen und bilden die Circumferentia articularis [9]. Der Radiuskopf geht distal in den Radiushals über, der in einen Winkel von 7° bis 15° zum Radiuschaft abgewinkelt ist [17, 18]. Die distale Begrenzung des Radiushalses stellt die etwa 2,5 cm unterhalb des Radiuskopfs beginnende Tuberositas radii dar, die als Ansatzpunkt der distalen Bizepssehne dient [18].

#### **2.1.1.3. Die proximale Ulna**

An der proximalen Ulna lassen sich das Olecranon und der Proc. coronoideus sowie die mit Gelenkknorpel überzogenen Incisura trochlearis und Incisura radialis unterscheiden (*Abbildung 3*) [11]. Das proximal gelegene Olecranon weist eine dreieckig geformte posteriore Fläche auf, an dem der M. triceps brachii inseriert [19]. An seinem medialen Rand entspringen Fasern des M. flexor carpi ulnaris und lateral setzt der M. anconeus an [11]. Seine anteriore Oberfläche bildet den proximalen Teil der sichelförmigen Incisura trochlearis [20]. Die 5 mm breite, knorpelfreie Bare-Area grenzt innerhalb der Incisura trochlearis das Olecranon von dem Proc. coronoideus ulnae ab [21]. Der Proc. coronoideus ulnae ist ein dreieckiger Knochenvorsprung, an dessen anteroinferioren Fläche Fasern des M. brachialis inserieren, während medial der M. flexor digitorum superficialis und der M. pronator teres entspringen [22]. An seinem medialen Aspekt liegt das Tuberculum subliminus, an dem das anteriore

Bündel des medialen Kollateralbandes ansetzt [23]. Der laterale Rand des Proc. coronoideus bildet die Incisura radialis, eine knorpelüberzogene Einziehung, welche den Caput radii aufnimmt [11]. Am Rand der Incisura radialis setzt das Lig. anulare radii an [24].



**Abbildung 3:** Der proximale Radius und die proximale Ulna. **a** Ventrale Ansicht. **b** Dorsale Ansicht (Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Prometheus LernAtlas der Anatomie. Band Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem, 3. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2012)

#### 2.1.1.4. Articulatio humeroulnaris, humeroradialis et radioulnaris proximalis

Die folgenden drei Teilgelenke bilden zusammen das Ellenbogengelenk: Art. humeroulnaris, Art. humeroradialis und Art. radioulnaris proximalis [9].

Im Art. humeroulnaris wird die Trochlea humeri zangenartig von der Incisura trochlearis ulnae umschlossen [25]. Der hakenförmige Processus coronoideus ulnae stabilisiert den Ellenbogen dabei gegen axiale und posteriore Belastung [9]. Die sich am posterioren Humerus befindende Fossa olecrani umfasst die Olecranonspitze in Extension, die anterior gelegene Fossa coronoidea nimmt den Proc. coronoideus in Flexion auf [14]. In dem auf diese Weise gebildeten Scharniergelenk können Extensions- und Flexionsbewegungen ausgeführt werden, biomechanisch werden jedoch auch geringe Rotationsbewegungen beschrieben [26].

Das Art. humeroradialis befindet sich lateral des Art. humeroulnaris und wird durch die Artikulation des konvexen Capitulum humeri mit der konkaven Fovea articularis des Radiuskopfes gebildet [20]. Proximal des anterioren Capitulum befindet sich die Fossa radialis, in die der ventrale Teil des Radialkopfes während der endgradigen Flexion eintaucht [13]. Das Humeroradialgelenk ist ein Kugelgelenk, das aufgrund der Bandführung jedoch lediglich Flexions-, Extensions- und Rotationsbewegungen ausführen kann [14].

Im Art. radioulnaris proximalis, einem Radgelenk, artikuliert das Caput radii mit der Incisura radialis ulnae [9]. Der Radiuskopf wird vom Ligamentum anulare radii umschlossen und fixiert ihn so gemeinsam mit der Membrana interossea antebrachii an der Ulna, sodass Pro- und Supinationsbewegungen möglich sind, allerdings nur in Verbindung mit Bewegungen im distalen Radioulnargelenk [14].

## **2.1.2. Kapselbandapparat**

### **2.1.2.1. Die Gelenkkapsel**

Die Gelenkkapsel entspringt am Humerus proximal der Fossa coronoidea, der Fossa radialis und der Fossa olecrani und umschließt alle drei Teilgelenke des Ellenbogens [9]. An der Ulna setzt sie am Rand der Incisura trochlearis sowie am Olecranon an, während sie radialseitig am Collum radii inseriert und mit dem Ligamentum anulare radii verschmilzt [11]. Sie besteht aus einer inneren Schicht aus lockerem Bindegewebe und der gelenkseitigen Synovialschleimhaut sowie einer äußeren Schicht aus dichten Kollagenfasern [9]. Die maximale Kapazität der Gelenkkapsel eines Erwachsenen beträgt 25 bis 30 ml und tritt bei einer Ellenbogenflexion von etwa 80° auf [27]. Ein erhöhtes intraartikuläres Volumen führt aufgrund der Rigidität der Gelenkkapsel zu einer Bewegungseinschränkung [9]. Der aus transversalen und schrägen Fasern gebildete ventrale Teil der Kapsel wirkt stabilisierend in Extension gegen Varus- und Valgusbelastungen, während in Flexion vor allem der posteriore Kapselanteil eine stabilisierende Funktion zeigt [25].

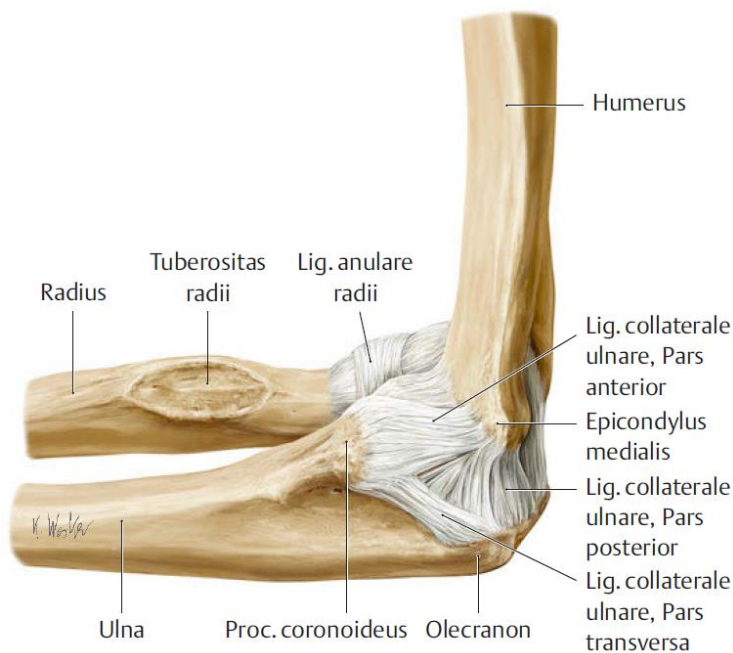
### **2.1.2.2. Der Bandapparat des Ellenbogens**

Die ligamentären Strukturen stellen wichtige Stabilisatoren des Ellenbogengelenks dar [25].

Das Lig. collaterale ulnare, auch mediales Kollateralband (medial collateral ligament, MCL) genannt, ist ein wichtiger Stabilisator gegen Valgusstress [9]. Es entspringt an der inferioren Oberfläche des medialen Epicondylus und wird in drei Bündel unterteilt (*Abbildung 4*) [25]:

- Das Pars anterior, auch anteromediales Kollateralband (anterior medial collateral ligament, AMCL) genannt, setzt 18 mm dorsal zur Koronoidspitze an und gilt als primärer Stabilisator gegen Valguskraften [22, 28-30].

- Das Pars posterior bzw. posteromediales Kollateralband (posterior medial collateral ligament, PMCL) zieht zum medialen Olekranonrand und weist aufgrund seiner dünnen Struktur eine geringere stabilisierende Funktion auf als das AMCL [31].
- Das Pars transversum verläuft vom Processus coronoideus zum Olecranon und scheint keine relevante Rolle für die Stabilität des Ellenbogens zu spielen [11, 25].



**Abbildung 4:** Medialer Blick auf die knöchernen und ligamentären Strukturen des Ellenbogens. Zu sehen ist das Lig. collaterale ulnare mit seinem Pars anterior, Pars posterior und Pars transversa. (Wegmann K, Burkhart KJ, Müller LP. Knöcherne Verletzungen des Ellenbogens. Orthop Unfallchir up2date 2012; 7: 339–364)

Der laterale Kollateralbandkomplex (lateral collateral ligament complex, LCLC) gilt als Stabilisator gegen Varusstress und besteht aus vier Komponenten (*Abbildung 5*) [9]:

- Das Lig. anulare geht vom vorderen und hinteren Rand der Incisura radialis aus und umschließt den Radiuskopf [24]. Es stabilisiert so das proximale Radioulnargelenk [11].
- Das laterale ulnare Kollateralband (lateral ulnar collateral ligament, LUCL) bzw. Lig. collaterale ulnare laterale entspringt am Epicondylus laterale und zieht über den posterolateralen Radiuskopf nach distal, wo es am Tuberculum der Crista supinatoria ansetzt [32]. Es gilt als Schlüsselstabilisator gegen Varusstress [33].
- Das radiale Kollateralband (radial collateral ligament, RCL), auch Lig. collaterale radiale, entspringt ebenfalls am Epicondylus lateralis und zieht zum

Lig. anulare, mit dessen Fasern es sich verbindet [23]. Es stabilisiert mit dem LUCL gegen Varusstress [34].

- Das akzessorische radiale Kollateralband (accessory lateral collateral ligament, ALCL) bzw. Ligamentum collaterale laterale accessorius trägt zur Stabilisierung des Ringbandes bei [14]. Es verläuft ausgehend vom Lig. anulare über den lateralen Radiuskopf und setzt unmittelbar distal am hinteren Rand der Incisura radialis ulnae an [9, 24].



**Abbildung 5:** Der laterale Kollateralbandkomplex bestehend aus (1) radialem Kollateralband, (2) lateralem ulnaren Kollateralband, (3) Lig. anulare und (4) akzessorische radiale Kollateralband (Siebenlist S, Biberthaler P. Akute Kapsel-Band-Verletzungen des Ellenbogens. Trauma Berufskrankh 2015; 17, 132–139).

### 2.1.3. Neuroanatomie

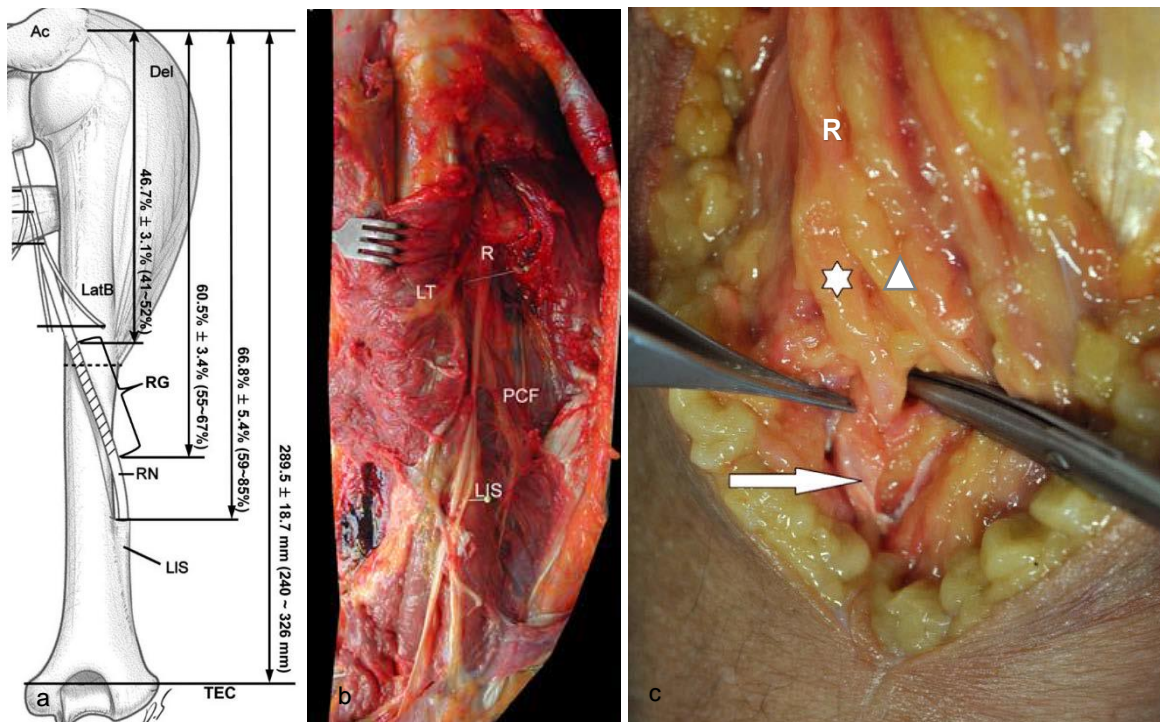
Die genaue Kenntnis der lokalen Neuroanatomie des Ellenbogens ist von großer Bedeutung, um das Verletzungsrisiko im Rahmen von diagnostischen und therapeutischen Interventionen zu verringern [14].

#### 2.1.3.1. Nervus radialis

Der N. radialis geht nach Abzweigung des N. axillaris aus dem Fasciculus posterior des Plexus brachialis hervor und enthält Fasern der Segmente C5–Th1 [11]. Er liegt in der Axilla dorsal der A. axillaris an und zieht zwischen dem M. teres major und dem M. triceps brachii zum dorsalen Humerus [36]. Von hier zieht er im Sulcus nervi radialis mit der A. profunda brachii spiralförmig entlang des Humerus nach distal (*Abbildung 6a und 6b*) [37]. Er durchbricht das Septum intermusculare brachii laterale und verläuft zwischen M. brachialis und M. brachioradialis zur Ellenbeuge [9]. Auf Gelenkebene



trennt der M. brachialis den Nerv von der Gelenkkapsel, weiter distal kann er der anterioren Kapsel jedoch direkt aufliegen [38].



**Abbildung 6:** Der Verlauf der N. radialis am Humerus.

- Der Nerv erreicht den Sulcus radialis (RG) auf Höhe von 46,7% der Strecke zwischen Akromionspitze (Ac) zur transepicondylären Linie (TEC), verlässt ihn bei 60,5% und durchbohrt das Septum intermusculare brachii laterale (LIS) auf 66,8%. (Cho H, Lee HY, Gil YC, Choi YR, Yang HJ. Topographical anatomy of the radial nerve and its muscular branches related to surface landmarks. Clin Anat. 2013 Oct;26(7):862-9.)
- Posterolaterale Sicht auf den Humerus. Der N. radialis (R) verläuft spiralförmig entlang des Humerus. Die proximale Markierung zeigt den Eintrittspunkt des in den Sulcus radialis, die distale Markierung zeigt den Eintrittspunkt in das Septum intermusculare laterale (LIS) an (LT: Caput longum m. triceps brachii; PCF: N. cutaneus antebrachii posterior). (Artico M, Telera S, Tiengo C, Stecco C, Macchi V, Porzionato A, Vigato E, Parenti A, De Caro R. Surgical anatomy of the radial nerve at the elbow. Surg Radiol Anat. 2009 Feb;31(2):101-6.)
- Aufspaltung des N. radialis (R) in den R. superficialis (Dreieck) und den R. profundus (Stern), der durch die Frohse-Arkade in den M. supinator (Pfeil) zieht. (Artico M, Telera S, Tiengo C, Stecco C, Macchi V, Porzionato A, Vigato E, Parenti A, De Caro R. Surgical anatomy of the radial nerve at the elbow. Surg Radiol Anat. 2009 Feb;31(2):101-6..)

Der N. radialis spaltet sich in einen oberflächlichen Ast (R. superficialis) und einen tiefen Ast (R. profundus) auf (*Abbildung 6c*) [11]. Letzterer tritt durch die Frohse-Arkade in den Supinatorkanal und zieht Richtung Handgelenk nach distal [9]. Der R. superficialis verläuft mit der A. radialis entlang des M. brachioradialis und zieht oberhalb des Proc. styloideus radii zwischen Radius und M. brachioradialis auf die Streckseite des Unterarms [39].

Der N. radialis innerviert motorisch die streckseitigen Oberarmmuskeln, die radiale Muskelgruppe, die oberflächliche und tiefen Unterarmextensoren sowie sensibel dorsoradial den Ober- und Unterarm und die Hand (*Tabelle 1*) [11].

### Motorische Äste

---

<b>Rr. musculares</b>	M. triceps brachii
	M. anconeus
	M. brachioradialis
	M. extensor carpi radialis longus
<b>R. profundus</b>	M. supinator
	M. extensor carpi radialis brevis
	M. extensor digitorum
	M. extensor digiti minimi
	M. extensor carpi ulnaris
	M. abductor pollicis longus
	M. extensor pollicis brevis
	M. extensor pollicis longus
	M. extensor indicis

---

### Sensible Äste

---

<b>Rr. articulares</b>	Schulter- und Ellenbogengelenkkapsel
<b>N. cutaneus brachii posterior</b>	Proximaler Oberarm: dorsaler Bereich
<b>N. cutaneus brachii lateralis inferior</b>	Proximaler Oberarm: dorsaler und lateraler Bereich
<b>N. cutaneus antebrachii posterior</b>	Unterarm: radialer Bereich der Streckseite
<b>N. interosseus antebrachii posterior</b>	Handgelenk: Periost
<b>R. superficialis</b>	Handrücken: radialer Bereich
<b>Nn. digitales dorsales</b>	Daumen und Zeigefinger: Grund- und Mittelphalanx; Mittelfinger: radialer Bereich

---

**Tabelle 1:** Übersicht über die motorischen und sensiblen Äste des N. radialis [11].

Schädigungen des N. radialis erscheinen klinisch unterschiedlich je nach Höhe der Verletzung. Eine Läsion proximal des Ellenbogens zeigt sich als komplette Fallhand: Das Anheben der Hand gegen die Schwerkraft ist nicht möglich und begleitende sensible Ausfallserscheinungen treten auf [9]. Bei Verletzungen des R. profundus ab Höhe der Frohse-Arkade kommt es zu Ausfällen der Fingerstrecker, des M. extensor carpi ulnaris und des M. abductor pollicis longus [10]. Eine komplette Fallhand und

Sensitivitätsstörung im Bereich der Hand treten nicht auf, da die entsprechenden Nervenfasern vor Eintritt in den Supinatorkanal abgehen [10, 11].

### 2.1.3.2. Nervus medianus

Ebenfalls von den Segmenten C5 – Th1 gespeist, geht der N. medianus aus der Medianusgabel hervor, die von der Radix medialis des Fasciculus medialis und der Radix lateralis des Fasciculus lateralis des Plexus brachialis gebildet wird [11]. Gemeinsam mit der A. brachialis zieht er zwischen M. biceps brachii und M. brachialis zum Ellenbogen [40]. Bis etwa 3 cm proximal des Lacertus fibrosus ist er von einer Faszie umgeben, die aus der Brachialis- und Bizepsfaszie hervorgeht [9]. Unterhalb der Aponeurosis muscui bicipitis brachii zieht er zum M. pronator teres, den er durchbohrt, und verläuft anschließend zwischen M. flexor digitorum superficialis und M. flexor digitorum profundus nach distal [40]. Er zieht am Handgelenk durch den Karpaltunnel zur Hohlhand [11]. Der motorische N. interosseus anterior zweigt sich etwa 5 cm distal des medialen Epicondylus auf Höhe des M. pronator teres vom N. medianus ab und zieht begleitet von der A. interossea anterior zum M. pronator quadratus [9].

