

Aus der Universitätsklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
des Universitätsklinikums Bonn

Direktor: Prof. Dr. med. Dieter Christian Wirtz

Sicherheit und Präzision bei der chirurgischen Behandlung von intraartikulären proximalen Unterarmfrakturen

Habilitationsschrift

zur Erlangung der *venia legendi*

der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
für das Lehrgebiet „Orthopädie und Unfallchirurgie“

vorgelegt von

Dr. med. Davide Cucchi aus Cernusco sul Naviglio (Italien)

Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie am Universitätsklinikum
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

2021

Dekan: Prof. Dr. med. Bernd Weber

Mentor: Prof. Dr. med. Christof Burger

Vorsitzender des Habilitationsausschusses: Prof. Dr. med. Henning Boecker

Datum des Habilitationskolloquiums: 04. Oktober 2021

Publikationsgrundlage der vorliegenden kumulativen Habilitationsschrift:

1)

Cucchi D, Luceri F, Menon A, Müller LP, Kabir K, Randelli P, Arrigoni P, Wegmann K

Anatomic relations of the median nerve to the ulnar insertion of the brachialis muscle: safety issues and implications for medial approaches to the elbow joint.

Arch Orthop Trauma Surg. 2021 Jan 23. doi: [10.1007/s00402-021-03753-y](https://doi.org/10.1007/s00402-021-03753-y)

„Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“

2)

Arrigoni P, Cucchi D, Menon A, Guerra E, Nicoletti S, Colozza A, Luceri F, Pederzini L, Randelli P.

The posterior interosseus nerve crosses the radial head midline and increases its distance from bony structures with supination of the forearm.

J Shoulder Elbow Surg. 2019 Feb;28(2):365-370. doi: [10.1016/j.jse.2018.08.019](https://doi.org/10.1016/j.jse.2018.08.019).

„Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms.“

3)

Cucchi D, Arrigoni P, Luceri F, Menon A, Guerra E, Müller LP, Burger C, Eygendaal D, Wegmann K; ESSKA Elbow and Wrist Committee 2016–2018.

Modified anteromedial and anterolateral elbow arthroscopy portals show superiority to standard portals in guiding arthroscopic radial head screw fixation.

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2019 Oct;27(10):3276-3283. doi: [10.1007/s00167-019-05411-8](https://doi.org/10.1007/s00167-019-05411-8).

„Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“

4)

Cucchi D, Guerra E, Luceri F, Lenich A, Nicoletti S, Randelli P, Wirtz DC, Eygendaal D, Arrigoni P.

A combination of an anteromedial, anterolateral and midlateral portals is sufficient for 360° exposure of the radial head for arthroscopic fracture fixation.

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2019 Jan;27(1):319-325. doi: [10.1007/s00167-018-5077-1](https://doi.org/10.1007/s00167-018-5077-1).

„Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360 ° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“

5)

Arrigoni P, Cucchi D, Guerra E, Luceri F, Nicoletti S, Menon A, Randelli P.

No neurovascular damage after creation of an accessory anteromedial portal for arthroscopic reduction and fixation of coronoid fractures.

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2019 Jan;27(1):314-318. doi: [10.1007/s00167-018-4926-2](https://doi.org/10.1007/s00167-018-4926-2).

„Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“

1 Inhaltsverzeichnis

1 Inhaltsverzeichnis	5
2 Einleitung	7
2.1 <i>Intraartikuläre proximale Unterarmfrakturen</i>	7
2.2 <i>Relevante Anatomie und gefährdete Nerven</i>	8
2.3 <i>Behandlungsstrategien von intraartikulären Ellenbogenfrakturen</i>	10
2.3.1 <i>Indikationen und Grundlagen der osteosynthetischen Versorgung</i>	10
2.3.2 <i>Offene Zugänge zum Ellenbogengelenk</i>	11
2.3.3 <i>Ellenbogenarthroskopie</i>	13
3 Publikationsgrundlage und Hypothesen der vorliegenden kumulativen Habilitationsschrift	15
3.1 <i>Anatomic relations of the median nerve to the ulnar insertion of the brachialis muscle: safety issues and implications for medial approaches to the elbow joint.</i>	15
3.2 <i>The posterior interosseus nerve crosses the radial head midline and increases its distance from bony structures with supination of the forearm.</i>	15
3.3 <i>Modified anteromedial and anterolateral elbow arthroscopy portals show superiority to standard portals in guiding arthroscopic radial head screw fixation.</i>	16
3.4 <i>A combination of an anteromedial, anterolateral and midlateral portals is sufficient for 360° exposure of the radial head for arthroscopic fracture fixation.</i>	17
3.5 <i>No neurovascular damage after creation of an accessory anteromedial portal for arthroscopic reduction and fixation of coronoid fractures.</i>	17
4 Material und Methoden	19
4.1 <i>Material und Methoden zu „Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“ [67]</i>	19
4.2 <i>Material und Methoden zu „Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101]</i>	20
4.3 <i>Material und Methoden zu Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“ [88]</i>	20
4.4 <i>Material und Methoden zu „Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360 ° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“ [89]</i>	21
4.5 <i>Material und Methoden zu „Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“ [4]</i>	21
4.6 <i>Statistische Auswertungen</i>	22

5.1 Ergebnisse zu „Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“ [67]	23
5.2 Ergebnisse zu „Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101]	23
5.3 Ergebnisse zu „Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“ [88].....	24
5.4 Ergebnisse zu „Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360 ° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“ [89]	24
5.5 Ergebnisse zu „Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“ [4].....	26
6 Diskussion.....	27
6.1 Diskussion zu „Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“ [67]	27
6.2 Diskussion zu „Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101]	28
6.3 Diskussion zu „Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“ [88].....	29
6.4 Diskussion zu Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360 ° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“ [89]	31
6.5 Diskussion zu „Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“ [4].....	32
6.6 Limitationen der zusammengelegten Studien.....	33
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	35
8 Literaturverzeichnis.....	39
9 Danksagung	49

2 Einleitung

2.1 Intraartikuläre proximale Unterarmfrakturen

Das Ellenbogengelenk ist ein komplexes Gelenk, welches das distale Ende des Humerus im Oberarm mit den proximalen Enden der Ulna und des Radius im Unterarm verbindet [1,2]. Intraartikuläre proximale Unterarmfrakturen können sowohl nach komplexen Ellenbogenluxationen durch sportliche Aktivitäten, Verkehrsunfällen als auch infolge energiearmer Unfälle wie Stolpern und Stürzen auf die ausgestreckte Hand auftreten. Diese Verletzungen betreffen am häufigsten den Processus Coronoideus (Coronoidfortsatz), den Caput radii (Radiuskopf) oder beide und können eine oder mehrere der drei verschiedenen Gelenke beschädigen, aus denen der Ellenbogen besteht: das Humeroulnargelenk, das Humeroradialgelenk und das proximale Radioulnargelenk. Bei falscher Diagnose oder unzureichender Behandlung können Verletzungen des Coronoidfortsatzes und des Radiuskopfes zu schwerwiegenden Funktionsstörungen, wie posttraumatischer Gelenkdegeneration, Instabilität, Steife und Pseudoarthrosen führen.