Der N. medianus versorgt motorisch sämtliche Pronatoren, die oberflächlichen und tiefen Flexorengruppe des Unterarms sowie die Thenar- und Mittelhandmuskulatur [11]. Von ihm werden außerdem die radialen Zweidrittel der Handfläche, der Digiti I – III, die radiale Hälfte des Ringfingers, die dorsalen Endglieder des Zeigefingers, Mittelfingers und die radiale Hälfte des Endgliedes des Ringfingers sensibel versorgt (*Tabelle 2*) [9].

#### Motorische Äste

<b>Rr. musculares</b>	M. pronator teres M. flexor carpi radialis M. palmaris longus M. flexor digitorum superficialis
<b>N. interosseus antebrachii anterior</b>	M. pronator quadratus M. flexor pollicis longus M. flexor digitorum profundus

<b>R. muscularis thenaris</b>	M. abductor pollicis brevis M. opponens pollicis M. flexor pollicis brevis (Caput superficialis)
<b>Nn. digitales palmares communes</b>	Mm. lumbricales I et II

---

### Sensible Äste

---

<b>Rr. articulares</b>	Ellenbogen- und Handgelenkkapsel
<b>R. palmaris</b>	Daumenballen und radiale Hohlhand
<b>Nn. digitales palmares proprii</b>	Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger: Palmarseite und dorsale Fingerspitzen; Ringfinger: radialer Bereich und dorsale Fingerspitze

---

**Tabelle 2:** Übersicht über die motorischen und sensiblen Äste des N. medianus [11].

Läsionen des N. medianus in Höhe des Ellenbogens führen zur Schwurhandsymptomatik mit gestörter Unterarmpronation, Unfähigkeit des Faustschlusses, fehlender Daumenopposition, Thenaratrophie sowie Hypästhesie der radialen Handfläche [41]. Eine Schädigung des N. interosseus anterior führt zum Nervus-interosseus-anterior-Syndrom mit Schwäche des M. flexor pollicis longus, des M. pronator quadratus und der Flexion im distalen Interphalangealgelenk des Zeigefingers sowie selten des Mittelfingers, sodass die Ausführung eines Spitzgriffes nicht mehr möglich ist [42].

### 2.1.3.3. Nervus ulnaris

Von den Segmenten C8 bis Th1 gespeist, geht der N. ulnaris aus dem Fasciculus medialis des Plexus brachialis hervor und verläuft im Sulcus bicipitalis medialis entlang des Humerus [11]. Ungefähr 10 cm proximal des Epicondylus medialis durchbohrt er das Septum intermusculare mediale und zieht ventral des M. triceps brachii in den inferior des Epicondylus medialis gelegenen Sulcus ulnaris [43]. Hier liegt er mechanisch exponiert, sodass es leicht zur Kompression oder Reizung des Nervs kommen kann [14]. Der Nerv zieht anschließend zur Beugeseite des Unterarms, wo er zwischen den Köpfen des M. flexor carpi ulnaris zum Handgelenk läuft [13]. Er innerviert motorisch den ulnaren Teil des M. des M. flexor digitorum profundus, die Hypothenarmuskeln, den M. adductor pollicis, das Caput profundum des M. flexor

pollicis brevis und die Mittelhandmuskulatur sowie sensibel die ulnare Hand (*Tabelle 3*) [11].

### Motorische Äste

---

<b>Rr. musculares</b>	M. flexor carpi ulnaris
	M. flexor digitorum profundus
<b>R. superficialis</b>	M. palmaris brevis
<b>R. profundus</b>	M. abductor digiti minimi
	M. opponens digiti minimi
	M. flexor digiti minimi brevis
	Mm. interossei dorsales
	Mm. interossei palmares
	Mm. lumbricales III und IV
	M. adductor pollicis brevis
	Caput profundum des M. flexor pollicis brevis

---

### Sensible Äste

---

<b>Rr. articulares</b>	Ellenbogengelenkkapsel
<b>R. dorsalis</b>	Handrücken: medialer Bereich
<b>Nn. digitales dorsales</b>	Ringfinger und Kleinfinger: Streckseiten; Mittelfinger: ulnare Streckseite bis zur Mittelphalanx
<b>R. palmaris</b>	Hypothenar
<b>Nn. digitales palmares proprii</b>	Kleinfinger: Beugeseite und Fingerkuppe; Ringfinger: ulnarer Bereich und Fingerkuppe

---

**Tabelle 3:** Übersicht über die motorischen und sensiblen Äste des N. ulnaris [11].

Als typisches Zeichen einer Verletzung des N. ulnaris gilt die Krallenhand, bei der beim Versuch eine Faust zu bilden eine Beugung der Finger-Mittel- und -Endgelenke möglich ist, es jedoch zu einer Überstreckung der Grundgelenke kommt [11]. Ebenfalls kann ein Fromet-Zeichen – die kompensatorische Flexion des Daumenendgliedes aufgrund der Unfähigkeit der Daumenadduktion –, eine Atrophie des Hypothenars und

der Mm. Interossei sowie ein Sensitivitätsverlust im Versorgungsgebiet des N. ulnaris auftreten.

#### 2.1.3.4. Nervus musculocutaneus

Der N. musculocutaneus entspringt den Segmenten C5 – 7 und geht lateral des M. pectoralis minor aus dem Fasciculus lateralis hervor [11]. Er durchbricht den M. coracobrachialis etwa 5 – 7 cm distal des Proc. coracoideus und verläuft an der Ventralseite des Oberarms in der Flexorenloge zwischen M. biceps brachii und M. brachialis [44]. Er durchbricht die Fascia brachii lateral der Bizepssehne, um so in die Fossa cubiti zu gelangen [9]. Als N. cutaneus antebrachii lateralis zieht er nun radiallyseitig am Unterarm zum Handgelenk und Thenar [11]. Er innerviert motorisch die Oberarmflexoren sowie sensibel die radiale Unterarmseite (*Tabelle 4*) [9].

#### Motorische Äste

<b>Rr. musculares</b>	M. biceps brachii M. coracobrachialis M. brachialis
-----------------------	---

#### Sensible Äste

<b>Rr. articulares</b>	Ellenbogengelenkkapsel
<b>R. periostalis</b>	Humerus: Periost
<b>N. cutaneus antebrachii lateralis</b>	Unterarm: radialer Bereich bis zum Thenar

*Tabelle 4:* Übersicht über die motorischen und sensiblen Äste des N. musculocutaneus [11].

Eine Läsion des N. musculocutaneus kann zu einer Flexions- und Supinationsschwäche des Ellenbogens führen [45]. Auch Sensitivitätsstörungen oder eine Abschwächung des Bizepssehnenreflexes können auftreten [46].

#### 2.1.4. Muskulatur

Die Muskulatur am Ellenbogen kann in Oberarmextensoren, Oberarmflexoren, Unterarmextensoren und Unterarmflexoren unterteilt werden [11].

##### 2.1.4.1. Oberarmextensoren

Zu den Ellenbogenextensoren werden der M. triceps brachii und der M. anconeus gezählt, die beide vom N. radialis innerviert werden [11].

Der M. triceps brachii besteht aus drei Köpfen mit unterschiedlichen Ursprüngen: Das Caput longum entspringt am Tuberculum infraglenoidale, während Caput mediale und Caput laterale beide dorsal am Humerus sowie am Septum intermusculare brachii laterale sowie das Caput mediale zusätzlich am Septum intermusculare brachii mediale entstammen [9]. Die Ansatzsehne inseriert mit einem oberflächlichen und einem tiefen Blatt am Olecranon und zieht in die Unterarmfaszie ein [19].

Der M. anconeus ist ein dreieckförmiger Muskel, der dorsal des lateralen Epicondylus entspringt und am Olecranon sowie an der Facies posterior ulnae ansetzt [47]. Er agiert strecknah als Extensor und zeigt mit zunehmender Flexion eine beugende Wirkung [9].

#### **2.1.4.2. Oberarmflexoren**

Als Hauptflexoren des Ellenbogens gelten der M. biceps brachii und der M. brachialis, die beide vom N. musculocutaneus innerviert werden [10].

Der M. biceps brachii inseriert an der Tuberositas radii und strahlt mit einigen Fasern als Aponeurosis musculi bicipitis in die Fascia antebrachii ein [9]. Sein Caput longum entspringt am Tuberculum supraglenoidale und sein Caput breve am Proc. coracoideus [11]. Neben seiner Beugefunktion gilt er als der stärkste Supinator bei flektiertem Unterarm [11].

Der M. brachialis entspringt breitflächig der Facies anterior humeri und dem Septum intermusculare brachii mediale et laterale und setzt an der Tuberositas ulnae, am anteroinferioren Proc. coronoideus ulnae sowie mit einigen Fasern an der Gelenkkapsel an [9]. Er bewirkt die Ellenbogenflexion [11].

#### **2.1.4.3. Unterarmextensoren**

Die Extensoren des Unterarms werden in eine radiale und eine dorsale Gruppe unterteilt, denen die Innervation durch den N. radialis gemein ist [10].

Die radiale Gruppe wird aus dem M. brachioradialis und den Mm. extensor carpi radialis longus et brevis gebildet [11]. Der M. brachioradialis entspringt an der Crista supracondylaris lateralis, der Margo lateralis und am Septum intermusculare brachii laterale und zieht zum Proc. styloideus radii [48]. Neben der Handgelenksextension kann er je nach Position des Unterarms auch als Beuger, Pronator oder Supinator des Ellenbogens wirken [11]. Die Mm. extensor carpi radialis longus et brevis haben ihre Ursprünge an der Crista supracondylaris und am Epicondylus humeri lateralis [10]. Sie

ziehen zur Basis der Ossa metacarpale II bzw. III und bewirken zusätzlich zur Handgelenksexension die Radialabduktion im Handgelenk [10].

Die dorsale Gruppe der Unterarmextensoren wird in oberflächliche und in tiefe Muskeln unterteilt [11]. Zur oberflächlichen Gruppe zählen der M. extensor carpi ulnaris, der M. extensor digitorum und der M. extensor digiti minimi [9]. Sie haben ihren gemeinsamen Ursprung am Epicondylus lateralis humeri. Der M. extensor carpi ulnaris entspringt mit seinem Caput ulnare zusätzlich an der dorsalen Ulna [11]. Er setzt an der Basis des Os metacarpale V an, während die Mm. extensor digitorum et digitorum minimi zu den Phalanges mediae et distales II-V ziehen [10]. Sie können neben der Handgelenksexension eine Ulnarabduktion bewirken und die Fingerstreckung bewirken [11].

Zur tiefen Schicht zählen der M. abductor pollicis longus, die Mm. extensor pollicis brevis et longus, der M. extensor indicis und der M. supinator [11]. Lediglich der M. supinator mit seinem Ursprung an der lateralen Ulna, dem Epicondylus humeri lateralis und dem LCL weist eine Beziehung zum Ellenbogen auf [9]. Er inseriert am Radiushals und bewirkt die Supination des Ellenbogengelenks [11].

#### **2.1.4.4. Unterarmflexoren**

Die Unterarmflexoren werden ebenfalls in eine oberflächliche und eine tiefe Gruppe unterteilt, die durch den N. medianus innerviert werden [11].

Zur oberflächlichen Schicht werden der M. pronator teres, M. flexor carpi radialis, M. flexor carpi ulnaris, M. flexor digitorum superficialis und der M. palmaris longus gezählt [10]. Diese Muskelgruppe entspringt am Epicondylus medialis sowie an der Fascia antebrachii [11]. Bis auf den M. pronator teres bewirken die oberflächlichen Unterarmflexoren alle eine Palmarflexion [9]. Der M. pronator teres hat mit seinem Caput ulnare einen zusätzlichen Ursprung am Proc. coronoideus und zieht zum Radiusschaft [11]. Er bewirkt die Pronation und Flexion im Ellenbogengelenk [10]. Der M. flexor carpi ulnaris entspringt mit seinem Caput ulnare zusätzlich am Olecranon und dorsalen Ulnarand und zieht gemeinsam mit dem M. flexor carpi radialis zu den Ossa carpi und metacarpi [10]. Der M. flexor carpi ulnaris bewirkt die Ulnarabduktion und der M. flexor carpi radialis die Radialabduktion und Unterarmpronation. Die Sehnen des M. flexor digitorum superficialis inserieren lateral an den Phalanges mediae des 2. bis 5. Fingers und der M. palmaris longus am Ligamentum carpi und an der



Palmaraponeurose [11]. Bis auf den vom N. ulnaris versorgtem M. flexor carpi ulnaris wird diese Muskelgruppe vom N. medianus innerviert [10].

Zur tiefen Schichte der Unterarmflexoren gehören der M. pronator quadratus, M. flexor pollicis longus und M. flexor digitorum profundus [10]. Der M. flexor digitorum profundus hat als einziger der tiefen Unterarmflexoren mit seinem Ursprung an der Facies anterior der Ulna und der Palmarseite der Membrana interossea antebrachii eine anatomische Beziehung zum Ellenbogengelenk [9]. Er zieht zu den Phalanges distales II – V und bewirkt die Palmarflexion der Grund-, Mittel- und Endgelenke der Finger II – V sowie des Handgelenks [11].

## **2.1.5. Gefäßversorgung**

### **2.1.5.1. Arterielle Versorgung**

Die arterielle Versorgung der oberen Extremität erfolgt über die A. subclavia, die unter der Clavicula in die A. axillaris übergeht und sich ab der unteren Begrenzung des M. pectoralis major in die A. brachialis fortsetzt [11]. Die A. brachialis verläuft begleitet von den Vv. brachiales im Sulcus bicipitalis medialis nach distal und gibt drei Nebenäste, die A. brachialis profunda, A. ulnaris collateralis superior und die A. collateralis ulnaris inferior, ab [9].

Die am Unterrandes des M. teres major entspringende A. brachialis profunda verläuft zusammen mit dem N. radialis zwischen den Köpfen des M. triceps brachii im Sulcus nervi radialis nach distal [10]. Sie teilt sich in die A. collateralis radialis, die mit der A. radialis recurrens anastomosiert, und in die A. collateralis media, die Anastomosen mit der A. collateralis ulnaris inferior und der A. interossea recurrens bildet [11].

Die A. ulnaris collateralis superior geht auf Mitte des Oberarms von der A. brachialis ab [10]. Sie verläuft nach distal bis unterhalb des M. flexor carpi ulnaris, wo sie mit der A. recurrens ulnaris posterior und der A. collateralis ulnaris inferior anastomosiert [11].

Die A. collateralis ulnaris inferior entspringt etwa 4 – 5 cm oberhalb des Ellenbogengelenks aus der A. brachialis und anastomosiert mit der A. profunda brachii, der A. recurrens ulnaris anterior, der A. collateralis ulnaris superior und der A. recurrens ulnaris posterior [10, 11].

Auf Höhe des Ellenbogengelenks spaltet sich die A. brachialis medial der distalen Bizepssehne in die funktionellen Endäste, A. radialis und A. ulnaris [9]. Die A. radialis verläuft von der Bifurkation der A. brachialis in der Fossa cubitalis entlang des Radius

im Sulcus antebrachii radialis unterhalb des M. brachioradialis in Richtung Handgelenk [11].

Die A. ulnaris verläuft unterhalb des M. pronator teres und des M. flexor digitorum superficialis nach ulnar und distal [9]. Sie zieht im Sulcus antebrachii ulnaris entlang des lateralen Rand des M. flexor carpi ulnaris und auf dem M. flexor digitorum profundus zum Handgelenk [11].

#### **2.1.5.2. Venöser Abfluss**

Zu den wichtigsten venösen Gefäßen des Ellenbogens zählen die V. cephalica und die V. basilica [11].

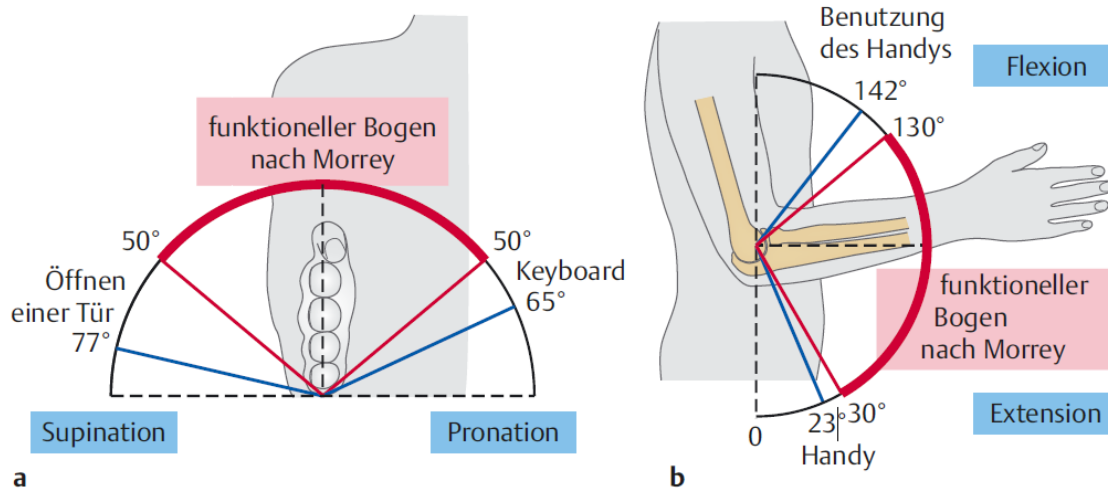
Die V. cephalica beginnt am dorsalen Daumen und wird aus dem Rete venosum dorsale manus gespeist [10]. Als V. cephalica antebrachii verläuft sie auf der radialen Seite des Unterarms und zieht anschließend über die Ellenbeuge entlang der lateralen Seite des M. biceps brachii zum Trigonum clavipectorale, wo sie in die V. axillaris mündet [11].

Die V. basilica entsteht am Rete venosum dorsale manu der ulnaren Hand und verläuft an der Ulnarseite des Unterarms nach proximal [10]. Sie passiert die Fossa cubiti, durchläuft den Hiatus basilicus und nimmt am Unterrand des M. teres major die V. circumflexa humeri anterior und posterior auf, um anschließend gemeinsam mit der V. brachialis in die V. axillaris zu münden [11].

## **2.2. Ellenbogensteife**

Eine häufige Pathologie am Ellenbogen ist die Ellenbogensteife. Als regelrechte Beweglichkeit eines gesunden Ellenbogengelenks gilt eine Extension/Flexion von 0/0/145° und eine Supination/Pronation von 90/0/90° [49]. Laut einer Untersuchung von Morrey et al. [50] aus dem Jahr 1981 sind für die meisten Aktivitäten im täglichen Leben ein Bewegungsbereich von 0/30/130° Extension/Flexion und 50/0/50° Supination/Pronation genügend (*Abbildung 7*). Weitere Studien zeigten jedoch, dass eine Vielzahl von Aktivitäten wie Maßnahmen der Körperhygiene oder das Öffnen einer Tür einen größeren als den von Morrey beschriebenen Bewegungsspielraum erforderten [51, 52]. Insbesondere Maßnahmen des modernen Lebens wie das Telefonieren mit einem Handy und die Verwendung einer Maus oder Tastatur erfordern einen höheren Bewegungsumfang, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die funktionellen Anforderungen heutzutage höher einzuschätzen sind [52].

Während Pronations- und Supinationsbewegungen bis zu einem gewissen Grad durch Bewegungen des Oberarms und Oberkörpers ausgeglichen werden können, ist dies für die mangelnde Extensions- und Flexionsbewegungen des Ellenbogens nicht möglich [49]. Die Ellenbogensteife ist somit definiert als Extensionsdefizit von  $> 30^\circ$  und eine Flexion von  $< 120^\circ$ .



**Abbildung 7:** Funktioneller Bogen für die Ausübung der Aufgaben des täglichen Lebens in (a) Supination und Pronation sowie (b) Flexion und Extension (Brunner U, Lichtenberg S, Gausepohl S, Mader K, Ellenbogensteife, in Expertise Ellenbogen, 2016, Thieme Verlag. S. 289-318.) .

### 2.2.1. Epidemiologie, Pathophysiologie und Ätiologie

Ellenbogensteifen kommen häufig posttraumatisch beispielsweise nach Luxationen oder Frakturen vor [53]. Insbesondere junge, aktive Patienten unter 40 Jahren sind häufig betroffen [49]. Allerdings können weniger schwere Verletzungen sowie degenerative oder entzündliche Pathologien ebenfalls die Beweglichkeit des Ellenbogengelenks beeinträchtigen [53, 54]. Als Folgen von Verletzungen kann es im Rahmen von Entzündungsreaktionen zur Fibrose und anschließend zur Bildung von Osteophyten kommen, die als heterotope Ossifikationen mechanische Bewegungshindernisse darstellen können [55]. Darüber hinaus zeigt sich die Gelenkscapsel anfällig für Kontrakturen. Es wird angenommen, dass die Umwandlung von Fibroblasten in Myofibroblasten dabei eine Rolle spielt [56]. Deren Stimulation und Differenzierung unterliegt einem komplexen Mechanismus und kann auch durch eine umweltbedingte Bewegungseinschränkung mechanisch stimuliert werden [49, 57]. Zusätzlich kann auch die Haut durch Vernarbungen und die Muskulatur durch Verklebungen, Kontrakturen und Elastizitätsverlust zur Versteifung des Ellenbogengelenks beitragen [49].

### 2.2.2. Klassifikation

Es existieren verschiedene Klassifizierungssysteme für die Ellbogensteife, die unterschiedliche Aspekte des Krankheitsbildes erfassen. *Tabelle 5* gibt einen Überblick über die geläufigsten Klassifikationen.

<b>Klassifikation</b>	<b>Erfasste Aspekte</b>	<b>Einteilung</b>
<b>Kay [58]</b>	Knöchernen und weichteiligen Beteiligung	Weichteilkontraktur Weichteilkontraktur mit Ossifikation Nicht-dislozierte intraartikuläre Fraktur mit Weichteilkontraktur Dislozierte intraartikuläre Fraktur mit Weichteilkontraktur Posttraumatische Knochenbrücken
<b>Stehle und Gohlke [59]</b>	Ätiologie	Degenerative Ursachen Traumatische Ursachen Eigenständige Ursachen
<b>Morrey [60]</b>	Lagebeziehung zum Gelenk	Extrinsische Ursachen (extraartikulär) Intrinsische Ursachen (intraartikulär) Gemischte Ursachen
<b>Jupiter [61]</b>	Komplexität	Einfache Steife Komplexe Steife

*Tabelle 5:* Übersicht der am geläufigsten Klassifikationen der Ellenbogensteife [49]

Des Weiteren kann eine Klassifizierung anhand der Bewegungseinschränkung erfolgen [62]. Es wird unterschieden in

- minimale Einschränkungen (Kontraktur mit einem Bewegungsbereich  $> 90^\circ$ ),
- mäßige Einschränkungen (Bewegungsbereich von  $61^\circ - 90^\circ$ ),
- starke Einschränkungen (Bewegungsbereich von  $31^\circ - 60^\circ$ ),
- sehr starke Einschränkungen (Bewegungsbereich von  $\leq 30^\circ$ ).

Dabei wird zusätzlich zwischen Extensions- und Flexionskontrakturen sowie gemischten Formen unterschieden.

### **2.2.3. Diagnostik**

Die ersten Schritte der Diagnostik umfassen eine detaillierte Anamneseerhebung mit Bestimmung der Symptome, des Unfallmechanismus und der vorherigen Behandlung sowie die klinische Untersuchung einschließlich der Bestimmung der aktiven und passiven Beweglichkeit [49]. Die genaue Erfragung von Schmerzen können Hinweise auf die Ursache der Ellbogensteifheit liefern. Schmerzen im mittleren Bewegungsbereich weisen auf eine intrinsische Komponente hin, Schmerzen am Ende der Bewegung auf ein mechanisches Impingement, beispielsweise durch Osteophyten, und Schmerzfreiheit auf eine posttraumatische Genese [49, 56]. Eine orientierende neurologische Untersuchung sollte ebenfalls durchgeführt werden [63]. Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen sollten als Teil der Standarddiagnostik zur Beurteilung der knöchernen Strukturen durchgeführt werden [49]. Darüber hinaus können mit der CT-Bildgebung intraartikuläre Veränderungen wie Osteophyten oder freie Gelenkkörper sowie der Konsolidierungsstatus von Frakturen zu beurteilt werden [64]. Ein MRT kann die Bildgebung zur weichteiligen Beurteilung ergänzen [49].

### **2.2.4. Therapie**

Das Behandlungskonzept ist abhängig von der Ursache und dem Schweregrad der Ellenbogensteife. Während eine geringfügige Ellenbogensteife häufig mit einer konservativen Therapie behandelt werden kann, ist eine operative Arthrolyse bei schwereren Manifestationen indiziert [49, 65].

#### **2.2.4.1. Konservative Therapie**

Die konservative Therapie ist bei geringem Schweregrad und insbesondere bei Kindern und Jugendlichen indiziert und umfasst eine analgetische und entzündungshemmende Behandlung sowie Krankengymnastik und eine Schienenbehandlung [49]. Physiotherapie sollte lediglich in einem schmerzfreien Bereich durchgeführt werden, da bei einem zu aggressiven Vorgehen die Gefahr einer weiteren Einsteifung durch Mikrotraumatisierungen besteht [49]. Die Behandlung mit dynamischen oder statischen Orthesen sollte zusätzlich eingesetzt werden, wenn die Beweglichkeit für mehr als 2 Monate eingeschränkt ist [66]. Beide Orthesenarten zeigen eine vergleichbare Wirksamkeit [67].

#### **2.2.4.2. Offene Arthrolyse**

Die Indikation zur offenen Arthrolyse wird mit Blick auf das Patientenalter, Ausmaß der Bewegungseinschränkung, individueller Beeinträchtigung, Schmerzen und dem erwarteten Spontanverlauf gestellt [49]. Mit der Ausschöpfung der konservativen Maßnahmen gilt die offene Arthrolyse als indiziert, wobei der genaue Zeitpunkt für den operativen Eingriff weiterhin umstritten ist. In einigen Quellen wurden bessere funktionelle Ergebnisse beobachtet, wenn die operative Behandlung innerhalb des ersten symptomatischen Jahres stattfand [68-70], während andere Autoren keine zeitliche Korrelation zwischen Beschwerdedauer und Therapieerfolg sahen und eine operative Versorgung beim Ausbleiben einer Beschwerdeverbesserung nach Ausschöpfung der konservativen Maßnahmen empfahlen [71-73].

Bei extrinsischen Läsionen mit Verminderung der Extension oder Flexion von mehr als 30° oder Restbewegungsbereich zwischen 60° und 100° gilt im Allgemeinen eine offene Arthrolyse für indiziert [60, 62, 63]. Weitere Indikationen sind neurologische Symptome, ausgeprägte heterotope Ossifikationen sowie sich in-situ befindendes Osteosynthesematerial bei vorangegangenen Operationen [62, 66, 74].

Ein begrenztes Verbesserungspotential besteht allerdings bei geringfügigen Bewegungseinschränkungen und vorwiegend intraartikulären Schäden [62]. Ungeeignet für die offene Arthrolyse gelten Patienten mit mangelnder Compliance, unvollständigem Knochenwachstum, lokalen und systemischen Infektzeichen, Muskelspastik, schweren systemischen oder psychischen Erkrankungen sowie begleitender Algodystrophie [49, 62].

Intraoperativ sollte die größtmögliche Beweglichkeit erreicht werden, zumal der endgültige Bewegungsbereich in der Regel mindestens 10° unter dem intraoperativen Ausmaß liegt [49]. Der zu wählende Zugang hängt von der zugrunde liegenden Pathologie ab: Neben dem lateralen und medialen Zugang als Standardzugängen kann auch ein kombinierter oder ein Zugang aus vorherigen Operationen verwendet werden [49, 62]. Zur Gewährleistung eines guten operativen Ergebnisses sollte ein ausreichendes Release des dorsales und ventrales Weichteilgewebes sowie die Lockerung des lateralen Bandkomplexes zur Lösung von intraartikulären Adhäsionen durchgeführt werden [49]. Ossifikationen, Exophyten, Briden und Narben sollten möglichst vollständig entfernt werden [75]. Ein besonderes Augenmerk sollte außerdem auf den N. ulnaris gelegt werden, dessen Neurolyse und gegebenenfalls subkutane Verlagerung häufig angezeigt ist, um Dehnungsschäden bei einem

Flexionsgewinn von mehr als 30° zu vermeiden. Postoperativ sollte frühzeitig die physiotherapeutische Bewegung mit adäquater Analgesie erfolgen [49].

### **2.2.4.3. Arthroskopische Arthrolyse**

Ein arthroskopisches Vorgehen hat mehrere Vorteile gegenüber offenen Verfahren, wie beispielsweise verringerte Narbenbildung, weniger postoperative Schmerzen und die Möglichkeit einer schnelleren Rehabilitation [76, 77]. Das Indikationsspektrum der Arthroskopie ist breit, jedoch durch die Tatsache begrenzt, dass nur vom Ellenbogengelenk ausgehende und intraartikulär erreichbare Pathologien behandelt werden können [49]. So können intrinsische Pathologien wie Adhäsionen, Briden, Osteophyten oder freie Gelenkkörper sowie extrinsische Pathologien wie Kapsel- und Bandkontrakturen arthroskopisch behandelt werden [49, 75]. Zu den Nachteilen der arthroskopischen Versorgung zählen das Risiko von Nervenläsionen und die erhöhten technischen Anforderungen an den Operateur [77]. Die Kontraindikationen umfassen heterotope Ossifikationen, extraartikuläre Osteophyten, andere nicht intraartikuläre Ursachen, ein schweres Flexionsdefizit von über 100° sowie mangelnde arthroskopische Erfahrung des Operateurs [49, 78]. Insgesamt zeigt sich ein Trend zur Ausweitung der Indikationen für die arthroskopische Arthrolyse [75].

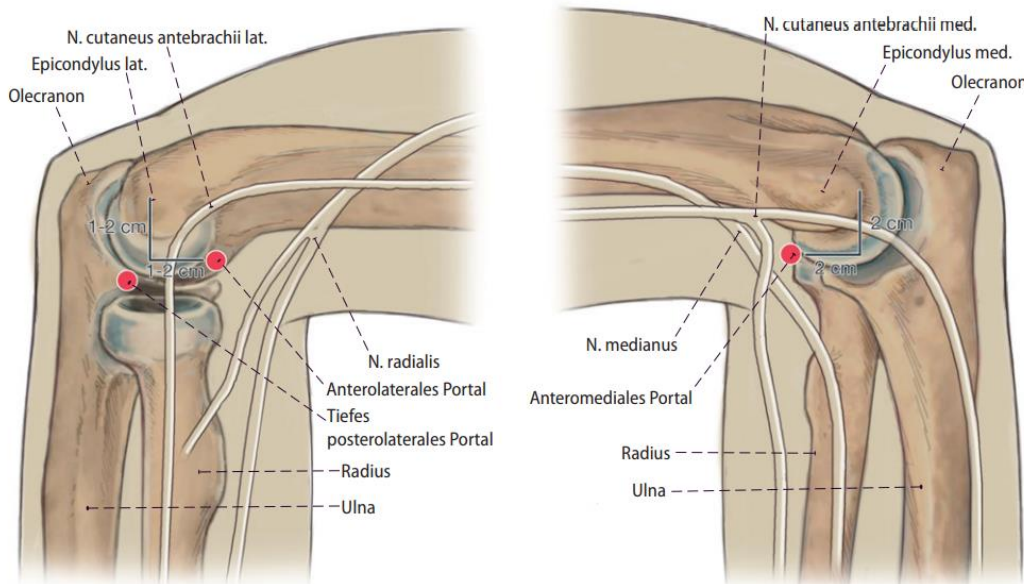
Bei der operativen Versorgung wird häufig eine Blutsperre mit einem Druck bis maximal 250 mmHg verwendet [49]. Vor Beginn der Arthroskopie wird der Abstand zwischen Humerus und neurovaskulären Strukturen im Ellenbogengelenk durch Infiltration von 20 – 30 ml Ringer- oder Kochsalzlösung zwischen Radiusköpfchen, Olecranon und Epicondylus lateralis – dem sog. „Soft Spot“ – vergrößert [79]. Das intraartikuläre Volumen kann bei Ellenbogensteife jedoch deutlich reduziert sein [9], was das Risiko von Nerven- und Gefäßschäden erhöhen kann [75].

Die Arthroskopie beginnt im anterioren Gelenkkompartiment. Hierfür werden das anteromediale und das anterolaterale Arthroskopieportal genutzt (*Abbildung 8*) [80]:

- Das anterolaterale Portal liegt 1 – 2 cm distal und 1 – 2 cm anterior des lateralen Epicondylus [81]. Beim Eingehen ins Gelenk wird der Trokar in Richtung des medialen Epicondylus eingeführt und perforiert dabei den M. extensor carpi radialis brevis und den M. supinator [79]. Der N. radialis und der N. cutaneus antebrachialis posterior gelten als gefährdet bei der Portalanlage [81].
- Die Anlage des anteromedialen Portals erfolgt 2 cm distal und 2 cm anterior des medialen Epicondylus in der Outside-in- oder in der Inside-out-Technik [79].

Gefährdet bei der Portalanlage sind der N. cutaneus antebrachii medialis, N. medianus, N. ulnaris sowie die A. brachialis [81]. Als Kontraindikation für dieses Portal gilt die Transposition bzw. ventrale Subluxation des N. ulnaris [75].

- Im Bereich des „Soft Spots“ wird außerdem das tiefe posterolaterale Portal für den Flüssigkeitszulauf angelegt [81].

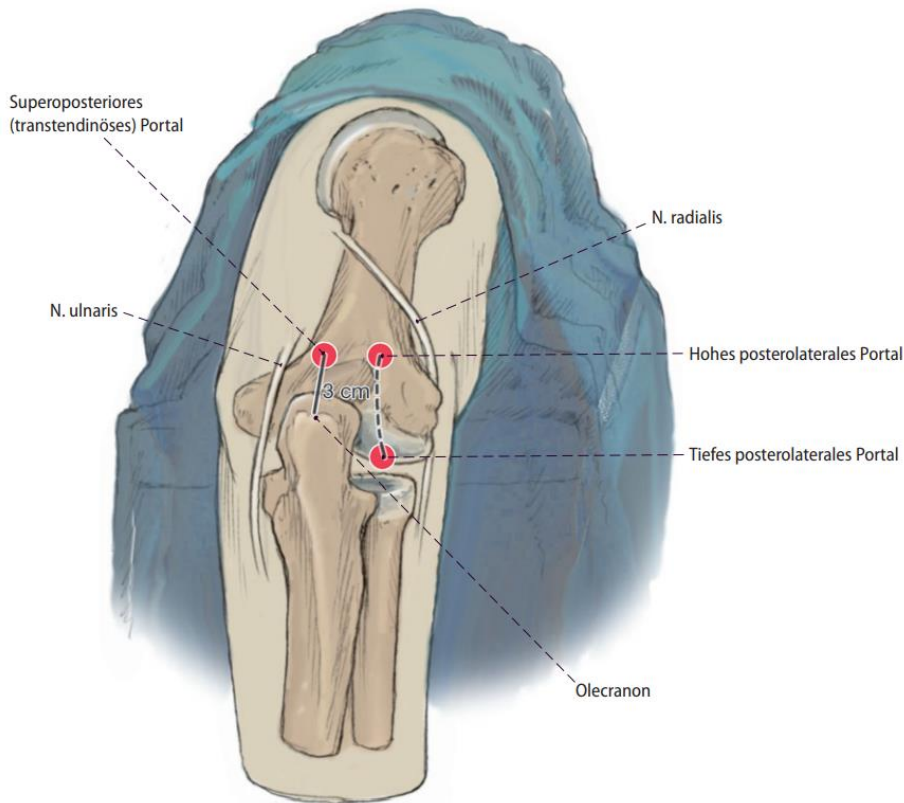


**Abbildung 8:** Lokalisation des anteromedialen, anterolateralen und tiefen posterolateralen Portals in Korrelation zur ossären und neurologischen Anatomie (Plath J, Wilken F, Lenich A, Vogt S, Lagerung, Arthroskopieportale, arthroskopische Diagnostik, in Atlas sportorthopädisch-sporttraumatologische Operationen, 2017, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 154-159.)

Für die Arthroskopie im dorsalen Gelenkanteil werden zusätzlich das hohe posterolaterale und superoposteriore Portal benötigt (*Abbildung 9*):

- Das hohe posterolaterale Portal befindet sich 3 cm proximal der Olecranonspitze lateral der Trizepssehne [79]. Die Einführriechung ist in Richtung des Zentrums der Fossa olecrani [81].
- Das superoposteriore bzw. transtendinöse Portal wird 3 cm proximal der Olecranonspitze zentral durch die Trizepssehne angelegt [81].





**Abbildung 9:** Lokalisation des hohen posterolateralen sowie superoposterioren Portals (Plath J, Wilken F, Lenich A, Vogt S, Lagerung, Arthroskopieportale, arthroskopische Diagnostik, in Atlas sportorthopädisch-sporttraumatologische Operationen, 2017, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 154-159.)

Sowohl im anterioren als auch im dorsalen Gelenkkompartiment können zunächst Adhäsionen durch auffächernde Bewegungen mit dem Trokar vorsichtig gelöst werden [80]. Freie Gelenkkörper, Narbengewebe oder eine prominente Plica radialis dorsalis können mit einem Shaver, Narbenstränge mit dem Elektromesser und Osteophyten mit einer Fräse oder einem Meißel entfernt werden [75, 80]. Im Anschluss folgt das Release der dorsalen und ventralen Kapsel. Der N. ulnaris im medialseitigem dorsalen Kompartiment und der direkt der lateralen ventralen Kapsel im anterioren Kompartiment anliegende N. radialis sind bei diesem Schritt besonders gefährdet [80]. Vor dem Ende der Operation wird das Gelenk unter arthroskopischer Ansicht durchbewegt, um übrig gebliebene Adhäsionen zu mobilisieren und das Ergebnis der Operation zu überprüfen [75].

#### **2.2.4.4. Weitere operative Maßnahmen**

Zu den weiteren möglichen operativen Optionen zählen die Endoprothetik, Resektions-Interpositions-Arthroplastik und die Arthrodese.

Ellenbogenprothesen stellen eine Behandlungsoption für Ellenbogensteifen arthrotischer oder posttraumatischer Genese dar, die jedoch aufgrund der häufig frühzeitigen Prothesenlockerung vor allem älteren Patienten vorbehalten ist [75]. Die Interpositionsarthroplastik mit Fascia lata oder Dermis kann bei jüngeren Patienten zur Anwendung kommen und gegebenenfalls mit Bewegungsfixatoren kombiniert werden [75, 82, 83]. Aufgrund von Instabilität und fortschreitender Knochenresorption sind die Langzeitergebnisse jedoch häufig wenig zufriedenstellend [75]. Eine letzte operative Option stellt die Arthrodesen dar. Sie kann bei chronischen Infektionen, anhaltenden Schmerzen und nach einer fehlgeschlagenen Prothesenversorgung indiziert sein, geht jedoch mit einer erheblichen Funktionsstörung einher [75].

#### **2.2.4.5. Komplikationen der operativen Versorgung**

Eine der häufigsten Komplikationen aller operativer Arthrolysen ist ein postoperativer Bewegungsverlust verglichen mit der intraoperativen Beweglichkeit [77]. In 36 % der Fälle wird ein postoperativer Bewegungsverlust beschrieben und 8,5 % bis 26 % der Rezidivsteifen erfordern eine operative Revision [77, 84]. Zu den weiteren möglichen Komplikationen zählen Frakturen, Kompartmentsyndrom, Infektionen und Bandverletzungen mit Ellenbogeninstabilität [80]. Eine spezielle Komplikation der arthroskopischen Behandlung sind außerdem Synovialfisteln an der arthroskopischen Portalstelle [77].