Der Coronoidfortsatz ist zusammen mit dem Radiuskopf die wichtigste knöcherne Barriere gegen eine posteriore Luxation des Ellenbogens [3,4,13–15,5–12]. In der Tat, bei einem Verlust von 50% oder mehr der Coronoidhöhe, tritt eine schwerwiegende Instabilität in der Translation, Rotation und bei Valgus-Varus-Stress auf [15,16]. Regan und Morrey klassifizierten die Coronoidfrakturen basierend auf dem Prozentsatz der Coronoidbeteiligung [17]: Typ I beschreibt eine Abscherfraktur der Coronoidspitze; Typ II beschreibt eine Fraktur mit einer Fragmentgröße < 50% der Coronoidhöhe. Wenn die Fraktur mehr als 50% des Coronoidfortsatzes umfasst, wird sie als Typ-III-Fraktur klassifiziert. Später veröffentlichte O'Driscoll ein umfassenderes CT-basiertes System zur Klassifizierung von Coronoidfrakturen, welches die Rolle der anteromedialen Facette betont [9].

Der Radiuskopf ist ein entscheidender Sekundärstabilisator des Ellenbogens und eine wichtige Struktur für die Stabilität und Funktion des Unterarms [18–20]. Frakturen des Radiuskopfes sind häufig und eine verzögerte oder unangemessene Behandlung kann zu einer Einschränkung der Unterarmrotation mit anschließender Behinderung bei Alltags- und Arbeitsaktivitäten führen. Radiuskopffrakturen werden nach Mason in vier Gruppen klassifiziert. Später modifizierte Hotchkiss diese Einteilung [21,22]: nicht oder nur minimal dislozierte Frakturen werden als Typ I klassifiziert. Typ II sind dislozierte einfache

Frakturen, während dislozierte Frakturen bei vorhandener Komminution (mehrfragmentäre Frakturen) Typ III zugeordnet werden. Schließlich werden Radiuskopffrakturen in Kombination mit Ellenbogenluxationen als Typ IV klassifiziert.

2.2 Relevante Anatomie und gefährdete Nerven

Die genaue Kenntnis der anatomischen Beziehung zwischen Nerven und knöchernen oder muskulären anatomischen Orientierungspunkten ist bei allen chirurgischen Zugängen von Bedeutung. Der Ellenbogen hat eine besondere Stellung, da drei Hauptnerven das Gelenk kreuzen und identifiziert und geschützt werden müssen. Diese Nerven sind der N. medianus, der N. radialis, insbesondere sein motorischer Ast (N. interosseus posterior), und der N. ulnaris.

Der N. medianus stammt aus den medialen und lateralen Strängen des Plexus brachialis. Im Arm verläuft er medial zum M. brachialis in unmittelbarer Nähe zur Arteria brachialis [23]. Auf der Höhe des distalen Humerus liegen Nerv und Arterie zwischen den Muskelbäuchen des M. brachialis und des M. biceps brachii und verlaufen in anterolateraler Richtung in die Fossa antecubitalis ein. Hier bleibt der Nerv medial zur Arteria brachialis und zur Sehne des M. biceps brachii sowie unterhalb der bicipitalen Aponeurose und befindet sich ventral zum medialen Viertel der Trochlea humeri auf der frontalen Ebene [24]. Nach der Trennung von der Arteria brachialis, die in die Fossa antecubitalis eintritt und sich in etwa auf der Höhe des Coronoidfortsatzes in den radialen und den ulnaren Ast aufteilt, verläuft der Nerv im Unterarm zwischen den humeralen und den ulnaren Ursprüngen des M. pronator teres [25]. Es wurden seltene Variationen des Verlaufs des N. medianus in Verbindung mit anatomischen Variationen des distalen Humerus, des N. musculocutaneus und der Arteria brachialis beschrieben [23,26–28].

Der N. medianus innerviert die Flexor- und Pronatormuskeln im anterioren Unterarm (mit Ausnahme des M. flexor carpi ulnaris und Teil des M. flexor digitorum profundus), die Thenarmuskeln und die beiden lateralen Mm. lumbricales. Weiterhin sorgt er für die sensorische Innervation des radialen Anteils der Handinnenfläche sowie der volaren Seite der ersten dreieinhalb Finger. Eine Läsion dieses Nervs kann nach suprakondylären Humerusfrakturen sowie durch offene oder arthroskopische mediale Zugänge am Ellenbogen auftreten.

Der N. interosseus posterior ist ein motorischer Nerv, der vom N. radialis ausgeht, nachdem sich ein oberflächlicher sensorischer Ast davon trennt. Der N. radialis teilt sich in

der distalen Ellenbeuge in einen oberflächlichen sensorischen Ast und einen tieferliegenden motorischen Ast – den N. interosseus posterior – auf [29–31]. Dieser Nerv ist in seinem proximalen Bereich durch den M. brachialis von der Ellenbogengelenkkapsel getrennt, während weiter distal beim Überqueren des Radiuskopfes keine Muskelbäuche diese Struktur vom Ellenbogengelenk trennen. Danach verläuft der N. interosseus posterior unterhalb der Frohse-Arkade und setzt seinen Verlauf in Richtung des M. supinator und der Extensorenmuskeln des Handgelenks fort, welche durch seine Äste innerviert sind [29,32,33]. Seltene Variationen des Verlaufs des N. interosseus posterior, die mit einer anatomischen Variation des M. supinator verbunden sind, wurden beschrieben [34].

Eine Läsion dieses Nervs kann nach einem Trauma und während einer offenen oder arthroskopischen Operation am Ellenbogen auftreten. Das kann dramatische Konsequenzen für die Unterarmfunktion haben und somit das Ergebnis von chirurgischen Eingriffen an der anterioren und lateralen Seite des Ellenbogens negativ beeinflussen [35–41].

Der N. ulnaris entsteht aus dem Plexus brachialis als Fortsetzung des Mittelstrangs und verläuft initial medial im Oberarm. Nach dem Durchqueren der Struthers-Arkade verläuft er posterior zum Septum intermusculare brachii mediale im Oberarm und verläuft dann posterior zum Epicondylus medialis, um in den Kubitaltunnel zu gelangen. Dieser Nerv innerviert den M. flexor carpi ulnaris und die mediale Hälfte des M. flexor digitorum profundus sowie den Großteil der intrinsischen Handmuskeln. Darüber hinaus innerviert er sensorisch die ulnarseitige Hälfte der Hand, sowie die ulnaren anderthalb Finger [42].

Der N. ulnaris kann durch ein direktes Unfalltrauma verletzt werden sowie während einer arthroskopischen Operation bei der Anlage von posteromedialen oder anteromedialen Portalen beschädigt werden. Darüber hinaus kann die Verwendung motorisierter Instrumente im Gelenk in unmittelbarer Nähe zur medialen Kapsel diesen Nerv auch gefährden [43–45].

2.3 Behandlungsstrategien von intraartikulären Ellenbogenfrakturen

2.3.1 Indikationen und Grundlagen der osteosynthetischen Versorgung

Der Coronoidfortsatz spielt eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung der Ellenbogenstabilität [6–15]. Aus diesem Grund ist eine chirurgische Reposition und Fixation des Fortsatzes in jeder mit Ellenbogeninstabilität verbundenen Coronoidfraktur empfohlen. Instabilität im Ellenbogengelenk kann entweder aufgrund eines massiven Knochenverlusts (Regan-Morrey-Typ-III-Frakturen) oder aufgrund kombinierter Knochen- und Bandverletzungen entstehen. Tatsächlich kann der Verlust eines geringen Anteils des Coronoids bei assoziierten Radiuskopf- oder Bandverletzungen ausreichen, um das Ellenbogengelenk zu destabilisieren [46–51].

Die ideale Behandlung ist eine zeitnahe anatomische Reposition und biomechanisch stabile Fixation ohne zusätzliche Weichteilschäden. Eine stabile Fixation kann mit verschiedenen Implantaten erreicht werden: Schrauben, Platten, Kirschner-Drähte, Nähte und Buttons. Unabhängig vom verwendeten Implantat, ist das Ziel des Eingriffs die Wiederherstellung der Coronoidhöhe und der Kongruenz zwischen der Trochlea humeri und der Incisura trochlearis, deren vorderer Pfeiler der Coronoidfortsatz ist. Darüber hinaus sollte die ulnare Insertion des anterioren Bündels des medialen Kollateralbandes auf der anteromedialen Facette des Coronoidfortsatzes rekonstruiert werden, um die Valgus-Stabilität des Ellenbogens zu gewährleisten.

Die optimale Behandlung von Radiuskopffrakturen ist die anatomische Reposition und stabile Fixation. Eine Osteosynthese ist bei Typ II- und einigen Typ III- oder IV-Frakturen mit geringer Komplexität angezeigt, während bei Komminution eine Radiuskopfresektion oder die Implantation einer Radiuskopfprothese in Betracht gezogen werden sollten. Platten und Schrauben können verwendet werden, um Frakturen vom Typ II und einige Frakturen vom Typ III oder IV über einen offenen Zugang zu fixieren.

Unterschiedliche Rotationsgrade des Unterarms ermöglichen das Freilegen verschiedener Anteile des Radiuskopfes. Dies ist von größter Bedeutung, um ein Impingement des Osteosynthesematerials auf dem Radiuskopf mit der Ulna in maximaler Pronation und Supination zu vermeiden [52].

Eine arthroskopische Fixation mit Zugschrauben kann für Typ-II-Frakturen und einige Typ-III-Frakturen in Betracht gezogen werden [53]. In diesem Fall weisen biomechanische Prinzipien darauf hin, dass bei Knochensegmenten, die keinen axialen Belastungen ausgesetzt sind, Zugschrauben die höchste Primärstabilität erzielen, wenn sie senkrecht

zur Frakturfläche verlaufen [54]. Da die meisten Radiuskopffrakturen senkrecht zur Gelenkfläche des Radiuskopfes verlaufen, sollte die ideale Schraube parallel zur Gelenkfläche verlaufen. Dies spielt eine Rolle bei der Platzierung von Arthroskopieportalen, weil im Gegensatz zu offenen Zugängen, bei denen die Gewebepräparation relativ einfach die Platzierung der Schrauben ermöglicht, bei der Arthroskopie der Winkel jeder Schraube zur Fraktur durch die Platzierung des Portals bestimmt und eingeschränkt wird. Jedes Portal ermöglicht es, einen anderen Bereich des Radiuskopfes zu adressieren. Die Unterarmdrehung ermöglicht, einen variablen Arbeitsraum für die Platzierung von Fixationsvorrichtungen von jedem Portal aus zu erreichen. Die Kenntnis, welcher Bereich des Radiuskopfes durch die jeweiligen Portale zugänglich ist und in welcher Position jedes Portal das Platzieren von Schrauben für die interne Fixation ermöglicht, liefert wichtige Informationen für die präoperative Planung und definiert die Grenzen der arthroskopischen Fixation.

2.3.2 Offene Zugänge zum Ellenbogengelenk

Klassische chirurgische Techniken, um den Coronoidfortsatz zu erreichen, dessen Frakturen zu reponieren und ihn mit einer anterioren Schraube oder Platte zu fixieren, erfordern einen anterioren oder medialen offenen Zugang [12,13,55,56]. Dies kann technisch herausfordernd sein. Wenn die Schritte des chirurgischen Zugangsweges nicht sorgfältig ausgeführt werden, kann dies die anteriore Kapsel oder die Blutversorgung der Knochenfragmente beschädigen [13,56,57].