Besondere Beachtung gebührt jedoch der Verletzung von neurovaskulären Strukturen, da insbesondere permanente Nervenschädigungen schwerwiegende Auswirkungen auf das tägliche Leben des Patienten haben können [85]. Während die Position des N. ulnaris aufgrund seines Verlaufs im Kubitaltunnel intraoperativ häufig leichter zu ermitteln ist, gestaltet sich die Lokalisierung der Nn. radialis und medianus vergleichsweise schwieriger. Läsionen des N. ulnaris werden insbesondere häufig als Komplikation der offenen Arthrolyse beschrieben [49]. Daher wird eine prophylaktische Neurolyse und gegebenenfalls subkutane Verlagerung empfohlen, wenn die Bewegung um 90° – 100° eingeschränkt ist oder ein Funktionsgewinn von 30° – 40° erwartet wird [86]. Das Risiko einer iatrogenen N. ulnaris-Verletzung ist insbesondere bei schweren Flexionskontrakturen erhöht, sodass in diesen Fällen die Neurolyse bzw. Ventralverlagerung empfohlen wird [75]. Dies kann allerdings bei späteren operativen Eingriffen die intraoperative Lokalisierung des Nervs erschweren.

Blonna et al. betonen allerdings die Bedeutung der intraoperativen Lagekenntnis der nervalen Strukturen, um Nervenschäden während der Ellenbogenarthroskopie zu vermeiden, und empfehlen diese bei Bedarf offen oder arthroskopisch darzustellen [87]. Aufgrund des geringen Abstandes des N. radialis zum anterolateralen Portal und des N. medianus zum anteromedialen Portal besteht bereits bei der Portalanlage das Risiko iatrogenen Nervenverletzungen [70]. Sowohl transiente als auch dauerhafte Nervenschäden werden beschrieben [87, 89, 91-93]. Neben Kompressions- und Dehnungsverletzungen sowie Inzisionsverletzungen durch die Portalanlage werden Verletzungen durch Operationsinstrumentarien wie Shaver als häufige Ursachen iatrogenen Nervenverletzungen beschrieben [8, 91, 94].

### **2.3 Fragestellungen und Ziel der Arbeit**

Insbesondere die Lagebeziehungen der Nn. radialis und medianus in Bezug auf die arthroskopischen Portale ist als Gegenstand früherer Studien bereits ausführlich beschrieben [95-99]. Studien von Miller et al. [100] und Omid et al. [38] untersuchten bereits die Abstände zwischen knöchernen und neurologischen Strukturen. Aufgrund der gewählten Untersuchungsmethode mit makroskopischen Messungen können Messungengenauigkeiten jedoch nicht ausgeschlossen werden. Eine Studie in unserer eigenen Arbeitsgruppe untersuchte anhand radiologischer Messungen die Abstände zwischen den Nn. radialis und medianus und den knöchernen Landmarken [101]. Dreidimensionale bildgestützte Vermessungen, welche den Einfluss der Gelenksufflation und der Ellenbogenpositionierung auf den Abstand zwischen den Nn. radialis und medianus und den knöchernen Strukturen untersuchen, lagen bisher jedoch nicht vor.

Das Ziel dieser Studie war es, die Beziehung der Nn. radialis und medianus zu den knöchernen Landmarken des Ellenbogens in Abhängigkeit von Ellenbogenpositionierung und Gelenksufflation unter Zuhilfenahme von dreidimensionaler Bildgebung zu analysieren.

Unsere Hypothesen lauteten, dass

1. sich die Positionen der Nn. radialis und medianus in Abhängigkeit der Ellenbogenpositionierung verändern und
2. dass Gelenksufflation den Abstand der Nerven zu knöchernen Landmarken erhöht.

### **3. Material und Methoden**

#### **3.1 Versuchsanstalt und Präparate**

Die Ethikkommission der medizinischen Fakultät der Universität zu Köln stimmte der Durchführung der Untersuchungen vor Studienbeginn zu (Antragsnummer 13-219).

Alle Versuchsschritte wurden in den Räumlichkeiten der Universität zu Köln durchgeführt: Die Präparation der Leichenpräparate erfolgte im Biomechanik-Labor des Schwerpunktes für Unfallchirurgie im Zentrum Anatomie der Uniklinik Köln, die anschließende Erstellung der radiologischen Aufnahmen in den Operationssälen und die radiologische Vermessung an den Computern der Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie.

Elf humane Ellenbogen-Frischleichenpräparate von elf Körperspendern wurden für die Untersuchung genutzt. Eine rechte (9 %) und zehn linke (91 %) Extremitäten von sieben weiblichen (64 %) und vier männlichen (36 %) Körperspendern lagen vor. Das Alter der Körperspender zum Todeszeitpunkt lag bei durchschnittlich 86 Jahren (74 – 95 Jahre). Die Lagerung erfolgte bei -20°C.

#### **3.2 Verwendete Gerätschaft und Software**

Für die Erstellung der dreidimensionalen Röntgenbilder wurde das C-Bogen-System ARCADIS Orbic 3D (Siemens HealthCare Diagnostics GmbH, Eschborn, Deutschland) genutzt. Aufgrund seines isozentrischen Designs und 190° Orbitalauslenkung können mit einem automatisierten Umlauf Röntgenbilder aus unterschiedlichen Winkeln erstellt werden. Die Aufnahmegeschwindigkeit beträgt 100 Bilder in 1024 x 1024 Auflösung pro Minute. Mit der auf dem ARCADIS Orbic 3D installierten Software NaviLink 3D (Siemens HealthCare Diagnostics GmbH, Eschborn, Deutschland) können aus diesen Röntgenbildern dreidimensionale Daten gewonnen werden.

Die Vermessungen erfolgte mit dem Bilddatenmanagementsystem IMPAX EE (Agfa HealthCare GmbH, Bonn, Deutschland). Dieses Programm ermöglicht die Betrachtung und Befundung von radiologischem Bildmaterial sowie deren multiplanare Rekonstruktion.

### 3.3 Versuchsablauf

#### 3.3.1 Bereitstellung und Untersuchung der Leichenpräparate

Unmittelbar vor der Präparation wurden die Leichenpräparate bei Zimmertemperatur aufgetaut. Anschließend erfolgte eine klinische und radiologische Untersuchung mittels Röntgenbildgebung in zwei standardisierten Ebenen (anterior-posteriore und laterale Projektionen) zum Ausschluss anatomischer Anomalien wie Knochendeformationen. Mittels klinischer Untersuchung wurde eine eingeschränkte Beweglichkeit der Leichenpräparate ausgeschlossen. Bei einer Beweglichkeit im Ellenbogengelenk von weniger als Extension/Flexion 0/0/135° bzw. Pronation/Supination 80/0/80° wurden die Präparate für die Vermessung ausgeschlossen. Bei allen Präparaten waren die vollständige Extension und Flexion, sowie eine Pro- und Supination von mindestens 80° möglich. Relevante anatomische Anomalien wurden bei keinem der Leichenpräparate festgestellt.

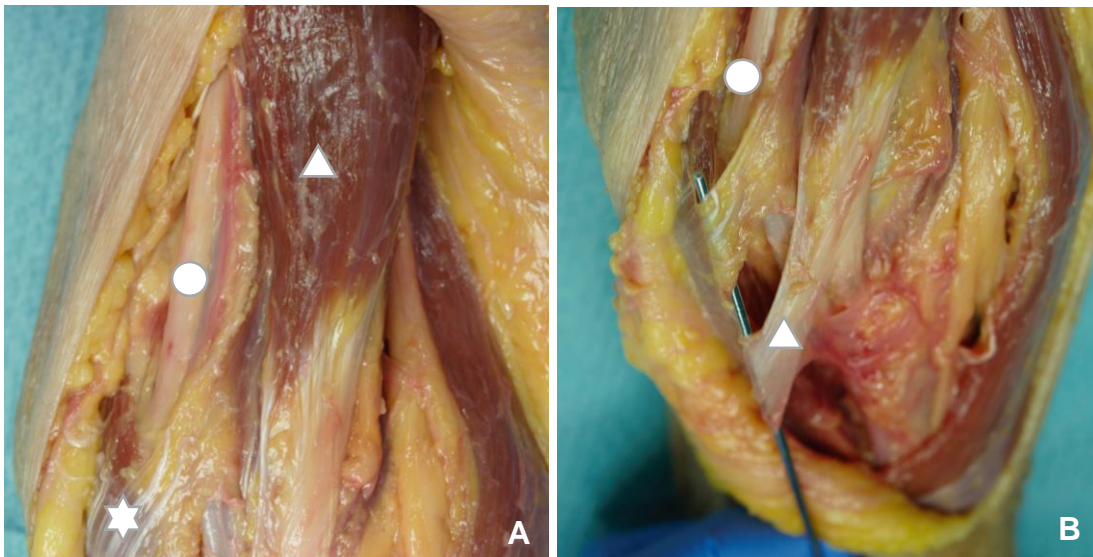
#### 3.3.2 Präparation

Für die Präparation wurden die Präparate in Extension und Supination positioniert. Der Zugang erfolgte über einen ventralen Zugang nach Henry: 6 – 7 cm proximal der Gelenklinie beginnend wurden der Hautschnitt lateral des M. biceps brachii nach distal gezogen und knapp unterhalb der Gelenklinie nach medial geschwenkt, um 4 – 5 cm weiter distal zu enden (*Abbildung 10*) [102].



**Abbildung 10:** Zugang nach Henry (Kreis: Epicondylus humeri ulnaris; Dreieck: V. cephalica; Stern: Epicondylus humeri radialis.). (Wegmann K, Burkhart KJ, Müller LP. Offene Zugänge, in Expertise Ellenbogen. 2016, Thieme Verlag. S. 73-93.)

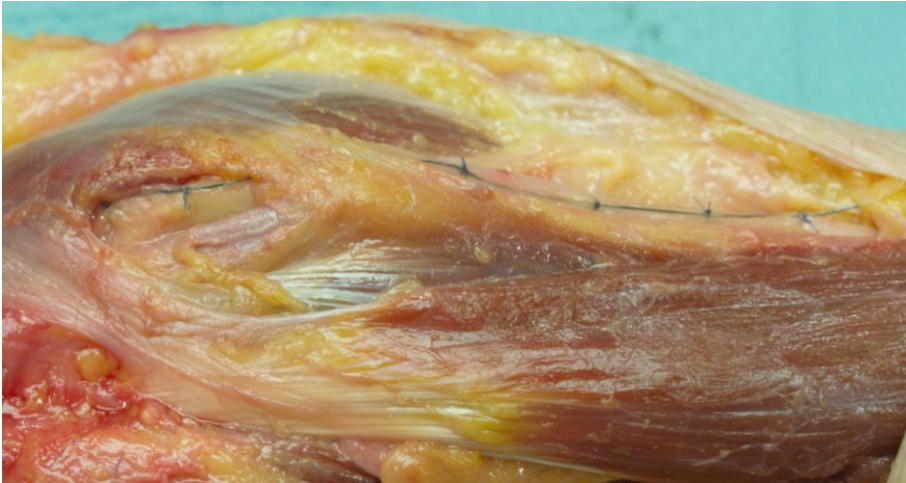
Zunächst wurde das subkutane Fett- und Bindegewebe vorsichtig abgelöst, um die Mm. biceps brachii, brachialis und brachioradialis darzustellen. Im Anschluss wurde der N. medianus im Sulcus bicipitalis medialis aufgesucht und bis zur Ellenbeuge verfolgt, ohne dabei die Gefäß-Nerven-Straße aus A. brachialis, N. medianus, N. ulnaris und Vv. brachialis zu mobilisieren (*Abbildung 11A*). Um eine Mobilisierung des N. medianus zu vermeiden, wurde die Aponeurosis musculi bicipitis intakt gelassen (*Abbildung 11B*). Unter vorsichtiger Spaltung des Caput humerale m. pronator teres und des M. flexor digitorum superficiales wurde der Nerv in seinem Verlauf auf dem M. flexor digitorum profundus bis zur Mitte des Unterarms freigelegt.



**Abbildung 11:** Präparation des N. medianus. **(A)** Der N. medianus (Kreis) verläuft medial des M. biceps brachii (Dreieck) nach distal verfolgt, bis er zwischen den Köpfen des M. pronator teres (Stern) in die Tiefe zieht. **(B)** Die Aponeurosis musculi bicipitis (Dreieck) wurde bei der Präparation intakt gelassen (Kreis: N. medianus) (Wegmann K, Burkhart KJ, Müller LP. Offene Zugänge, in Expertise Ellenbogen. 2016, Thieme Verlag. S. 73-93.)

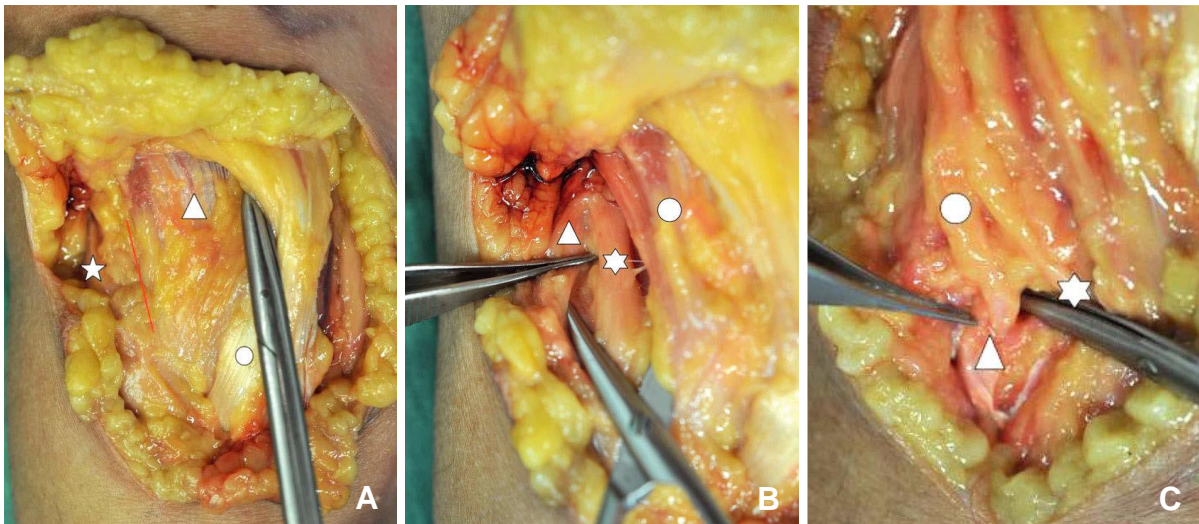
Zur Markierung des Nervs wurde nun ein röntgendichter Röntgenkontraststreifen einer 10 x 10 cm sterilen Kompresse mit einem Durchmesser von 0,3 mm jeweils auf der gelenkfernen Seite des Nervs platziert. Der Röntgenkontraststreifen wurde mittels Einzelkopfnähten (5/0 Prolene) in einem Abstand von etwa 2 cm fixiert und somit der anatomische Verlauf der Nerven markiert. Die physiologische Position des Nervs wurde durch die Präparation nicht verändert. Wurden stabilisierende Strukturen des Nervenverlaufes durch die Präparation geschwächt, erfolgte nach der Markierung mittels Röntgenkontraststreifen eine adaptierende, spannungsfreie Naht der Strukturen (*Abbildung 12*).





**Abbildung 12:** Der N. medianus wurde mittels röntgendichter Röntgenkontraststreifen markiert, welcher mittels Einzelkopfnähten in einem Abstand von etwa 2 cm auf dem Nerven fixiert wurde.

Zur Freilegung des N. radialis wurde die Fettgewebsstraße zwischen M. brachioradialis und M. brachialis aufgesucht (*Abbildung 13A*). Durch vorsichtiges Trennen der Muskeln wurde der N. radialis dargestellt und in seinem Verlauf lateral am M. brachialis unterhalb des M. brachioradialis bis zur Ellenbeuge verfolgt (*Abbildung 13B*). Hier wurde der Nerv bis zu seiner Aufteilung in die Rr. profundus et superficialis sowie der Einzug des R. profundus in die Frohse-Arkade zwischen oberflächlichem und tiefem Anteil des M. supinator dargestellt (*Abbildung 13C*).



**Abbildung 13:** Präparation des N. radialis [102]. **(A)** Aufsuchen der Fettgewebsstraße (rote Linie) zwischen dem unterhalb der M. biceps brachii (Kreis) gelegenen M. brachialis (Dreieck) und dem M. brachioradialis (Stern). **(B)** Darstellung des N. radialis (Stern) zwischen M. brachioradialis (Dreieck) und M. radialis (Kreis). **(C)** Aufteilung des N. radialis in den R. superficialis (Stern) und den R. profundus (Kreis), welcher in der Frohse-Arkade des M. supinator (Dreieck) nach distal zieht. (Wegmann K, Burkhart KJ, Müller LP. Offene Zugänge, in Expertise Ellenbogen. 2016, Thieme Verlag. S. 73-93.)

Äquivalent zum N. medianus wurde der N. radialis mittels eines 0,3 mm messenden Röntgenkontraststreifen einer sterilen Kompressen auf der gelenkfernen Seite des

Nerv markiert und dieser mittels Einzelkopfnähten fixiert, ohne die physiologische Position des Nervens zu verändern. Anschließend wurden die Hautschnitte ebenfalls mit Einzelkopfnähten wieder verschlossen.

### 3.3.3 Bildgebung

Um den Einfluss der Ellenbogenpositionierung in Extension und 90° Flexion sowie der Gelenksufflation zu bestimmen, wurden pro Präparate fünf radiologische Datensätze erhoben. Hierfür wurde der ARCADIS Orbic 3D (Siemens HealthCare Diagnostics GmbH, Eschborn, Deutschland) genutzt (siehe Abschnitt 3.2). *Tabelle 6* liefert einen Überblick. Das Gerät rotiert mit seinem C-Bogen um das abzubildende Objekt und erfasst dabei 100 Bilder pro Minute. Hierdurch entsteht ein 3-dimensionaler Datensatz, aus dem präzise und hochauflösende Rekonstruktionen in der Sagittal-, Frontal- und Transversal-Achse erstellt werden können.

	Ellenbogenposition		Gelenksufflation
	Extension / Flexion	Pronation / Supination	
<b>I</b>	Extension	Neutralstellung	Keine
<b>II</b>	90° Flexion	Neutralstellung	Keine
<b>III</b>	90° Flexion	Pronation	Keine
<b>IV</b>	90° Flexion	Supination	Keine
<b>V</b>	90° Flexion	Neutralstellung	20 ml

*Tabelle 6:* Übersicht der erhobenen Datensätze.

Zunächst wurde ein Datensatz mit den Ellenbogenpräparaten in Neutralstellung und in voller Extension auf einem Tisch liegend erhoben (Datensatz I). Die Messung erfolgte ohne Gelenksufflation.

Im Anschluss wurden die Präparate in 90° Ellenbogenflexion unter Zuhilfenahme einer speziellen Haltevorrichtung positioniert. Hierfür wurden die Weichteile zunächst vorsichtig vom proximalen Humerus entfernt, ohne dabei die Nerven aus ihrem natürlichen Verlauf zu verdrängen. Anschließend wurden zwei Bohrungen 18 und 20 cm proximal der Olecranonspitze am proximalen Humerus durchgeführt und die Präparate dort mittels zweier Schrauben an einem Holzstiel fixiert. Der Holzstiel und somit der Humerusschaft wurden parallel zum Boden ausgerichtet befestigt, sodass der am distalen Humerus fixierte, horizontal ausgerichtete dorsale Oberarm sowie die



Olecranonspitze nach deckenwärts zeigten und die Hand zum Boden herabhing (Abbildung 14). Das Ellenbogengelenk war so in allen Richtungen freibeweglich gelagert und in 90° Flexion gebeugt, wobei die Fingerspitzen Richtung Boden zeigten. Die Fixierung der Präparate entsprach somit der Positionierung der oberen Extremität bei der Ellenbogenarthroskopie in Bauch- oder Seitenlagerung. In dieser Stellung wurde ein weiterer Datensatz erhoben (Datensatz II)



**Abbildung 14:** Positionierung der Ellenbogenpräparate entsprechend der intraoperativen Ellenbogenposition während der Ellenbogenarthroskopie mit Patienten in Bauch- oder Seitenlage. (Hackl M, Lappen S, Burkhart KJ, Leschinger T, Scaal M, Müller LP, Wegmann K. Elbow Positioning and Joint Insufflation Substantially Influence Median and Radial Nerve Locations. Clin Orthop Relat Res. 2015 Nov;473(11):3627-34).