Es wurden verschiedene Zugänge für die medialen und anteromedialen Strukturen des Ellenbogens beschrieben [58], darunter zahlreiche Variationen des ursprünglich von Jobe vorgeschlagenen Flexor-carpi-ulnaris-Split Zuganges [59–61], der Hotchkiss „over the top“ Zugang [62] und die selten verwendeten transepicondylären und posteromedialen Zugänge, die von Molesworth [63] und Campbell [64] sowie von Taylor und Scham beschrieben worden sind [65]. Ein kritischer Punkt aller medialen Zugänge an den Ellenbogen ist die Notwendigkeit, die Nervenstrukturen, insbesondere den N. medianus, zu schonen. Der „over the top“ Zugang wurde ursprünglich für Arthrolysen beschrieben und wird häufig auch zur Behandlung von Coronoidfrakturen verwendet, da er ein günstiges Sichtfeld auf das anteromediale Ellenbogengelenk bietet und hierbei die internervale Muskelebene zwischen den Flexor- und Pronatormuskeln (die vom N. medianus innerviert werden) und dem M. flexor carpi ulnaris (der vom N. ulnaris innerviert wird) respektiert [62]. Eine Erweiterung dieses Zuganges nach distal wirkt jedoch

Sicherheitsprobleme auf, da dies den N. medianus gefährden kann. Im Gegensatz zum „over the top“ Zugang, bietet der Flexor-carpi-ulnaris-Split Zugang eine überlegene knöcherne Exposition des Coronoidfortsatzes, wodurch alle Frakturtypen dargestellt werden können [66]. Dieser Zugang wird als technisch einfacher und weniger invasiv angesehen als der „over the top“ Zugang. Es ist jedoch kein internervaler Zugang; daher kann eine Erweiterung die Innervation eines Kopfes des M. flexor carpi ulnaris gefährden, wenn der „sichere Bereich“ für die Muskelaufspaltung (bis 10 mm distal des Tuberculus subliminus ulnae) nicht sorgfältig eingehalten wird [59].

Die Identifizierung zuverlässiger anatomischer Orientierungspunkte, wird in [67] beschrieben und die Entwicklung alternativer Zugänge gefördert, mit denen auch Strukturen distal der Ellenbogengelenklinie adressiert werden können, ohne Nervenstrukturen zu gefährden [68].

Auf der lateralen Seite des Ellenbogens, zur Fixation intraartikulärer Radiuskopffrakturen, zur Refixation oder Rekonstruktion des lateralen Bandkomplexes, zur Entfernung von Osteophyten oder freier Gelenkkörper und zur Radiuskopfresektion, werden die von Kocher und von Kaplan beschriebenen Zugänge am häufigsten verwendet [69–71]. Bei Kocher wird das intermuskuläre Intervall zwischen dem M. anconeus und dem M. extensor carpi ulnaris verwendet, während bei Kaplan das Intervall zwischen dem M. extensor digitorum communis und den Mm. extensor carpi radialis longus und brevis verwendet, um die darunterliegende Kapsel freizulegen und auf den Radiuskopf zuzugreifen. Ein Extensor-digitorum-communis-Split wurde ebenfalls als Zugang beschrieben [70,72].

Die Kenntnis der engen Lageverhältnisse des N. interosseus posterior zum M. supinator ist bei offenen Operationen am Ellenbogen von entscheidender Bedeutung: der Nerv ist sehr vulnerabel, wenn er unterhalb der Frohse-Arkade und zwischen den Fasern des M. supinator verläuft. Daher muss der am proximalen Radius entweder der M. supinator subperioistal vom Radius separiert (ohne den N. interosseus posterior freizulegen) oder die oberflächliche humerale Insertion des M. supinator gespalten werden, um den Nerv zu suchen und freizulegen [70–73].

Die Pronation wird als zuverlässige Methode zur Erhöhung der Sicherheitszone für laterale Zugänge angesehen, da sie den N. interosseus posterior ungefähr 1 cm nach anterior bewegt [74–76].

2.3.3 Ellenbogenarthroskopie

Eine wichtige Innovation zur Behandlung von intraartikulären proximalen Unterarmfrakturen ist die arthroskopische Technik. Die Vorarbeiten für die Ellenbogenarthroskopie stammen aus dem Jahr 1806, als der deutsche Urologe Philipp Bozzini ein Instrument baute, das in den menschlichen Körper eingeführt werden konnte, um die inneren Organe mit einer Kerze als Lichtquelle zu visualisieren. Er nannte dieses Instrument „Lichtleiter“ und gilt als Erfinder des ersten Endoskops [77]. Die erste aufgezeichnete Anwendung eines Endoskops zur Untersuchung eines Gelenks erfolgte 1912, als der dänische Chirurg Severin Nordentoft ein Laparoskop zur Untersuchung des Kniegelenkes verwendete [78]. Kenji Takagi, ein japanischer Orthopäde, bewies 1918, dass mit einem Zystoskop von Tuberkulose betroffene Knie untersucht werden konnten. 1919 war der Schweizer Eugene Bircher der erste Chirurg, der in Europa Kniearthroskopien an lebenden Patienten durchführte und seine Ergebnisse veröffentlichte [79,80]. Masaki Watanabe, ein ehemaliger Schüler von Takagi, ist bekannt für die grundlegenden Verbesserungen des Designs des Arthroskops und für seinen "Atlas der Arthroskopie", der es ermöglichte, diese Technik weit zu verbreiten. Die Faseroptik wurde zum Beispiel zuerst in der Arthroskopie von diesem japanischen Chirurgen verwendet [81]. Michael Samuel Burman war der erste, der 1931 in den USA eine diagnostische Ellenbogenarthroskopie an Leichen durchführte [82].

Seitdem haben sich die arthroskopischen Techniken entwickelt und sich in den letzten drei Jahrzehnten auf das Ellenbogengelenk ausgeweitet. Neue Strategien wurden entwickelt, um Coronoid- und Radiuskopffrakturen anzugehen. Die arthroskopische Reposition und interne Fixation von Coronoidfrakturen wurde vorgeschlagen, um die Morbidität offener Zugänge zu verringern. Zahlreiche arthroskopische Techniken zur Fixation von Coronoidfrakturen wurden entwickelt [83–85], um entweder einen „Suturepasser“ einzuführen, einen „Wechselstab“ in Mini-Open-Technik einzuführen oder das Frakturfragment reponiert zu halten, während ein retrograder Führungsdraht von der dorsalen Seite der Ulna eingeschoben wird [57,84,86]. Ein herausfordernder Schritt der zuletzt genannten Technik besteht darin, den gewünschten Austrittspunkt des retrograden Führungsdrahtes an der Coronoidspitze zu erreichen [87]. Führungssysteme, die für die Kreuzbänderrekonstruktion im Kniegelenk entwickelt wurden, können verwendet werden, um die Position des Führungsdrahtes zu unterstützen; aber die Anatomie des

Ellenbogens, die Portalposition und die Frakturkonfiguration können ein Hindernis darstellen, eine geeignete Positionierung des Führungssystemes zu erreichen.

Die Einführung eines sicheren und reproduzierbaren arthroskopischen antegraden Fixationssystems, wie in [4] beschrieben wird, überwand diese Schwierigkeit und erhöhte die Präzision der arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.

Besonderes Augenmerk bei der Versorgung von Radiuskopffrakturen ist auf die genaue Platzierung der Portale zu legen, da sich das auf die finale Position der zur internen Fixation verwendeten Schrauben auswirkt [88,89].

Der Schutz der Nerven bleibt, ähnlich wie bei der offenen Chirurgie, auch während der Arthroskopie ein wichtiges Thema [90–94].

Obwohl der N. ulnaris und der N. medianus bei arthroskopischen Eingriffen ebenfalls geschädigt werden können, ist der N. interosseus posterior die Struktur mit der höchsten Verletzungsgefahr [40,44,95–100]. Traditionell gelten bei der Ellenbogenarthroskopie die gleichen Sicherheitsvorkehrungen wie bei offenen Operationen. Anatomische Studien mit offenen volaren, dorsalen und lateralen Zugängen zeigten, dass eine sichere Zone existiert und ihre Breite mit den Bewegungen des Unterarms von der Pronation zur Supination abnimmt [31,33,69,74,75].

Die Untersuchung [101] überprüfte das anatomische Verhalten unter arthroskopischen Gesichtspunkten, evaluierte den relativen Abstand des N. interosseus posterior zum Radiuskopf und die Variationen mit unterschiedlichen Unterarmpositionen in der Ellenbogenarthroskopie, als wertvolle Grundlage für die Definition eines sicheren Arbeitsraumes für arthroskopische Eingriffe am Radiuskopf und am anterolateralen Kompartiment des Ellenbogens.

3 Publikationsgrundlage und Hypothesen der vorliegenden kumulativen Habilitationsschrift

In der vorliegenden Habilitationsschrift werden fünf Publikationen zum Themenkomplex „Sicherheit und Präzision bei der chirurgischen Behandlung von intraartikulären proximalen Unterarmfrakturen“ dargelegt und diskutiert:

3.1

Anatomic relations of the median nerve to the ulnar insertion of the brachialis muscle: safety issues and implications for medial approaches to the elbow joint.

„Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“
[67]

Es wird in der Arbeit dargelegt, wie sich die Position von Ellenbogen und Unterarm auf die Lageverhältnisse zwischen dem N. medianus und dem M. brachialis auswirkt. Die Kenntnis über die enge anatomische Beziehung zwischen dem N. medianus und dem M. brachialis ist von entscheidender Bedeutung bei der Durchführung chirurgischer Eingriffe am Ellenbogen. Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, wie Ellenbogenflexion und Unterarmrotation die relative Position des N. medianus in Bezug auf das proximale und distale Ende der ulnaren Insertion des M. brachialis verändern. Diese Studie zeigte, dass der Abstand zwischen dem N. medianus und der ulnaren Insertion des M. brachialis bei gebeugtem Ellenbogen und neutraler Unterarmrotation maximal ist und mit der Ellenbogenstreckung unabhängig von Pronation und Supination signifikant abnimmt.

3.2

The posterior interosseus nerve crosses the radial head midline and increases its distance from bony structures with supination of the forearm.

„Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101]

Diese anatomische Studie wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob die allgemeine Empfehlung der Unterarmpronation zur Erhöhung der Sicherheit bei offenen Zugängen am

Radiuskopf auch für arthroskopische Eingriffe gilt. Die Pronation wird als zuverlässige Methode zur Erhöhung der Sicherheitszone für offene laterale Zugänge angesehen, da sie den N. interosseus posterior nach anterior bewegt [74–76]. Die Studie bestätigte, dass die in der offenen Chirurgie beschriebene Bewegung des N. interosseus posterior (Medialisierung mit Pronation) auch unter arthroskopischen Gesichtspunkten auftritt. Die Rolle der Pronation beim Schutz des N. interosseus posterior bei extraartikulären Eingriffen wurde bestätigt. Die Supination hingegen vergrößerte den Abstand zwischen dem N. interosseus posterior und dem Radiuskopf und sollte daher in Betracht gezogen werden, um den sichereren intraartikulären Arbeitsraum zu vergrößern, wenn intraartikuläre Eingriffe am anterolateralen Aspekt des Ellenbogens durchgeführt werden.

3.3

Modified anteromedial and anterolateral elbow arthroscopy portals show superiority to standard portals in guiding arthroscopic radial head screw fixation.

„Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“ [88]

Diese Studie befasst sich mit der Optimierung der Platzierung von Zugschrauben bei der arthroskopischen Fixation von Radiuskopffrakturen. Es ist ein allgemeines biomechanisches Wissen, dass eine senkrecht zur Frakturlinie eingesetzte Zugschraube eine überlegene Primärstabilität einer Osteosynthese erreicht [54]. Während offene Zugänge eine ideale Schraubenplatzierung relativ leicht ermöglichen, bestimmt die Platzierung der Arthroscopieportale die Schraubenneigung mit nur minimalen Abweichungsmöglichkeiten, die durch die geringe Weichteilverschiebbarkeit zulässig sind [25]. Die Studienhypothese war, dass 1 cm weiter distal angesetzte anteromediale und anterolaterale Portale es im Vergleich zu den anteromedialen und anterolateralen angesetzten Standardportalen erleichtern, den Winkel der Schrauben näher an dem der Gelenkfläche des Radiuskopfes zu auszurichten. Die Studie konnte die Hypothese bestätigen und zeigen, dass die Verwendung von distalen anterolateralen und anteromedialen Ellenbogenarthroskopieportalen es ermöglicht, Führungsdrähte für kanülierte Schrauben in einem flacheren Winkel, mit guter Reproduzierbarkeit und höherer Genauigkeit im Vergleich zu den Standardportalen zu platzieren.