Für die nächsten zwei Datensätze wurden die Präparate in Pronation bzw. Supination positioniert, um den Einfluss der Unterarmrotation zu erheben. Hierfür wurden die Präparate zunächst in eine Pronationsstellung des Unterarms gebracht und diese mit einem Seil fixiert, welches mit dem einem Ende um das Handgelenk des Präparates gebunden und mit seinem anderen Ende an der Haltevorrichtung befestigt wurde. Hierbei wurde darauf geachtet, dass eine Pronation von exakt 80° erreicht wurde und die 90° Flexionsstellung des Ellenbogengelenkes nicht verändert wurde. Nach der Erhebung eines Datensatzes in dieser Position (Datensatz III) wurden die Präparate in einer Supinationsstellung von exakt 80° positioniert und so äquivalent zur Fixierung in Pronation befestigt. Erneut wurde darauf geachtet, dass es zu keiner Veränderung der Flexionsstellung im Ellenbogengelenk kam. In dieser Supinationsstellung des Unterarms bei 90° Ellenbogenflexion wurde ein Datensatz erhoben (Datensatz IV).

Im Anschluss wurden die Präparate wieder in Neutralstellung wie beim Datensatz II positioniert und exakt 20 ml Kochsalzlösung über den „Soft Spot“ zwischen Radiuskopf, Olecranon und Epicondylus lateralis [79] in das Ellenbogengelenk injiziert, um den

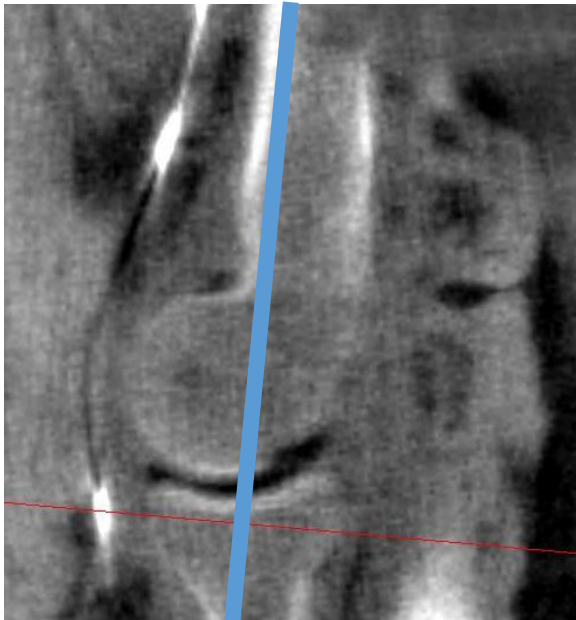
Effekt von Gelenksufflation zu eruieren. Typischerweise zeigten die Präparate ab 15 ml Injektionsflüssigkeit eine geringe Streckbewegung, was physiologisch ist und der Anspannung der Kapsel Rechnung trägt. Bei sämtlichen Präparaten war eine Injektion von 20 ml Kochsalzlösung möglich. Es lagen somit keine Kapsel-verengenden Pathologien vor. Mit Gelenksufflation wurden erneut Datensätze erstellt (Datensatz III).

### 3.3.4 Digitale Messungen

Nach Abschluss der Dokumentation wurden die Aufnahmen in die Vermessungssoftware IMPAX EE (Agfa HealthCare GmbH, Bonn, Deutschland) übertragen. Um in der Lage zu sein, die digitale Messung anhand standardisierter Bildebenen durchführen zu können, wurden axiale, sagittale und koronare Achsen als Ausführungsebenen definiert. Alle Messungen wurden von drei verblindeten Beobachtern durchgeführt und erfolgten für alle der erhobenen Datensätze (siehe *Tabelle 6*).

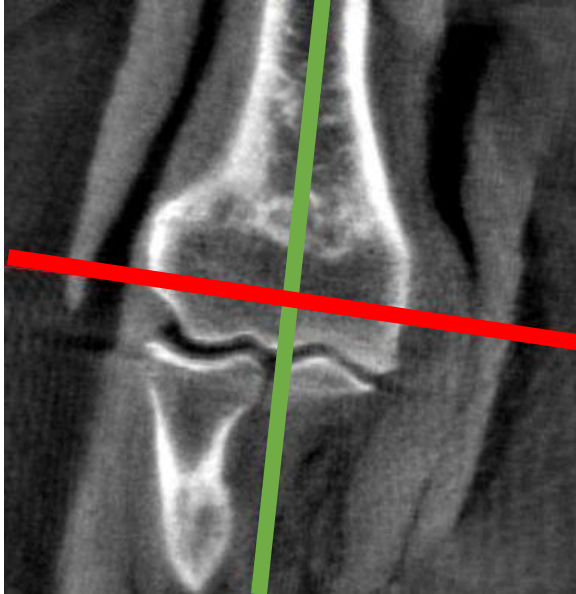
#### 3.3.4.1 Axiale Vermessungen

Für die erste Messung wurde im sagittalen Bild die Koronarachse parallel zur ventralen Humerusschaftkontur, der sog. „Rogers Linie“, ausgerichtet (*Abbildung 15*).



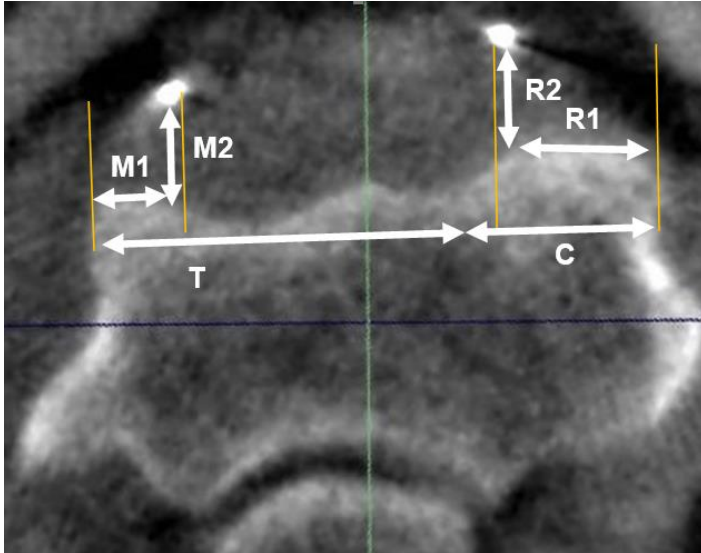
**Abbildung 15:** Ausrichtung der Koronarachse (blaue Linie) parallel zur ventralen Humerusschaftkontur im sagittalen Bild

Im koronaren Bild erfolgte nun die Ausrichtung der Sagittalachse an der Längsachse des Humerusschaftes. Die Axialebene wurde parallel zum humeroradialen Gelenkspalt ausgerichtet und auf Höhe der Transkondylarlinie eingestellt (*Abbildung 16*).



**Abbildung 16:** Ausrichtung der Sagittalachse (grüne Linie) an der Längsachse des Humerusschaftes und der Axialachse (rote Linie) parallel zum humeroradialen Gelenkspalt im koronaren Bild.

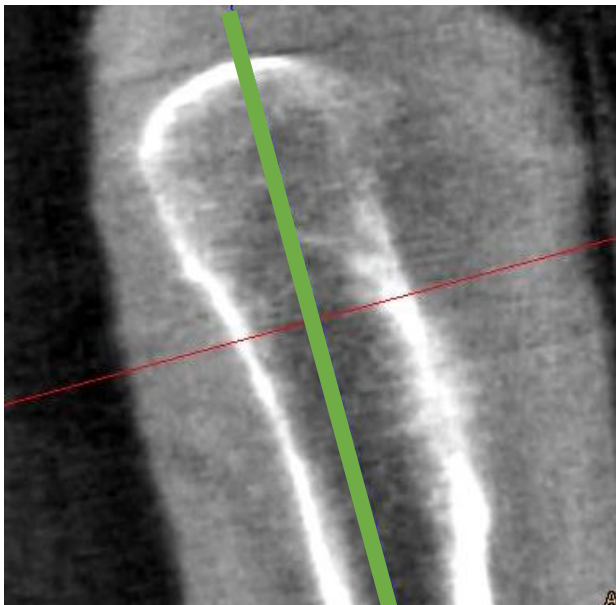
In der Axialebene (*Abbildung 17*) wurde nun zunächst die Länge des Capitulum humeri (C) und der Trochlea humeri vermessen (T). Die Länge des Condylus humeri wurde durch die Addition der Längen des Capitulum humeri und der Trochlea humeri ermittelt. Es wurden je eine Senkrechte zur Transkondylarlinie an der lateralen und der medialen Grenze der Humeruskondylen sowie durch die Markierungen des N. medianus und des N. radialis gezogen. Basierend auf diesen Linien wurden die Abstände des N. medianus zur medialen Grenze des Condylus humeri medialis (M1) und zur Trochlea humeri (M2) sowie des N. radialis zur lateralen Grenze des Condylus humeri lateralis (R1) und zum Capitulum humeri (R2) gemessen.



**Abbildung 17:** Vermessung in der Axialebene (C: Weite des Capitulum humeri; T: Weite der Trochlea humeri; R1: Abstand zwischen lateraler Grenze des Condylus humeri lateralis und dem N. radialis; R2: Abstand des N. radialis zum Capitulum humeri; M1: Abstand des N. medianus zur medialen Grenze des Condylus medialis; M2: Abstand des N. medianus zur Trochlea humeri; Gelbe Linien: Senkrechten zur Transkondylarlinie durch die mediale bzw. laterale Grenze der Kondylen sowie durch den N. medianus bzw. radialis).

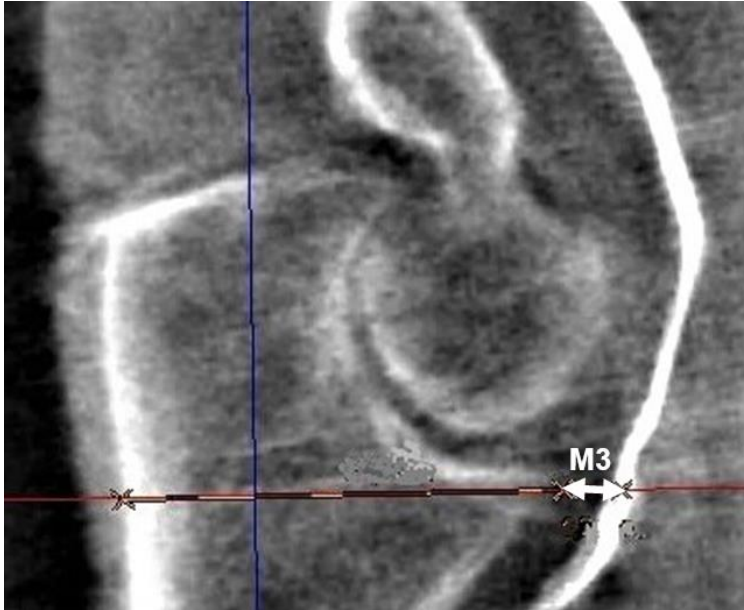
### 3.3.4.2 Sagittale Vermessungen: ulnar

In der koronaren Bildebene wurde nun die Sagittalachse an der zentralen Längsachse des Ulnaschaftes ausgerichtet (*Abbildung 18*).



**Abbildung 18:** Ausrichtung der Sagittalachse (grüne Linie) am zentralen Ulnaschaft im koronaren Bild

Nun wurde in der Sagittalebene der Abstand der Koronoidspitze zum N. medianus (M3) gemessen (*Abbildung 19*).



**Abbildung 19:** Vermessung in der Sagittalebene mit Ausrichtung auf die Ulna (M3: Abstand zwischen Koronoidspitze und N. medianus).

### 3.3.4.3 Sagittale Vermessungen: radial

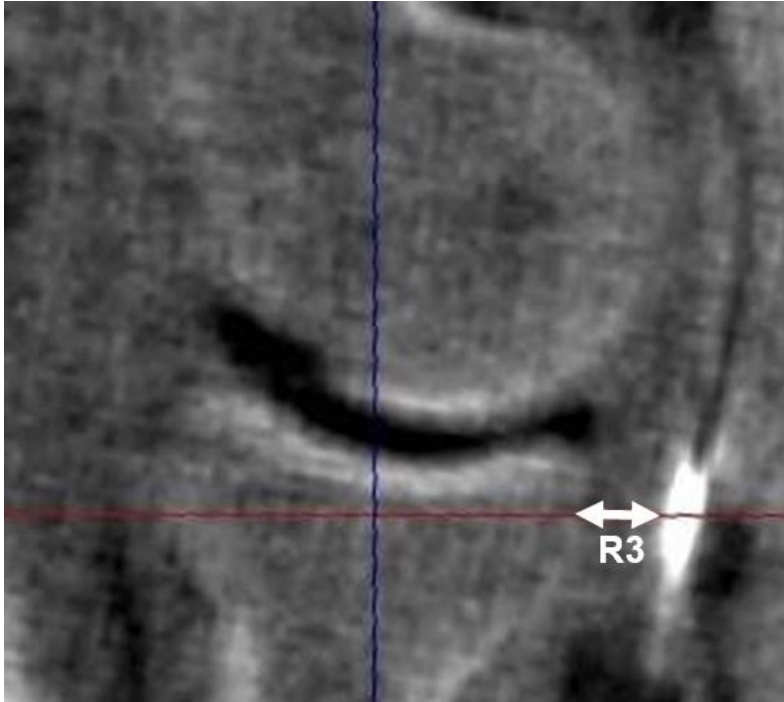
In der koronaren Bildebene wurde nun die Sagittalachse an der Längsachse des Radiuschaftes ausgerichtet (*Abbildung 20*).



**Abbildung 20:** Ausrichtung der Sagittalachse (grüne Linie) an der Längsachse des Radiuschaftes im koronaren Bild

Im Anschluss wurde in der Sagittalebene der Abstand der ventralen Kante des Radiuskopfes zum N. radialis (R3) vermessen (*Abbildung 21*).





**Abbildung 21:** Vermessung in der Sagittalebene mit Ausrichtung auf den Radiuskopf R3: Abstand zwischen ventraler Kante des Radiuskopfes N. radialis).

### 3.4 Statistik

Für alle Messwerte wurden Mittelwert, Minimum, Maximum und die Standardabweichung bestimmt. Zur Bestimmung der Interrater-Reliabilität wurde der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (IKK) bestimmt.

Um Unterschiede hinsichtlich der Größe der Proben auszugleichen, wurden die prozentualen Werte der Abstände zwischen N. medianus und der medialen Grenze des Condylus humeri medialis (M1) zur Länge der Trochlea humeri (T) sowie zwischen N. radialis und der lateralen Grenze des Condylus humeri lateralis (R1) zur Länge des Capitulum humeri (C) berechnet. Der Pearson-Korrelationskoeffizient ( $r$ ) wurde zur Bestimmung der Korrelation verwendet.

Um den Einfluss der Ellenbogenposition, Unterarmrotation und Gelenksufflation zu ermitteln, wurde die mittlere Differenz der gemessenen Werte in 90° Flexion und Neutralstellung (Datensatz II) mit denen in Ellenbogenextension (Datensatz I), Unterarmpronation (Datensatz III) und -supination (Datensatz IV) sowie mit Gelenksufflation (Datensatz V) berechnet. Ebenfalls wurden für diese Werte das 95%-Konfidenzintervall bestimmt.

Für die Bestimmung der Signifikanzen wurde eine einfache Varianzanalyse mit einem Post-hoc-Scheffé-Test durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde mit 5% (0,05) festgesetzt.

## 4. Ergebnisse

Die Intraklassen-Korrelationskoeffizient (IKK) für die gemessenen Werte lag im Bereich von 0,93 bis 0,99 mit einem Durchschnittswert von 0,95.

### 4.1 Knöcherne Anatomie

Die durchschnittliche Länge des Condylus humeri betrug  $42,6 \pm 4,0$  mm (36,8 – 49,0 mm). Die Breite des Capitulum humeri betrug im Durchschnitt  $16,1 \pm 1,4$  mm (14,0 – 18,9 mm) und machte durchschnittlich 37,8 % des Condylus humeri aus. Die Breite der Trochlea humeri betrug im Mittel  $26,6 \pm 3,6$  mm (22,0 – 32,2 mm), was 62,2 % des Condylus humeri ausmachte. *Tabelle 7* fasst die Ergebnisse der knöchernen Anatomie zusammen.

	Mittelwert (%)	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>TC</b>		42,6	$\pm 4,0$	36,8	49,0
<b>C</b>	37,8	16,1	$\pm 1,4$	14,0	18,9
<b>T</b>	62,2	26,6	$\pm 3,6$	22,0	32,2

*Tabelle 7:* Länge des Condylus humeri (TC), des Capitulum humeri (C) und der Trochlea humeri (T) in mm sowie der prozentuelle Anteil des Capitulum humeri und der Trochlea humeri am Condylus humeri.

Die Breite der Gelenkfläche korrelierte stark bei einem Pearson-Korrelationskoeffizient von  $r = 0,62$  mit dem anterioren Abstand der Nerven zu den knöchernen Landmarken (95%-Konfidenzintervall: 0,49 – 0,83;  $p = 0,02$ ).

### 4.2 Einfluss der Ellenbogenpositionierung

Die Flexion im Ellenbogengelenk führte zu Medialisierung der Nerven und zu einer Vergrößerung des Abstandes zu den knöchernen Landmarken. Mit Ausnahme des Abstandes des N. medianus zur medialen Grenze der Trochlea humeri (M1) waren alle Veränderungen statistisch signifikant.

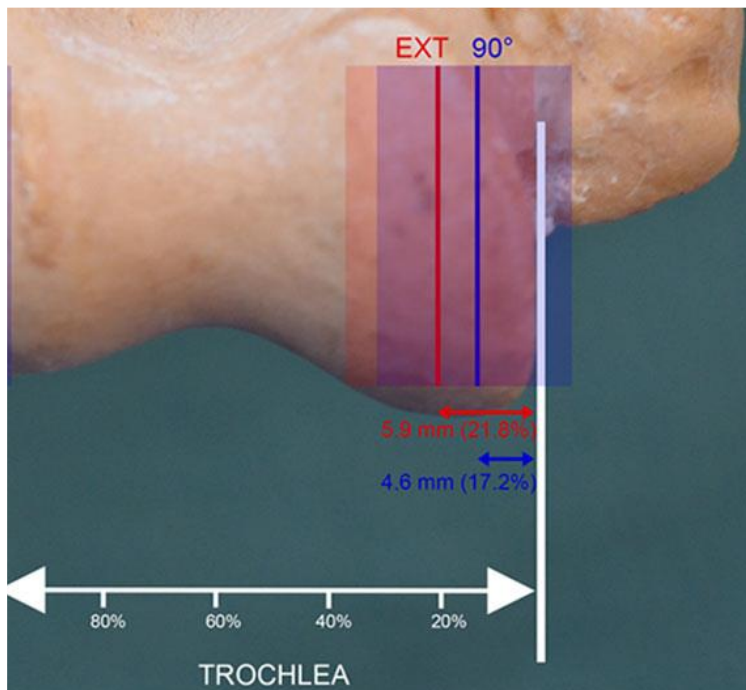
#### 4.2.1 Nervus medianus

Die Distanz des N. medianus zur medialen Grenze der Trochlea humeri (M1) betrug in Extension  $5,9 \pm 4,0$  mm (-2,3 – 10,4 mm) und in 90° Flexion  $4,6 \pm 3,7$  mm (-2,8 – 10,8 mm) (*Abbildung 22*). Die mittlere Differenz betrug 1,3 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von 0,7 – 1,8 mm. Prozentual ausgedrückt lag der N. medianus somit

in Extension 21,8 % der Trochlea-Breite und medialisierte in 90° Flexion auf 17,2 %. Die Distanzverminderung war jedoch nicht signifikant ( $p = 0,31$ ). *Tabelle 8* fasst die o.g. Ergebnisse zusammen.