3.4

A combination of an anteromedial, anterolateral and midlateral portals is sufficient for 360° exposure of the radial head for arthroscopic fracture fixation.

„Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360 ° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“ [89]

Die Kenntnis darüber, welcher Teil des Radiuskopfumfanges von jedem Arthroskopieportal aus zugänglich ist, ist wichtig für die präoperative Planung bei der Versorgung von Radiuskopffrakturen. In dieser Studie wurde der „Kontaktbogen“ in der axialen Ebene, welcher von drei verschiedenen Ellenbogenarthroskopieportalen (anteromedial, anterolateral, midlateral) aus erreichbar ist, hinsichtlich Größe des Kontaktbogens und Präzision bewertet. Die Studie zeigte, dass durch Addierung des Kontaktbogens der drei untersuchten Portale, der gesamte Radiuskopfumfang effektiv zur Fixierung von Radiuskopffrakturen adressiert werden kann; hierdurch werden frühere Berichte aktualisiert, die auf die Verwendung von zwei arthroskopischen Portalen beschränkt waren [58]. Die anatomische Studie zeigte auch eine signifikante Überlegenheit des anterolateralen Portals im axialen Kontaktbogen im Vergleich zu den anteromedialen und midlateralen Portalen; In Bezug auf die Reproduzierbarkeit unter Operateuren wurde das anteromediale Portal im Vergleich zu den anterolateralen und mittellateralen Portalen am besten bewertet.

3.5

No neurovascular damage after creation of an accessory anteromedial portal for arthroscopic reduction and fixation of coronoid fractures.

„Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“ [4]

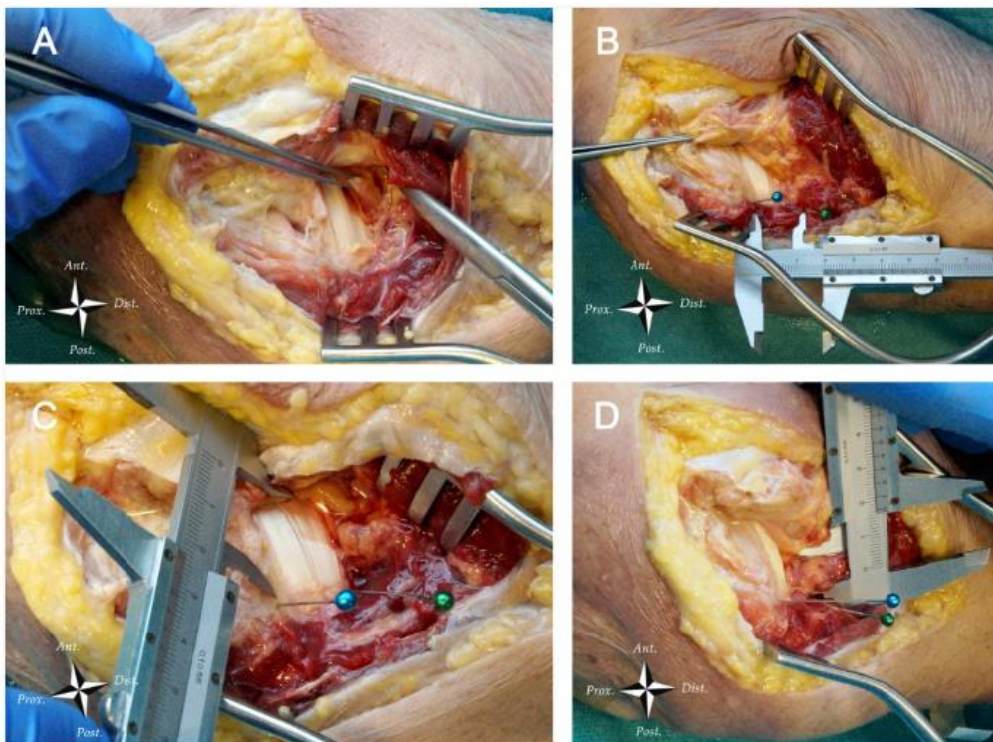
In dieser anatomischen Studie wurde eine innovative arthroskopische Technik zur Fixation von Coronoidfrakturen vorgestellt, die auf der Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals basiert. Die Sicherheit hinsichtlich Nerven- und Gefäßgefährdung und die Reproduzierbarkeit der Technik wurden evaluiert. Die Technik hat den Vorteil, eine verbesserte visuelle Kontrolle über die Fixation des Coronoidfortsatzes zu erhalten und die

Studie überprüft, ob ein mit dieser Technik eingeführter Kirschner-Draht die neurovaskulären Strukturen gefährdet oder nicht. Diese Untersuchung ergab, dass ein antegrader 0,9 mm Kirschner-Draht von einem zusätzlichen anteromedialen Portal in den Coronoidfortsatz eingeführt werden kann ohne jegliche neurovaskuläre Struktur zu beschädigen. Dieser Kirschner-Draht kann dann als Führungsdraht zum Einführen einer retrograden kanülierten Schraube von der dorsalen Ulna bis zur Spitze des Coronoidfortsatzes dienen. Nach Abschluss dieser Leichenuntersuchung wurde die Sicherheit und Machbarkeit dieser Technik auch in vivo nachgewiesen [3].

4 Material und Methoden

4.1 Material und Methoden zu „Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“ [67]

Um diese Studie durchzuführen, wurden elf frisch gefrorene Leichenpräparate, einschließlich des mittleren Drittels des Humerus und des gesamten Unterarms und der Hand, präpariert. Nach der oberflächlichen Dissektion unter Verwendung eines erweiterten medialen Zuganges wurden der N. medianus und der M. brachialis identifiziert und die proximalsten und distalsten Punkte der Insertion des M. brachialis auf der Ulna markiert. Ein Messschieber wurde verwendet, um die transepicondyläre Achse, die Länge der Insertion des M. brachialis und den kürzesten linearen Abstand zwischen dem N. medianus und den zuvor markierten proximalen und distalen Enden der Insertion des M. brachialis zu messen. Alle Messungen wurden mit dem Ellenbogengelenk in voller Streckung und in 90° -Flexion und mit dem Unterarm in voller Pronation, neutraler Position und voller Supination wiederholt. Alle Messungen wurden auf den transepicondylären Abstand des Präparats normalisiert [102].