	Mittelwert (%)	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Ext.</b>	21,8	5,9	$\pm 4,0$	-2,3	10,4
<b>Flex.</b>	17,2	4,6	$\pm 3,7$	-2,8	10,8

**Tabelle 8:** Abstand des N. medianus zur medialen Trochleagrenze (M1) in mm und prozentual zur Trochlealänge (Ext. = Extension, Flex. = Flexion, SD = Standardabweichung).



**Abbildung 22:** Position des N. medianus (Mittelwerte und Standardabweichungen) in Bezug auf die Trochlea humeri in Extension (EXT) und Flexion (90°) (Hackl M, Lappen S, Burkhart KJ, Leschinger T, Scaal M, Müller LP, Wegmann K. Elbow Positioning and Joint Insufflation Substantially Influence Median and Radial Nerve Locations. Clin Orthop Relat Res. 2015 Nov;473(11):3627-34).

Der Abstand zwischen dem N. medianus und dem ventralen Rand der Trochlea humeri (M2) betrug in Extension  $4,8 \pm 1,5$  mm (3 – 7,7 mm) und vergrößerte sich signifikant ( $p = <0,01$ ) in 90° Flexion auf  $8,4 \pm 2,44$  mm (4,3 – 11,5 mm). Diese Ergebnisse sind in *Tabelle 9* zusammengefasst. Die mittlere Differenz betrug 3,6 mm und das 95%-Konfidenzintervall 1,8 – 5,4 mm).



	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Ext.</b>	4,8	± 1,5	3,0	7,7
<b>Flex.</b>	8,4	± 2,4	4,2	11,5

**Tabelle 9:** Abstand zwischen N. medianus und dem ventralen Rand der Trochlea humeri (M2) in mm (Ext. = Extension, Flex. = Flexion, SD = Standardabweichung).

Eine ebenfalls signifikante ( $p = <0,01$ ) Distanzvergrößerung des N. medianus zur Koronoidspitze (M3) war zu beobachten. *Tabelle 10* fasst diese Ergebnisse zusammen: Der Abstand vergrößerte sich von  $5,4 \pm 1,3$  mm ( $3,1 - 7,3$  mm) in Extension zu  $9,1 \pm 2,3$  mm ( $5,9 - 13,8$  mm) in  $90^\circ$  Flexion. Die mittlere Differenz betrug  $3,7$  mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von  $2,0 - 5,4$  mm.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Ext.</b>	5,4	± 1,3	3,1	7,3
<b>Flex.</b>	9,1	± 2,3	5,9	13,8

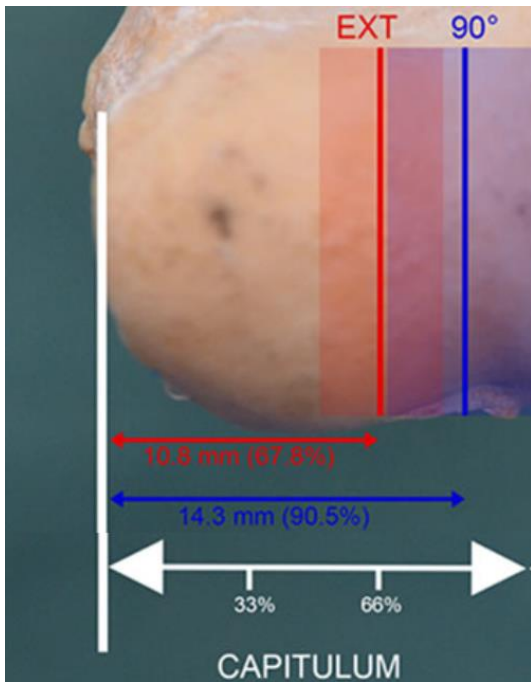
**Tabelle 10:** Abstand des N. medianus zum ventralen Rand der Trochlea humeri (M2) in mm (Ext. = Extension, Flex. = Flexion, SD = Standardabweichung).

#### 4.2.2 Nervus radialis

Die Distanz zwischen N. radialis und der lateralen Grenze des Capitulum humeri (R1) nahm von  $10,8 \pm 2,5$  mm ( $7,6 - 15,2$  mm) in Extension zu  $14,4 \pm 3,7$  mm ( $9 - 20,8$  mm) in Flexion zu (*Abbildung 23*). Die mittlere Differenz betrug  $3,6$  mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von  $1,5 - 5,8$  mm. Bezogen auf die Breite des Capitulum humeri vergrößerte sich der Abstand signifikant von  $67,8$  % in Extension auf  $90,5$  % in  $90^\circ$  Flexion ( $p = 0,01$ ). *Tabelle 11* liefert eine Zusammenfassung o.g. Ergebnisse.

	Mittelwert (%)	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Ext.</b>	67,8	10,8	± 2,5	7,6	15,2
<b>Flex.</b>	90,5	14,4	± 3,7	9	20,8

**Tabelle 11:** Distanz zwischen N. radialis und der lateralen Grenze des Capitulum humeri (R1) in mm und prozentual zur Breite des Capitulum humeri (Ext. = Extension, Flex. = Flexion, SD = Standardabweichung).



**Abbildung 23:** Position des N. radialis (Mittelwerte und Standardabweichungen) in Bezug auf das Capitulum humeri in Extension (EXT) und Flexion (90°) (Hackl M, Lappen S, Burkhart KJ, Leschinger T, Scaal M, Müller LP, Wegmann K. Elbow Positioning and Joint Insufflation Substantially Influence Median and Radial Nerve Locations. Clin Orthop Relat Res. 2015 Nov;473(11):3627-34).

Die Distanz des N. radialis zur ventralen Kante des Capitulum humeri (R2) vergrößerte sich signifikant ( $p < 0,01$ ) von  $5,5 \pm 1,8$  mm (3,6 – 8,6 mm) in Extension auf  $10,8 \pm 3,2$  mm (5,3 – 16,0) mit Ellenbogenflexion. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 12* zusammengefasst. Die mittlere Differenz betrug 5,0 mm und das 95%-Konfidenzintervall 2,6 – 7,6 mm.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Ext.</b>	5,5	$\pm 1,8$	3,6	8,6
<b>Flex.</b>	10,8	$\pm 3,2$	5,3	16,0

**Tabelle 12:** Abstand des N. radialis zum ventralen Rand des Capitulum humeri (R2) in mm (Ext. = Extension, Flex. = Flexion, SD = Standardabweichung).

Der Abstand des Nervs zur anterioren Kante des Radiuskopfes (R3) vergrößerte sich von  $4,7 \pm 1,8$  mm (2,8 – 7,9 mm) bei extendierten Ellenbogen auf  $7,7 \pm 2,7$  mm (5,2 – 13,2 mm) mit Flexion. Die Veränderung war statistisch signifikant ( $p = 0,01$ ). Die mittlere Differenz betrug 3,0 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von 1,0 – 5,0 mm. *Tabelle 13* liefert eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Ext.</b>	4,7	± 1,8	2,8	7,9
<b>Flex.</b>	7,7	± 2,7	5,2	13,2

**Tabelle 13:** Abstand des N. radialis zur anterioren Kante des Radiuskopfes (R3) in mm (Ext. = Extension, Flex. = Flexion, SD = Standardabweichung).

### 4.3 Einfluss der Unterarmrotation

Keine der Messungen zeigte einen signifikanten Einfluss der Unterarmpronation auf die Lageverhältnisse des N. medianus oder N. radialis verglichen mit der Unterarmneutralstellung

#### 4.3.1 Nervus medianus

Der N. medianus lateralisierte nicht-signifikant durch die Unterarmpronation ( $p = 0,91$ ) von einem Abstand zur medialen Begrenzung der Trochlea humeri (M1) von  $4,6 \pm 3,7$  mm (-2,8 – 10,8 mm) bzw. 17,2% der Trochlea-Breite in 90° Flexion zu  $4,4 \pm 5,6$  mm (-2,3 – 12,2 mm) bzw. 16,2% der Trochlea-Breite. Die mittlere Differenz betrug 0,2 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von -1,9 – 2,4 mm.

Durch Unterarmsupination medialisierte der N. medianus auf einen Abstand von  $8,5 \pm 6,9$  mm (-2,5 – 21,7 mm) bzw. 31,6 % der Trochlea-Breite. Die mittlere Differenz betrug -3,9 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von -6,7 – 1,0 mm. Der Unterschied war jedoch ebenfalls nicht signifikant ( $p = 0,12$ ).

Die mittlere Differenz zwischen Pronation und Supination betrug 4,1 mm, das 95%-Konfidenzintervall 2,1 – 6,1 mm. Auch hier war keine Signifikanz zu sehen ( $p = 0,14$ ).

*Tabelle 14* fasst die o.g. Ergebnisse zusammen.

	Mittelwert (%)	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	17,2	4,6	± 3,7	-2,8	10,8
<b>Pro.</b>	16,2	4,4	± 5,6	-2,3	12,2
<b>Sup.</b>	31,6	8,5	± 6,9	-2,5	21,7

**Tabelle 14:** Abstand des N. medianus zur medialen Trochleagrenze (M1) in mm und prozentual zur Trochlealänge (Flex. = Flexion, Pro.: Pronation, SD = Standardabweichung).

Der Abstand zwischen N. medianus zur ventralen Kante der Trochlea humeri (M2) vergrößerte sich nicht-signifikant ( $p = 0,84$ ) durch Unterarmpronation von  $8,4 \pm 2,4$  mm

(4,2 – 11,5 mm) auf  $8,7 \pm 4,4$  (2,5 – 17,3 mm). Die mittlere Differenz betrug 0,3 mm und das 95%-Konfidenzintervall -1,5 – 2,1 mm.

Durch Unterarmsupination vergrößerte sich der Abstand auf  $8,6 \pm 4,0$  mm (4,3 – 16,2 mm). Die mittlere Differenz betrug 0,2 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von -1,8 – 2,2 mm. Auch hier war keine signifikante Differenz zu sehen ( $p = 0,89$ ).

Die mittlere Differenz zwischen Pronation und Supination betrug -0,1 mm und das 95%-Konfidenzintervall -1,9 – 1,7 mm. Die erhobenen Werte unterschieden sich nicht signifikant ( $p = 0,96$ ).

Die o.g. Ergebnisse werden in *Tabelle 15* zusammengefasst.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	8,4	$\pm 2,4$	4,2	11,5
<b>Pro.</b>	8,7	$\pm 4,4$	2,5	17,3
<b>Sup.</b>	8,6	$\pm 4,0$	4,3	16,2

*Tabelle 15:* Abstand des N. medianus zum ventralen Rand der Trochlea humeri (M2) in mm (Flex. = Flexion, Pro.: Pronation, SD = Standardabweichung).

Der Abstand zur Koronoidspitze (M3) zeigte ebenfalls eine nicht-signifikante Abstandsvergrößerung ( $p = 0,63$ ) von  $9,1 \pm 2,3$  mm (5,9 – 13,8 mm) auf  $9,4 \pm 5,8$  mm (3,7 – 23,8 mm) durch Pronation. Die mittlere Differenz betrug 0,3 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von -1,9 – 0,6 mm.

Durch Supination kam es zu einer nicht-signifikanten ( $p = 0,43$ ) Abstandverringern auf  $8,0 \pm 3,8$  mm (2,5 – 16,6 mm) mit einer mittleren Differenz von -1,1 mm und einem 95%-Konfidenzintervall von -2,2 – 0,0 mm.

Die mittlere Differenz zwischen Pronations- und Supinationsstellung betrug -1,3 mm mit einem 95%-Konfidenzintervall von -2,8 – 0,2 mm. Der Unterschied war ebenfalls nicht signifikant ( $p = 0,53$ ).

*Tabelle 16* liefert eine Zusammenfassung der o.g. Ergebnisse.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	9,1	$\pm 2,3$	5,9	13,8
<b>Pro.</b>	9,4	$\pm 5,8$	3,7	23,8
<b>Sup.</b>	8,0	$\pm 3,8$	2,5	16,6

*Tabelle 16:* Abstand des N. medianus zur Koronoidspitze (M3) in mm (Flex. = Flexion, Pro.: Pronation, SD = Standardabweichung).

### 4.3.2 Nervus radialis

Der N. radialis medialisierte nicht-signifikant ( $p = 0,13$ ) bei Pronation und zeigte eine Vergrößerung des Abstandes zur lateralen Grenze des Capitulum humeri (R1) von  $14,4 \pm 3,7$  mm ( $9,0 - 20,8$  mm) in Neutralstellung auf  $17,5 \pm 5,2$  mm ( $10,5 - 26,9$  mm). Die mittlere Differenz betrug 3,1 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von 1,5 – 4,7 mm. Bezogen auf die Breite des Capitulum humeri vergrößerte sich der Abstand auf 109,5%. In Supination des Unterarms vergrößerte sich der Abstand auf  $16,6 \pm 3,3$  mm ( $10,4 - 21,4$  mm). Die mittlere Differenz zur Neutralstellung betrug 2,2 mm und das 95%-Konfidenzintervall 1,1 – 3,3 mm. Der Unterschied war nicht signifikant ( $p = 0,17$ ).

Die o.g. Ergebnisse werden in *Tabelle 17* zusammengefasst.

Die mittlere Differenz zwischen Pronations- und Supinationsstellung betrug -0,9 mm mit einem 95% Konfidenzintervall von -2,2 – 0,4 mm. Auch hier zeigte sich keine statistische Signifikanz ( $p = 0,63$ )

	Mittelwert (%)	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	90,5	14,4	$\pm 3,7$	9,0	20,8
<b>Pro.</b>	109,5	17,5	$\pm 5,2$	10,5	26,9
<b>Sup.</b>	104,0	16,6	$\pm 3,3$	10,4	21,4

*Tabelle 17* Abstand des N. radialis zur lateralen Grenze des Capitulum humeri (R1) in mm und prozentual zur Breite des Capitulum humeri (Flex. = Flexion, Pro.: Pronation, SD = Standardabweichung).

In Pronationsstellung vergrößerte sich der Abstand des N. radialis zur ventralen Kante des Capitulum humeri (R2) von  $10,8 \pm 3,2$  mm ( $5,3 - 16,0$  mm) auf  $13,1 \pm 6,9$  mm ( $6,7 - 29,9$  mm). Die mittlere Differenz betrug 2,3 mm und das 95%-Konfidenzintervall -0,7 – 5,2 mm. Die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant ( $p = 0,34$ ).

Mit Supination vergrößerte sich der Abstand nicht-signifikant ( $p = 0,17$ ) auf  $12,2 \pm 5,7$  mm ( $6,8 - 24,2$  mm). Die mittlere Differenz betrug 1,4 mm und das 95%-Konfidenzintervall -1,1 – 3,8 mm.

*Tabelle 18* liefert eine Zusammenfassung der o.g. Ergebnisse.

Zwischen Pronation und Supination bestand eine mittlere Differenz von -0,9 mm mit einem 95%-Konfidenzintervall von -4,2 – 2,5 mm. Auch dieser Unterschied war nicht signifikant ( $p = 0,75$ )

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	10,8	± 3,2	5,3	16,0
<b>Pro.</b>	13,1	± 6,9	6,7	29,9
<b>Sup.</b>	12,2	± 5,7	6,8	24,2

**Tabelle 18:** Abstand des N. radialis zum ventralen Rand des Capitulum humeri (R2) in mm (Flex. = Flexion, Pro.: Pronation, SD = Standardabweichung).

Der Abstand zwischen N. radialis und dem ventralen Radiuskopf (R3) verringerte sich nicht-signifikant ( $p = 0,49$ ) von  $7,7 \pm 2,7$  mm (5,2 – 13,2 mm) auf  $6,6 \pm 4,6$  mm (2,8 – 17,2 mm). Die mittlere Differenz betrug -1,1 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von -3,2 – 0,9 mm.

In Supination verringerte sich der Abstand auf  $7,6 \pm 4,0$  mm (2,3 – 16,4 mm). Bei einer mittleren Differenz von -0,1 mm und einem 95%-Konfidenzintervall von -1,9 – 1,6 mm war der Unterschied ebenfalls nicht signifikant ( $p = 0,93$ ).

O.g. Ergebnisse werden in *Tabelle 19* zusammengefasst.

Auch zwischen Pronations- und Supinationsstellung lag kein signifikanter Unterschied vor ( $p = 0,59$ ). Die mittlere Differenz betrug 1,0 mm und das 95%-Konfidenzintervall -0,4 – 2,4 mm)

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	7,7	± 2,7	5,2	13,2
<b>Pro.</b>	6,6	± 4,6	2,8	17,2
<b>Sup.</b>	7,6	± 4,0	2,3	16,4

**Tabelle 19:** Abstand des N. radialis zum ventralen Rand des Radiuskopfes (R3) in mm (Flex. = Flexion, Pro.: Pronation, SD = Standardabweichung).

## 4.4 Einfluss der Gelenksufflation

Die Gelenksufflation mit 20 ml Kochsalzlösung führte zu einer Vergrößerung des Abstandes zwischen den Nerven und den knöchernen Strukturen. Ebenfalls zeigte sich eine weitere Medialisierung der Nerven, welche jedoch nicht statistisch signifikant waren.

### 4.4.1 Nervus medianus

*Tabelle 20* zeigt, dass sich der N. medianus durch die Gelenksufflation medialisierte. Von einem Abstand von  $4,6 \pm 3,7$  mm (-2,8 – 10,8 mm) zur medialen Begrenzung der

Trochlea humeri (M1) in 90° Flexion verlagerte der Nerv sich auf  $3,4 \pm 6,3$  mm (-5,0 – 10,3 mm). Die mittlere Differenz betrug 1,2 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von -1,0 – 3,4 mm. Prozentual ausgedrückt lag der N. medianus somit nach Gelenksufflation bei 12,0 % der Trochlea-Breite. Der Unterschied war jedoch nicht signifikant ( $p = 0,58$ ).

	Mittelwert (%)	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	17,2	4,6	$\pm 3,7$	-2,8	10,8
<b>Insuff.</b>	12,0	3,4	$\pm 6,3$	-5,0	10,3

**Tabelle 20:** Abstand des N. medianus zur medialen Trochleagrenze (M1) in mm und prozentual zur Trochlealänge (Flex. = Flexion, Insuff.: mit Gelenksufflation mit 20 ml Kochsalzlösung, SD = Standardabweichung).

Die Gelenksufflation mit 20 ml vergrößerte signifikant ( $p < 0,01$ ) den Abstand des N. medianus zur ventralen Kante der Trochlea humeri (M2), wie in *Tabelle 21* zu sehen, von  $8,4 \pm 2,4$  mm (4,2 – 11,5 mm) auf  $13,45 \pm 3,6$  (6,6 – 17,3 mm). Die mittlere Differenz betrug 5,0 mm und das 95%-Konfidenzintervall 3,8 – 6,3 mm.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	8,4	$\pm 2,4$	4,2	11,5
<b>Insuff.</b>	13,4	$\pm 3,6$	6,6	17,3

**Tabelle 21:** Abstand des N. medianus zum ventralen Rand der Trochlea humeri (M2) in mm (Flex. = Flexion, Insuff.: mit Gelenksufflation mit 20 ml Kochsalzlösung, SD = Standardabweichung).

Der Abstand zur Koronoidspitze (M3) zeigte ebenfalls eine signifikante Abstandsvergrößerung ( $p = 0,01$ ) von  $9,1 \pm 2,3$  mm (5,9 – 13,8 mm) auf  $12,6 \pm 3,6$  mm (8,6 – 19,3 mm). Diese Ergebnisse sind in *Tabelle 22* zusammengefasst. Die mittlere Differenz betrug 3,5 mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von 2,2 – 4,8 mm.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	9,1	$\pm 2,3$	5,9	13,8
<b>Insuff.</b>	12,6	$\pm 3,6$	8,6	19,3

**Tabelle 22:** Abstand des N. medianus zur Koronoidspitze (M3) in mm (Flex. = Flexion, Insuff.: mit Gelenksufflation mit 20 ml Kochsalzlösung, SD = Standardabweichung).

#### 4.4.2 Nervus radialis

Ähnlich wie beim N. medianus zeigte sich eine nicht-signifikante ( $p = 0,70$ ) Medialisierung des N. radialis bei Gelenkinsufflation. Wie *Tabelle 23* zeigt, kam es zu einer Vergrößerung des Abstandes zur lateralen Grenze des Capitulum humeri (R1) von  $14,4 \pm 3,7$  mm ( $9,0 - 20,8$  mm) auf  $15,1 \pm 4,0$  mm ( $9,1 - 22,8$  mm). Die mittlere Differenz betrug  $0,7$  mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von  $0,3 - 1,1$  mm. Bezogen auf die Breite des Capitulum humeri vergrößerte sich der Abstand mit Gelenkinsufflation auf  $94,1$  %.

	Mittelwert (%)	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	90,5	14,4	$\pm 3,7$	9,0	20,8
<b>Insuff.</b>	94,1	15,1	$\pm 4,0$	9,1	22,8

*Tabelle 23:* Abstand des N. radialis zur lateralen Grenze des Capitulum humeri (R1) in mm und prozentual zur Breite des Capitulum humeri (Flex. = Flexion, Insuff.: mit Gelenkinsufflation mit 20 ml Kochsalzlösung, SD = Standardabweichung).

Signifikant ( $p < 0,01$ ) hingegen vergrößerte sich der Abstand des N. radialis zur ventralen Kante des Capitulum humeri (R2), wie in *Tabelle 24* zu sehen, von  $10,8 \pm 3,2$  mm ( $5,3 - 16,0$  mm) auf  $17,0 \pm 3,1$  mm ( $13,2 - 21,3$  mm). Die mittlere Differenz betrug  $6,2$  mm und das 95%-Konfidenzintervall  $5,2 - 7,2$  mm.

	Mittelwert (mm)	SD (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)
<b>Flex.</b>	10,8	$\pm 3,2$	5,3	16,0
<b>Insuff.</b>	17,0	$\pm 3,1$	13,2	21,3

*Tabelle 24:* Abstand des N. radialis zum ventralen Rand des Capitulum humeri (R2) in mm (Flex. = Flexion, Insuff.: mit Gelenkinsufflation mit 20 ml Kochsalzlösung, SD = Standardabweichung).

Der Abstand zwischen N. radialis und dem ventralen Radiuskopf (R3) vergrößerte sich ebenfalls signifikant ( $p < 0,01$ ) von  $7,7 \pm 2,7$  mm ( $5,2 - 13,2$  mm) auf  $11,9 \pm 3,0$  mm ( $8,9 - 18,3$  mm). Die Ergebnisse werden in *Tabelle 25* dargestellt. Die mittlere Differenz betrug  $4,2$  mm bei einem 95%-Konfidenzintervall von  $3,6 - 4,8$  mm.



	<b>Mittelwert (mm)</b>	<b>SD (mm)</b>	<b>Minimum (mm)</b>	<b>Maximum (mm)</b>
<b>Flex.</b>	7,7	± 2,7	5,2	13,2
<b>Insuff.</b>	11,9	± 3,0	8,9	18,3

**Tabelle 25:** Abstand des N. radialis zum ventralen Rand des Radiuskopfes (R3) in mm (Flex. = Flexion, Insuff.: mit Gelenksufflation mit 20 ml Kochsalzlösung, SD = Standardabweichung).

## **5. Diskussion**

### **5.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse**

Die präsentierten Untersuchungen zeigten folgende Ergebnisse:

- Der N. medianus ist auf Gelenkhöhe vor dem medialen Viertel der Trochlea humeri sowie vereinzelt auch medial der Trochlea humeri lokalisiert.
- Der N. radialis liegt auf Gelenkhöhe vor der medialen Grenze des Capitulum humeri.
- Die Flexion des Ellenbogengelenks von 90° führt zu einer Medialisierung beider Nerven. Darüber hinaus kommt es zu einer Verdopplung der Abstände des N. medianus zur vorderen Begrenzung der Trochlea humeri und zur Koronoidspitze sowie des N. radialis zum Capitulum humeri und zum Radiuskopf.
- Die Gelenksufflation mit 20 ml Kochsalzlösung führt zur Verdreifachung der Abstände zwischen den Nerven und knöchernen Strukturen.
- Pronation oder Supination des Unterarms führt zu keiner signifikanten Lageveränderung der beiden Nerven.

### **5.2 Einordnung in die wissenschaftliche Literatur**

Die arthroskopische Arthrolyse hat sich als effektive Therapieoption für Patienten mit Ellenbogensteife etabliert [70, 90, 104]. Allerdings muss die Gefahr neurologischer Verletzungen beachtet werden [90]. Blonna et al. [87] beschreiben in einer retrospektiven Analyse von 502 Eingriffen eine Rate an Nervenschädigungen von 5% mit einer Verteilung zwischen den Nerven wie folgt:

- 24,3 % N. medianus,
- 22 % N. radialis,
- 31,7 % N. ulnaris,
- 22 % N. cutaneus antebrachii medialis.

Ähnliche Zahlen lassen sich in vergleichbaren Studien finden [88-90]. Die Rate der Nervenschäden bei der arthroskopischen Arthrolyse ist somit höher als bei anderen arthroskopischen Eingriffen [7].

Läsionen des N. ulnaris werden insbesondere häufig als Komplikation der offenen Arthrolyse oder nach Verlagerung des Nervens in einem vorherigem operativen Eingriff beschrieben [49]. Die Nn. medianus und radialis sind jedoch auch im physiologischen Zustand nur für geübte Chirurgen intraoperativ auffindbar. Aufgrund des geringen Abstandes des N. radialis zum anterolateralen Portal und des N. medianus zum anteromedialen Portal besteht bereits bei der Portalanlage das Risiko iatrogenen Nervenverletzungen [70]. Sowohl transiente als auch dauerhafte Nervenschäden werden beschrieben [87, 89, 91-93]. Neben Kompressions- und Dehnungsverletzungen sowie Inzisionsverletzungen durch die Portalanlage werden Verletzungen durch Operationsinstrumentarien wie Shaver als häufige Ursachen iatrogenen Nervenverletzungen beschrieben [8, 91, 94]. Um derartige Komplikationen zu vermeiden, ist die genaue Kenntnis der Nervenposition während des operativen Eingriffes von großer Bedeutung.

### **5.2.1 Lagebeziehungen der Nerven zu den knöchernen Landmarken**

Frühere Studien untersuchten bereits die Lage der neurovaskulären Strukturen während der Ellenbogenarthroskopie, jedoch größtenteils in Bezug auf die Arthroskopieportale [95-99, 105]. Mit einem Abstand von 3 bis 7 mm zeigt der N. radialis eine große Nähe zum anterolateralen Portal und ist somit bereits bei der Portalanlage gefährdet [95-99, 105]. Der N. medianus weist mit einem Abstand von 2 bis 15 mm ein enges Lageverhältnis zum anteromedialen Portal auf [95, 98, 99, 105]. Zwar wurde in der vorliegenden Studie kein direkter Bezug auf die Arthroskopieportale genommen, die ermittelten Daten können jedoch eine Nähe des N. radialis zum anterolateralen Portals erkennen lassen. Außerdem wurde in einem Drittel aller Fälle der N. medianus medial der Trochlea humeri gesehen, sodass eine enge Lagebeziehung zum anteromedialen Portal bestätigt werden kann.

Während der anterioren Kapsulektomie sind der N. medianus und der N. radialis besonders gefährdet. Zwar wurden in früheren Studien Untersuchungen der Nervenlage in Bezug auf die knöchernen Strukturen durchgeführt, diese erfolgten jedoch mittels makroskopischer Vermessungen, welche zu Ungenauigkeiten neigen können [38, 100]. Miller et al. [100] untersuchten den Abstand der Nerven zu den knöchernen Strukturen an Schnittbildern tiefgefrorener Leichenpräparaten. Die erhobenen Werte waren vergleichbar mit unseren Messungen, lediglich die Abstände des N. medianus in 90° Flexion zeigten deutliche Unterschiede (*Tabelle 26*). Allerdings

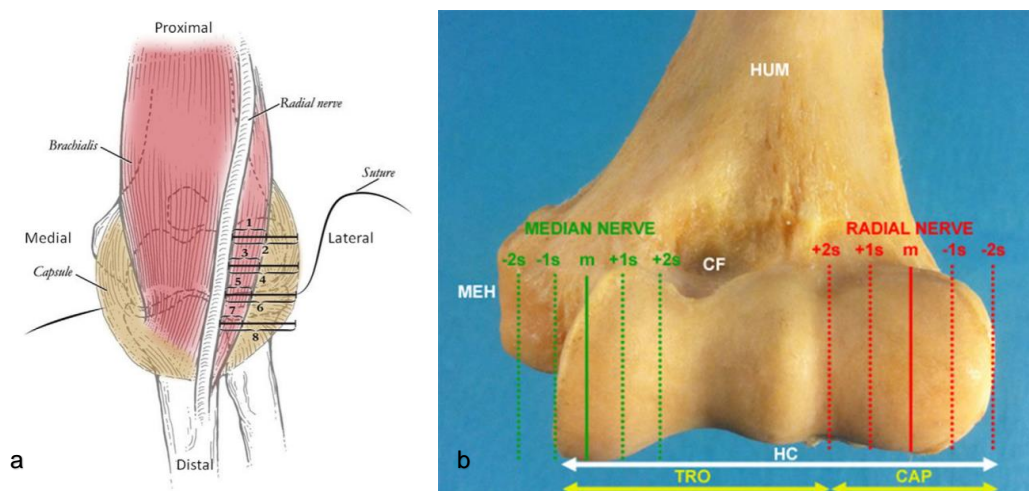
wurde in Millers Untersuchung keine feste Messhöhe definiert und es wurden lediglich die Abstände der Nerven zum Knochen in einer Ebene beschrieben, sodass die Nervenlage nur unzureichend für die intraoperative Orientierung beschrieben wird.

	<b>Eigene Messungen (mm)</b>	<b>Miller et al. [100] (mm)</b>
<b>N. radialis</b>		
<b>Extension</b>	5,5 ± 1,82 (3,6 – 8,6)	6
<b>90° Flexion</b>	10,81 ± 3,19 (5,3 – 16,03)	10 (7 – 15)
<b>N. medianus</b>		
<b>Extension</b>	4,83 ± 1,51 (3 – 7,7)	5
<b>90° Flexion</b>	8,4 ± 2,44 (4,3 – 11,5)	13 (9 – 18)

**Tabelle 26:** Abstände der Nn. medianus und radialis zu den knöchernen Landmarken in Extension und 90° Flexion in mm (eigene Messungen und Werte von Miller et al. [100])

Omid et al. [38] untersuchten die Lage des N. radialis bei der Ellenbogenarthroskopie und sahen den Nerv auf Gelenkhöhe medial des Capitulum humeri (*Abbildung 24a*). Die vorliegenden Daten zeigten hingegen den N. radialis vor dem medialen Rand des Capitulum humeri. Omids Studie weist jedoch methodische Limitationen auf: So erfolgten die Markierungen der Gelenkhöhe und die Vermessungen manuell und sind somit anfällig für Messfehler. Der Nerv wurde außerdem durch Nadeln in seinem Verlauf fixiert, wodurch es zu einer Veränderung des natürlichen Nervenverlaufes kommen kann.

In einer Studie aus der eigenen Arbeitsgruppe wurde in ähnlicher Weise zur vorliegenden Arbeit die Lage des N. radialis und N. medianus am Ellenbogen vermessen (*Abbildung 24b*) [101]. Hier zeigte sich der N. radialis weiter lateral als von Omid et al. beschrieben und der N. medianus im medialen Viertel der Trochlea humeri. Allerdings erfolgten alle Messungen in Extensionsstellung und der Effekt der Ellenbogenpositionierung oder Gelenkinsufflation wurde nicht untersucht.



**Abbildung 24:** Darstellung der Nervenverläufe aus vorherigen Studien.

- a) Omid et al. beschreiben den N. radialis auf Gelenkhöhe medial des Capitulum humeri. (Omid R, Hamid N, Keener JD, Galatz LM, Yamaguchi K. Relation of the radial nerve to the anterior capsule of the elbow: anatomy with correlation to arthroscopy. Arthroscopy. 2012 Dec;28(12):1800-4).
- b) Eine Studie aus der eigenen Arbeitsgruppe hingegen zeigte den N. radialis weiter lateral gelegen (Hackl M, Lappen S, Burkhart KJ, Neiss WF, Müller LP, Wegmann K. The course of the median and radial nerve across the elbow: an anatomic study. Arch Orthop Trauma Surg. 2015 Jul;135(7):979-83).

## 5.2.2 Einfluss von Ellenbogenpositionierung und Gelenksufflation

Die Ellenbogenarthroskopie wird in der Regel in 90° Ellenbogenflexion und mit einer Gelenksufflation von 20 ml durchgeführt [81]. Bei Arthrofibrose kann jedoch häufig aufgrund der engen Kapselverhältnisse nur weniger Flüssigkeit in das Gelenk injiziert werden [80]. Haapaniemi et al. [91] berichteten über den Fall einer iatrogenen Durchtrennung der Nn. radialis und medianus bei arthroskopischer anteriorer Kapsulektomie bei posttraumatischer Ellenbogensteife, bei der aufgrund einer verminderten Dehnbarkeit der Gelenkkapsel lediglich eine Insufflation mit 7 ml Kochsalzlösung möglich war. Dies resultierte in einer schlechten intraoperativen Visualisierung und führte konsekutiv zu den beschriebenen Nervenverletzungen. Ähnliche Berichte beschreiben ebenfalls erschwerte operative Verhältnisse bei Patienten mit Arthrofibrose, die zu iatrogenen Nervenschädigungen führten [89, 92, 106].

Frühere Studien konnten bereits eine Veränderung der Nervenlage durch die Ellenbogenpositionierung und Gelenksufflation in Bezug zu den Arthroskopieportalen zeigen [95, 97, 98, 105]. Bisher existierten jedoch wenig Daten bezüglich der Nervenposition zu den knöchernen Landmarken. In den Untersuchungen von Miller et al. [100] an Schnittbildern tiefgefrorener anatomischer Präparate zeigte sich eine Distanzzunahme zwischen knöchernen Strukturen und Nerven sowohl durch Gelenksufflation als auch durch Ellenbogenflexion. Allerdings

wurde nur einer von sieben Präparaten in Extension vermessen und die Distanzen vor und nach der Insufflation konnten aufgrund der gewählten Methodik nur mittels matched-pair Analyse bestimmt werden. Unser Studiendesign hingegen ermöglichte eine identische Testsequenz in jedem Präparat und eine genaue Reproduzierbarkeit. So konnte gezeigt werden, dass der N. radialis in Extension weiter lateral lokalisiert ist und bei Flexion medialisiert. Dieses Wissen kann intraoperativ zur Vermeidung iatrogenen Nervenverletzungen genutzt werden, indem bei der anterioren Kapsulektomie im medialen Gelenkbereich der Ellenbogen zur Lateralisierung des Nervs extendiert wird und bei der Arbeit in lateraler gelegenen Gelenkaspekten der Ellenbogen zur Medialisierung des Nervens flektiert wird.

### **5.2.3 Einfluss von Unterarmrotation**

Bisherige Untersuchungen beschränkten sich größtenteils auf den Einfluss der Unterarmrotation und auf die Lageverhältnisse der neurologischen Strukturen zu den Arthroskopieportalen [96, 99, 107]. Arrigoni et al. [108] beschreiben eine Medialisierung des N. radialis und eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Nerv und Radiuskopf durch Unterarmsupination. Die Messungen wurden arthroskopisch an Leichenpräparaten durchgeführt. Aufgrund der makroskopischen Messmethode können jedoch Ungenauigkeiten auftreten und die Genauigkeit der arthroskopischen Messung hängt stark von den Erfahrungen des Arthroskops ab, sodass eine Observer-Bias nicht ausgeschlossen werden kann. Zusätzlich wurde vor der Messung eine anteriore Kapsulektomie durchgeführt, die zu einer Veränderung der anatomischen Nervenposition oder einer erhöhten Beweglichkeit des Nervs führen könnte.

Die präsentierten Daten zeigten keine relevante Veränderung der Nervenlage zu den knöchernen Strukturen durch Rotationsbewegungen des Unterarms. In Kontrast zu Extensions- und Flexionsbewegungen, wodurch der Abstand der Nerven zu den Knochen sowie die Lage des N. radialis in der Sagittalebene beeinflusst werden, kann somit die intraoperative Pronation oder Supination keine Lageveränderung der Nerven bewirken.

### **5.3 Limitationen**

Die vorliegende Arbeit weist die üblichen Limitationen von Leichenstudien auf. So kann die Arbeit an Leichenpräparaten die physiologischen In-vivo-Bedingungen nicht

vollständig reproduzierten und es können Veränderungen der Weichteilstrukturen auftreten. So wäre es denkbar, dass die Gelenkkapsel von Leichenpräparaten im Vergleich zu in-vivo-Bedingungen weniger flexibel ist, was zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen kann. Eine Veränderung der anatomischen Strukturen während der Präparation kann trotz vorsichtigem Vorgehen auch nicht vollständig ausgeschlossen werden, was die Ergebnisse zusätzlich beeinflussen könnte.

Bei allen Präparaten wurde eine Gelenkinsufflation mit exakt 20 ml Kochsalzlösung durchgeführt. Dies ermöglichte vergleichbare Ergebnisse, wäre jedoch bei Patienten mit Arthrofibrose möglicherweise bei limitiertem Kapselvolumen nicht möglich. Die gewonnenen Erkenntnisse sind somit nur eingeschränkt auf Patienten mit Arthrofibrose übertragbar.

Auch befasste sich unsere Untersuchung nicht mit dem Abstand zwischen Kapsel und Nerv, was jedoch bereits in früheren Studien untersucht wurde [100, 105].