Originalabbildung aus [67]: medialer Zugang, Identifikation und Markierung der relevanten anatomischen Strukturen und Messung der Abstände mittels Messschieber.

4.2 Material und Methoden zu „Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101]

Für diese Studie wurden zehn frisch gefrorene Leichenpräparate vorbereitet und eine Arthroskopie in Seitenlage simuliert. Hierbei befanden sich der Humerus in der horizontalen Ebene, und das Ellenbogengelenk war bei frei hängendem Unterarm um 90° gebeugt. Nach Etablierung von standardmäßigen anterioren und posterioren arthroskopischen Portalen und diagnostischer Arthroskopie wurde eine anteriore Kapsulektomie des gesamten lateralen Kompartiments durchgeführt und der N. interosseus posterior identifiziert. Ein vom midlateralen Portal aus eingeführter Tasthaken wurde verwendet, um die anterior-posterior Achse des Radiuskopfes zu markieren, die als Referenz für Messungen diente. Ein Messschieber, der aus dem mittleren Portal eingeführt wurde, wurde verwendet, um den Abstand zwischen dem vordersten Teil des Radiuskopfes und dem N. interosseus posterior zu messen. Dieses Maß wurde mit dem Unterarm in voller Pronation, neutraler Position und voller Supination aufgezeichnet und auf den transepicondylären Abstand des Präparats normalisiert. Schließlich wurde die Bewegung des N. interosseus posterior beobachtet und dokumentiert, während der Unterarm von der vollständigen Pronation zur vollständigen Supination gedreht wurde.

4.3 Material und Methoden zu Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“ [88]

Für die vorliegende Studie standen acht frisch gefrorene Leichenpräparate der oberen Extremitäten zur Verfügung, welche vorbereitet wurden, um eine Ellenbogenarthroskopie zu simulieren. Als Referenz für die nachfolgenden Messungen wurde vor Beginn der Arthroskopie unter Durchleuchtungskontrolle ein 1,6 mm Kirschner-Draht in den Radiuschaft parallel zur Gelenkfläche des Radiuskopfes gebohrt. Es wurden standardmäßige anteromediale und anterolaterale sowie modifizierte, distale anteromediale und anterolaterale arthroskopische Portale unter strikter Berücksichtigung knöcherner Orientierungspunkte etabliert. Um von jedem Portal aus die Reproduzierbarkeit der Schraubenplatzierung zwischen den Operateuren zu beurteilen, wurden elf unabhängige Chirurgen gebeten, mit einem 1,2-mm-Kirschner-Draht die optimale Richtung anzuzeigen, um eine kanülierte Schraube für die

Radiuskopffosteosynthese zu platzieren: den Winkel zwischen diesem Draht und einer Ebene parallel zur Gelenkfläche des Radiuskopfes wurde als "Schraubenneigungswinkel" bezeichnet und von einem externen Prüfer mit einem digitalen Winkelmesser gemessen. Um die Reproduzierbarkeit innerhalb der Operateure zu beurteilen, wiederholte ein einzelner Chirurg dieselbe Aufgabe an weiteren sieben Leichenpräparaten.

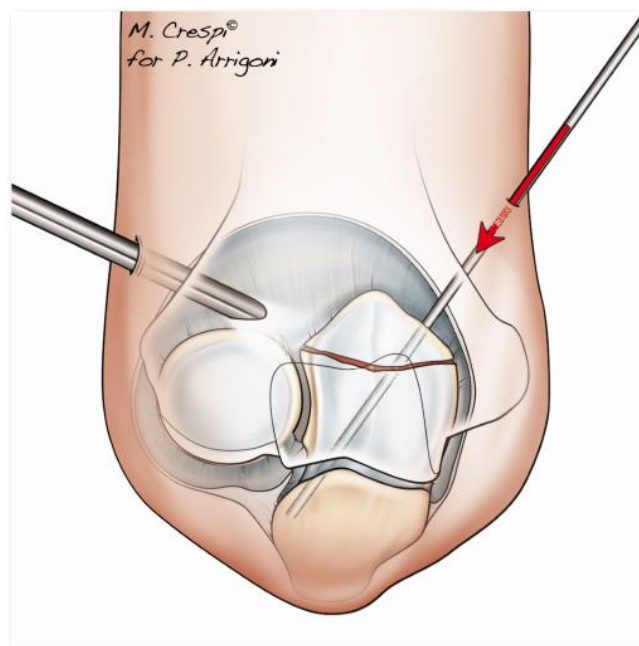
4.4 Material und Methoden zu „Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360 ° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“ [89]

Um den Anteil des Radiuskopfumfangs zu bewerten, der von jedem Arthroskopieportal aus zugänglich ist („axialer Kontaktbogen“), wurde eine Gruppe erfahrener Ellenbogenchirurgen gebeten, durch die anterolateralen, anteromedialen und midlateralen Ellenbogenarthroskopieportale die Platzierung einer Schraube zu simulieren, die durch die Mitte der Gelenkfläche des Radiuskopfes verläuft. Ein frisch gefrorenes Leichenpräparat mit gesamtem Oberarm bis zur Hand wurde in einem Setting, welches die Ellenbogenarthroskopie simuliert, montiert. Die oben genannten Portale wurden etabliert und ein kreisförmiges Referenzsystem wurde mit einer Präzisionsfräse auf dem Radiuskopf markiert, wobei das radiale Styloid als Referenz für 0 ° betrachtet wurde. Zehn unabhängige Untersucher wurden dann gebeten, den Unterarm von maximaler Supination auf maximale Pronation zu bewegen und mit einem Kirschner-Draht den Bereich anzugeben, in dem sie sich sicher fühlen würden, eine kanülierte Schraube für eine Osteosynthese des Radiuskopfes platzieren zu können. Der angezeigte Bereich wurde als „axialer Kontaktbogen“ definiert und zwischen den drei untersuchten Portalen verglichen.