Eine weitere Verzerrung aufgrund von Alter, Geschlecht oder ethnischer Herkunft ist aufgrund der begrenzten Anzahl von elf Präparaten ausschließlich weißer Körperspender ebenfalls möglich.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Treuting, R., *Minimally invasive orthopedic surgery: arthroscopy*. Ochsner J, 2000. **2**(3): p. 158-63.
2. Bigony, L., *Arthroscopic surgery: a historical perspective*. Orthop Nurs, 2008. **27**(6): p. 349-54; quiz 355-6.
3. Kieser, C.W. and R.W. Jackson, *Severin Nordentoft: The first arthroscopist*. Arthroscopy, 2001. **17**(5): p. 532-5.
4. Burman, M.S., *Arthroscopy or the direct visualization of joints: an experimental cadaver study. 1931*. Clin Orthop Relat Res, 2001(390): p. 5-9.
5. Andrews, J.R., R.K. St Pierre, and W.G. Carson, Jr., *Arthroscopy of the elbow*. Clin Sports Med, 1986. **5**(4): p. 653-62.
6. Leong, N.L., et al., *Demographic Trends and Complication Rates in Arthroscopic Elbow Surgery*. Arthroscopy, 2015. **31**(10): p. 1928-32.
7. Kelly, E.W., B.F. Morrey, and S.W. O'Driscoll, *Complications of elbow arthroscopy*. J Bone Joint Surg Am, 2001. **83**(1): p. 25-34.
8. Hilgersom, N.F.J., et al., *Nerve injuries do occur in elbow arthroscopy*. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2018. **26**(1): p. 318-324.
9. Wegmann, K., K.J. Burkhart, and L.P. Müller, *Chirurgische Anatomie*, in *Expertise Ellenbogen*, H.B. Müller L.P., Burkhart K.J., Editor. 2016, Thieme Verlag. p. 16-40.
10. Schiebler, T.H. and H.-W. Korf, *Extremitäten*, in *Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. 2007, Steinkopff: Heidelberg. p. 449-580.
11. Schünke, M., E. Schulte, and U. Schumacher, *Prometheus - LernAtlas der Anatomie: allgemeine Anatomie und Bewegungssystem ; 182 Tabellen*. 2007: Georg Thieme Verlag.
12. Wegmann, K., K. Burkhart, and L. Müller, *Knöchernen Verletzungen des Ellenbogens*. Orthop Unfallchir up2date 2012, 2012. **7**: p. 339–364.
13. Miyasaka, K.C., *Anatomy of the elbow*. Orthop Clin North Am, 1999. **30**(1): p. 1-13.
14. Alcid, J.G., C.S. Ahmad, and T.Q. Lee, *Elbow anatomy and structural biomechanics*. Clin Sports Med, 2004. **23**(4): p. 503-17, vii.
15. Rausch, V., et al., *The radial head size in relation to osseous landmarks of the forearm*. Surg Radiol Anat, 2019. **41**(4): p. 415-421.



16. Swieszkowski, W., et al., *The anatomic features of the radial head and their implication for prosthesis design*. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2001. **16**(10): p. 880-7.
17. Van Riet, R.P., et al., *Anatomical considerations of the radius*. Clin Anat, 2004. **17**(7): p. 564-9.
18. Mazzocca, A.D., et al., *The anatomy of the bicipital tuberosity and distal biceps tendon*. J Shoulder Elbow Surg, 2007. **16**(1): p. 122-7.
19. Keener, J.D., et al., *Insertional anatomy of the triceps brachii tendon*. J Shoulder Elbow Surg, 2010. **19**(3): p. 399-405.
20. Martin, S. and E. Sanchez, *Anatomy and biomechanics of the elbow joint*. Semin Musculoskelet Radiol, 2013. **17**(5): p. 429-36.
21. Hackl, M., et al., *[The bare area of the proximal ulna : An anatomical study on optimizing olecranon osteotomy]*. Orthopade, 2016. **45**(10): p. 887-94.
22. Cage, D.J., et al., *Soft tissue attachments of the ulnar coronoid process. An anatomic study with radiographic correlation*. Clin Orthop Relat Res, 1995(320): p. 154-8.
23. Morrey, B.F. and K.N. An, *Functional anatomy of the ligaments of the elbow*. Clin Orthop Relat Res, 1985(201): p. 84-90.
24. Bozkurt, M., et al., *The annular ligament: an anatomical study*. Am J Sports Med, 2005. **33**(1): p. 114-8.
25. King, G.J., B.F. Morrey, and K.N. An, *Stabilizers of the elbow*. J Shoulder Elbow Surg, 1993. **2**(3): p. 165-74.
26. van Riet, R.P., et al., *The effect of the orientation of the noncircular radial head on elbow kinematics*. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2004. **19**(6): p. 595-9.
27. O'Driscoll, S.W., B.F. Morrey, and K.N. An, *Intraarticular pressure and capacity of the elbow*. Arthroscopy, 1990. **6**(2): p. 100-3.
28. Callaway, G.H., et al., *Biomechanical evaluation of the medial collateral ligament of the elbow*. J Bone Joint Surg Am, 1997. **79**(8): p. 1223-31.
29. Morrey, B.F., S. Tanaka, and K.N. An, *Valgus stability of the elbow. A definition of primary and secondary constraints*. Clin Orthop Relat Res, 1991(265): p. 187-95.
30. Miyake, J., et al., *In vivo and 3-dimensional functional anatomy of the anterior bundle of the medial collateral ligament of the elbow*. J Shoulder Elbow Surg, 2012. **21**(8): p. 1006-12.

31. Timmerman, L.A. and J.R. Andrews, *Histology and arthroscopic anatomy of the ulnar collateral ligament of the elbow*. Am J Sports Med, 1994. **22**(5): p. 667-73.
32. Camp, C.L., et al., *The lateral collateral ligament complex of the elbow: quantitative anatomic analysis of the lateral ulnar collateral, radial collateral, and annular ligaments*. J Shoulder Elbow Surg, 2019. **28**(4): p. 665-670.
33. Cohen, M.S. and H. Hastings, 2nd, *Rotatory instability of the elbow. The anatomy and role of the lateral stabilizers*. J Bone Joint Surg Am, 1997. **79**(2): p. 225-33.
34. Hackl, M., et al., *Functional anatomy of the lateral collateral ligament of the elbow*. Arch Orthop Trauma Surg, 2016. **136**(7): p. 1031-7.
35. Siebenlist, S. and P. Biberthaler, *Akute Kapsel-Band-Verletzungen des Ellenbogens*. Trauma und Berufskrankheit, 2015. **17**(1): p. 132-139.
36. Artico, M., et al., *Surgical anatomy of the radial nerve at the elbow*. Surg Radiol Anat, 2009. **31**(2): p. 101-6.
37. Cho, H., et al., *Topographical anatomy of the radial nerve and its muscular branches related to surface landmarks*. Clin Anat, 2013. **26**(7): p. 862-9.
38. Omid, R., et al., *Relation of the radial nerve to the anterior capsule of the elbow: anatomy with correlation to arthroscopy*. Arthroscopy, 2012. **28**(12): p. 1800-4.
39. Abrams, R.A., R.A. Brown, and M.J. Botte, *The superficial branch of the radial nerve: an anatomic study with surgical implications*. J Hand Surg Am, 1992. **17**(6): p. 1037-41.
40. Gunther, S.F., D. DiPasquale, and R. Martin, *The internal anatomy of the median nerve in the region of the elbow*. J Hand Surg Am, 1992. **17**(4): p. 648-56.
41. Pederson, W.C., *Median nerve injury and repair*. J Hand Surg Am, 2014. **39**(6): p. 1216-22.
42. Nzeako, O.J. and R. Tahmassebi, *Idiopathic Anterior Interosseous Nerve Dysfunction*. J Hand Surg Am, 2015. **40**(11): p. 2277-8.
43. Contreras, M.G., et al., *Anatomy of the ulnar nerve at the elbow: potential relationship of acute ulnar neuropathy to gender differences*. Clin Anat, 1998. **11**(6): p. 372-8.

44. Flatow, E.L., L.U. Bigliani, and E.W. April, *An anatomic study of the musculocutaneous nerve and its relationship to the coracoid process*. Clin Orthop Relat Res, 1989(244): p. 166-71.
45. Stephens, L., J.J. Kinderknecht, and D.Y. Wen, *Musculocutaneous nerve injury in a high school pitcher*. Clin J Sport Med, 2014. **24**(6): p. e68-9.
46. Mautner, K. and J.C. Keel, *Musculocutaneous nerve injury after simulated freefall in a vertical wind-tunnel: a case report*. Arch Phys Med Rehabil, 2007. **88**(3): p. 391-3.
47. Hwang, K., J.Y. Han, and I.H. Chung, *Topographical anatomy of the anconeus muscle for use as a free flap*. J Reconstr Microsurg, 2004. **20**(8): p. 631-6.
48. Rohrich, R.J. and A.E. Ingram, Jr., *Brachioradialis muscle flap: clinical anatomy and use in soft-tissue reconstruction of the elbow*. Ann Plast Surg, 1995. **35**(1): p. 70-6.
49. Brunner, U., et al., *Ellenbogensteife*, in *Expertise Ellenbogen*, L.P. Müller, B. Hollinger, and K.J. Burkhart, Editors. 2016, Thieme Verlag. p. 289-318.
50. Morrey, B.F., L.J. Askew, and E.Y. Chao, *A biomechanical study of normal functional elbow motion*. J Bone Joint Surg Am, 1981. **63**(6): p. 872-7.
51. Pieniazek, M., et al., *Upper limb joint mobility ranges during activities of daily living determined by three-dimensional motion analysis--preliminary report*. Ortop Traumatol Rehabil, 2007. **9**(4): p. 413-22.
52. Sardelli, M., R.Z. Tashjian, and B.A. MacWilliams, *Functional elbow range of motion for contemporary tasks*. J Bone Joint Surg Am, 2011. **93**(5): p. 471-7.
53. Lindenhovius, A.L. and J.B. Jupiter, *The posttraumatic stiff elbow: a review of the literature*. J Hand Surg Am, 2007. **32**(10): p. 1605-23.
54. Keschner, M.T. and N. Paksima, *The stiff elbow*. Bull NYU Hosp Jt Dis, 2007. **65**(1): p. 24-8.
55. Matsuo, K., et al., *Inflammation in Fibrodysplasia Ossificans Progressiva and Other Forms of Heterotopic Ossification*. Curr Osteoporos Rep, 2019. **17**(6): p. 387-394.
56. Charalambous, C.P. and B.F. Morrey, *Posttraumatic elbow stiffness*. J Bone Joint Surg Am, 2012. **94**(15): p. 1428-37.
57. Engler, A.J., et al., *Matrix elasticity directs stem cell lineage specification*. Cell, 2006. **126**(4): p. 677-89.
58. Kay, N.R., *Surgery of the elbow: practical and scientific aspects*. 1998: Arnold.

59. Stehle, J. and F. Gohlke, [*Classification of elbow stiffness and indications for surgical treatment*]. Orthopade, 2011. **40**(4): p. 282-90.
60. Morrey, B.F., *Post-traumatic contracture of the elbow. Operative treatment, including distraction arthroplasty*. J Bone Joint Surg Am, 1990. **72**(4): p. 601-18.
61. Jupiter, J.B., S.W. O'Driscoll, and M.S. Cohen, *The assessment and management of the stiff elbow*. Instr Course Lect, 2003. **52**: p. 93-111.
62. Mansat, P. and B.F. Morrey, *The column procedure: a limited lateral approach for extrinsic contracture of the elbow*. J Bone Joint Surg Am, 1998. **80**(11): p. 1603-15.
63. Morrey, B.F., *The posttraumatic stiff elbow*. Clin Orthop Relat Res, 2005(431): p. 26-35.
64. Zubler, V., et al., *Elbow stiffness: effectiveness of conventional radiography and CT to explain osseous causes*. AJR Am J Roentgenol, 2010. **194**(6): p. W515-20.
65. Breborowicz, M., et al., *The outcome of open elbow arthrolysis: comparison of four different approaches based on one hundred cases*. Int Orthop, 2014. **38**(3): p. 561-7.
66. Ulmar, B., A. Eschler, and T. Mittlmeier, [*Open arthrolysis of elbow stiffness*]. Unfallchirurg, 2012. **115**(8): p. 725-37; quiz 738.
67. Lindenhovius, A.L., et al., *A prospective randomized controlled trial of dynamic versus static progressive elbow splinting for posttraumatic elbow stiffness*. J Bone Joint Surg Am, 2012. **94**(8): p. 694-700.
68. Olivier, L.C., et al., *Grading of functional results of elbow joint arthrolysis after fracture treatment*. Arch Orthop Trauma Surg, 2000. **120**(10): p. 562-9.
69. Yamamoto, K., et al., *Clinical results of arthrolysis using postero-lateral approach for post-traumatic contracture of the elbow joint*. Hand Surg, 2003. **8**(2): p. 163-72.
70. Kim, S.J. and S.J. Shin, *Arthroscopic treatment for limitation of motion of the elbow*. Clin Orthop Relat Res, 2000(375): p. 140-8.
71. Ball, C.M., et al., *Arthroscopic treatment of post-traumatic elbow contracture*. J Shoulder Elbow Surg, 2002. **11**(6): p. 624-9.
72. Stans, A.A., et al., *Operative treatment of elbow contracture in patients twenty-one years of age or younger*. J Bone Joint Surg Am, 2002. **84**(3): p. 382-7.

73. Wada, T., et al., *The medial approach for operative release of post-traumatic contracture of the elbow*. J Bone Joint Surg Br, 2000. **82**(1): p. 68-73.
74. Schorn, D. and J. Steinbeck, *[Results of open arthrolysis for extrinsic elbow stiffness via radial access. Indications and limits of the procedure]*. Orthopade, 2011. **40**(4): p. 303-6.
75. Meier, R., et al., *Ätiologie, Klassifikation, Indikation und Durchführung der operativen und konservativen Behandlung der Ellenbogensteife*. OP-JOURNAL, 2012. **28**: p. 42-47.
76. Degreeef, I. and L. De Smet, *Elbow arthrolysis for traumatic arthrofibrosis: a shift towards minimally invasive surgery*. Acta Orthop Belg, 2011. **77**(6): p. 758-64.
77. Attum, B. and W. Obremskey, *Posttraumatic Elbow Stiffness: A Critical Analysis Review*. JBJS Rev, 2016. **4**(9).
78. Keener, J.D. and L.M. Galatz, *Arthroscopic management of the stiff elbow*. J Am Acad Orthop Surg, 2011. **19**(5): p. 265-74.
79. Ries, C., et al., *Arthroskopie des Ellenbogengelenks*, in *Expertise Ellenbogen*, L.P. Müller, B. Hollinger, and K.J. Burkhart, Editors. 2016, Thieme Verlag. p. 93-105.
80. Plath, J., et al., *Arthrolyse («Stiff Elbow»)*, in *Atlas sportorthopädisch-sporttraumatologische Operationen*, A. Imhoff and M. Feucht, Editors. 2017, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 187-190.
81. Plath, J., et al., *Lagerung, Arthroskopieportale, arthroskopische Diagnostik*, in *Atlas sportorthopädisch-sporttraumatologische Operationen*, A. Imhoff and M. Feucht, Editors. 2017, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 154-159.
82. Froimson, A.I., J.E. Silva, and D. Richey, *Cutis arthroplasty of the elbow joint*. J Bone Joint Surg Am, 1976. **58**(6): p. 863-5.
83. Morrey, B.F., *Distraction arthroplasty. Clinical applications*. Clin Orthop Relat Res, 1993(293): p. 46-54.
84. Mansat, P., N. Bonnevalle, and B. Werner, *[Indications and technique of combined medial and lateral column procedures in severe extrinsic elbow contractures]*. Orthopade, 2011. **40**(4): p. 307-15.
85. Hilgersom, N.F., et al., *Tips to avoid nerve injury in elbow arthroscopy*. World J Orthop, 2017. **8**(2): p. 99-106.

86. Antuna, S.A., et al., *Ulnohumeral arthroplasty for primary degenerative arthritis of the elbow: long-term outcome and complications*. J Bone Joint Surg Am, 2002. **84**(12): p. 2168-73.
87. Blonna, D., et al., *Prevention of nerve injury during arthroscopic capsulectomy of the elbow utilizing a safety-driven strategy*. J Bone Joint Surg Am, 2013. **95**(15): p. 1373-81.
88. Aldridge, J.M., 3rd, et al., *Anterior release of the elbow for extension loss*. J Bone Joint Surg Am, 2004. **86**(9): p. 1955-60.
89. Jones, G.S. and F.H. Savoie, 3rd, *Arthroscopic capsular release of flexion contractures (arthrofibrosis) of the elbow*. Arthroscopy, 1993. **9**(3): p. 277-83.
90. Pederzini, L.A., et al., *Elbow arthroscopy in stiff elbow*. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2014. **22**(2): p. 467-73.
91. Haapaniemi, T., M. Berggren, and L. Adolfsson, *Complete transection of the median and radial nerves during arthroscopic release of post-traumatic elbow contracture*. Arthroscopy, 1999. **15**(7): p. 784-7.
92. Park, J.Y., et al., *Radial nerve palsy after arthroscopic anterior capsular release for degenerative elbow contracture*. Arthroscopy, 2007. **23**(12): p. 1360 e1-3.
93. Ruch, D.S. and G.G. Poehling, *Anterior interosseus nerve injury following elbow arthroscopy*. Arthroscopy, 1997. **13**(6): p. 756-8.
94. Desai, M.J., et al., *Major Peripheral Nerve Injuries After Elbow Arthroscopy*. Arthroscopy, 2016. **32**(6): p. 999-1002 e8.
95. Adolfsson, L., *Arthroscopy of the elbow joint: A cadaveric study of portal placement*. J Shoulder Elbow Surg, 1994. **3**(2): p. 53-61.
96. Drescher, H., et al., *[The risk of neurovascular damage in elbow joint arthroscopy. Which approach is better: anteromedial or anterolateral?]*. Z Orthop Ihre Grenzgeb, 1994. **132**(2): p. 120-5.
97. Field, L.D., et al., *Arthroscopic anatomy of the lateral elbow: a comparison of three portals*. Arthroscopy, 1994. **10**(6): p. 602-7.
98. Stothers, K., B. Day, and W.R. Regan, *Arthroscopy of the elbow: anatomy, portal sites, and a description of the proximal lateral portal*. Arthroscopy, 1995. **11**(4): p. 449-57.

99. Unlu, M.C., et al., *Anatomic relationship between elbow arthroscopy portals and neurovascular structures in different elbow and forearm positions*. J Shoulder Elbow Surg, 2006. **15**(4): p. 457-62.
100. Miller, C.D., C.M. Jobe, and M.H. Wright, *Neuroanatomy in elbow arthroscopy*. J Shoulder Elbow Surg, 1995. **4**(3): p. 168-74.
101. Hackl, M., et al., *The course of the median and radial nerve across the elbow: an anatomic study*. Arch Orthop Trauma Surg, 2015. **135**(7): p. 979-83.
102. Wegmann, K., K.J. Burkhart, and L.P. Müller, *Offene Zugänge*, in *Expertise Ellenbogen*, H.B. Müller L.P., Burkhart K.J., Editor. 2016, Thieme Verlag. p. 74-93.
103. Hackl, M., et al., *Elbow Positioning and Joint Insufflation Substantially Influence Median and Radial Nerve Locations*. Clin Orthop Relat Res, 2015. **473**(11): p. 3627-34.
104. Kodde, I.F., et al., *Surgical treatment of post-traumatic elbow stiffness: a systematic review*. J Shoulder Elbow Surg, 2013. **22**(4): p. 574-80.
105. Lynch, G.J., et al., *Neurovascular anatomy and elbow arthroscopy: inherent risks*. Arthroscopy, 1986. **2**(3): p. 190-7.
106. Kim, S.J., H.K. Kim, and J.W. Lee, *Arthroscopy for limitation of motion of the elbow*. Arthroscopy, 1995. **11**(6): p. 680-3.
107. Diliberti, T., M.J. Botte, and R.A. Abrams, *Anatomical considerations regarding the posterior interosseous nerve during posterolateral approaches to the proximal part of the radius*. J Bone Joint Surg Am, 2000. **82**(6): p. 809-13.
108. Arrigoni, P., et al., *The posterior interosseous nerve crosses the radial head midline and increases its distance from bony structures with supination of the forearm*. J Shoulder Elbow Surg, 2019. **28**(2): p. 365-370.

## **7. Vorabveröffentlichung von Ergebnissen**

Ein Teil der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden bereits in folgendem Zeitschriftenbeitrag veröffentlicht:

- Hackl M, Lappen S, Burkhart KJ, Leschinger T, Scaal M, Müller LP, Wegmann K. Elbow Positioning and Joint Insufflation Substantially Influence Median and Radial Nerve Locations. Clin Orthop Relat Res. 2015 Nov;473(11):3627-34. doi: 10.1007/s11999-015-4442-3. Epub 2015 Jul 8. PMID: 26152782; PMCID: PMC4586229.