4.5 Material und Methoden zu „Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“ [4]

Sechs frisch gefrorene Leichenpräparate der oberen Extremität wurden vorbereitet, um eine arthroskopische Operation am Ellenbogen zu simulieren. Nachdem standardmäßige anterolaterale und anteromediale Portale etabliert wurden, wurde ein zusätzliches anteromediales Portal, das sich 2 cm proximal zum standardmäßigen anteromedialen Portal befand, etabliert. Von diesem Portal aus wurde unter Verwendung der neuen Technik mit kanülierten Instrumenten ein 0,9 mm Kirschner-Draht in das Ellenbogengelenk

eingeführt und dann in den Coronoidfortsatz und weiter in die Ulna bis zur Perforation der dorsolateralen Unterarmhaut gebohrt. Ein solcher Kirschner-Draht soll dann als Führungsdraht für eine kanülierte Schraube dienen, die retrograd von der dorsalen Ulna bis zur Spitze des Coronoidfortsatzes eingeführt werden kann. Am Ende des arthroskopischen Eingriffs wurde der Kirschner-Draht an der Stelle belassen und eine seitliche Röntgenaufnahme des Ellenbogens angefertigt, um seine Position zu überprüfen. Schließlich wurde eine Dissektion mit einem erweiterten medialen Zugang durchgeführt, um mögliche Schäden an neurovaskulären Strukturen (A. brachialis, N. medianus, N. ulnaris) darzustellen.



Originalabbildung aus [101] : Schematische Darstellung der neuen chirurgischen Technik.

4.6 Statistische Auswertungen

In allen vorgestellten Arbeiten wurden die Analysen mit der Software GraphPad Prism v 6.0 (GraphPad Software Inc.) durchgeführt. Die Normalverteilung aller Daten wurde mit dem Shapiro-Wilk-Normalitätstest bewertet. Nach der Analyse der Outliers wurde eine statistische Auswertung der Unterschiede zwischen den Gruppen unter Verwendung einer Einweg-Varianzanalyse (ANOVA) für wiederholte Messungen mit einem Post-hoc-Tukey- oder Sidak-Mehrfachvergleichstest durchgeführt. Sofern indiziert, wurde ein Variationskoeffizient berechnet, um die Übereinstimmung zwischen und innerhalb der Beobachter zu bestimmen. Das Signifikanzniveau wurde auf $P < 0,05$ eingestellt.

5. Ergebnisse

5.1 Ergebnisse zu „Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“ [67]

Der N. medianus und der M. brachialis konnten in allen elf Leichenpräparaten identifiziert werden, und alle Messungen konnten ohne Schwierigkeiten in den verschiedenen Ellenbogen- und Unterarmpositionen durchgeführt werden. Die mittlere Länge der Insertion des M. brachialis betrug $27,9 \pm 2,1$ mm. Der maximale Abstand vom N. medianus wurde vom proximalsten Punkt der Insertion des M. brachialis in Flexion und neutraler Unterarmposition gemessen, während der minimale Abstand vom distalsten Punkt der Insertion des M. brachialis in Extension und Unterarmpronation bestimmt wurde.

Beim Vergleich von Messpaaren, die von den proximalsten und distalsten Punkten der Insertion des M. brachialis erhalten wurden (mit identischen Bedingungen der Ellenbogenflexion und Unterarmrotation) waren alle Abstände, die vom proximalsten Punkt der Insertion des M. brachialis gemessen wurden, signifikant größer als die vom distalsten Punkt. Beim Vergleich von Messpaaren, die vom gleichen Punkt der Insertion des M. brachialis und bei gleichem Grad der Unterarmrotation erhalten wurden, waren alle in Flexion gemessenen Abstände signifikant größer als ihre in Extension gemessenen Gegenmessungen. Schließlich wurden statistisch signifikante Unterschiede beim Vergleich von Messungen in Pronation oder Supination zu denen in neutraler Position beobachtet, jedoch nicht beim Vergleich von den Messungen in Pronation zu denen in Supination.

5.2 Ergebnisse zu „Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101]

In allen zehn untersuchten Leichenpräparaten konnte der N. interosseus posterior identifiziert werden. Die mittleren (und normalisierten) Abstände zwischen dem N. interosseus posterior und dem Radiuskopf betrugen $11,3 \pm 3,4$ mm ($0,18 \pm 0,06$) in Neutralposition, $8,4 \pm 2,0$ mm ($0,14 \pm 0,04$) in Pronation und $15,7 \pm 5,2$ mm ($0,25 \pm 0,08$) in Supination. Der Post-hoc-Tukey-Mehrfachvergleichstest ergab signifikante Unterschiede zwischen allen Messpaaren: Supination - Pronation ($p \leq 0,001$), Supination - Neutralposition ($p \leq 0,01$), Neutralposition - Pronation ($p \leq 0,01$). Durch arthroskopische

Beobachtung konnte bei allen zehn Leichenpräparaten festgestellt werden, dass der N. interosseus posterior die Mittellinie des Radiuskopfes mit Unterarmbewegung von Supination zu Pronation überquerte und sich von medial in Pronation zu lateral in Supination bewegte.

5.3 Ergebnisse zu „Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“ [88]

Die durchschnittlichen Schraubenneigungswinkel betragen $25,1 \pm 11,5^\circ$ vom anteromedialen Standardportal, $13,8 \pm 4,8^\circ$ vom distalen anteromedialen Portal, $17,1 \pm 13,4^\circ$ vom anterolateralen Standardportal und $-2,6 \pm 9,2^\circ$ vom distalen anterolateralen Portal. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Standard- und distalen Portalen wurden sowohl bei Messungen beobachtet, die von verschiedenen Operateuren an einem einzelnen Präparat wiederholt wurden (medial: $p = 0,049$; lateral: $p = 0,001$), als auch bei Messungen, die von einem einzelnen Untersucher an verschiedenen Präparaten wiederholt wurden (medial: $p = 0,009$; lateral: $p = 0,001$). Dies weist darauf hin, dass die modifizierten Portale es ermöglichen, einen Kirschner-Draht-Platzierungswinkel zu erreichen, der signifikant näher an dem der Gelenkfläche des Radiuskopfes liegt. Die modifizierten Portale, insbesondere das anteromediale, zeigten im Vergleich zu den Standardportalen eine höhere Präzision (Variationskoeffizient: anteromediales Standardportal: 10,0%; anteromedial distal: 4,6%; anterolaterales Standardportal: 12,5%; anterolateral distal: 10,6%). Bei der Bewertung von Messungen, die von einem einzelnen Prüfer wiederholt wurden, schien die Präzision für alle Portale ähnlich zu sein (Variationskoeffizient: anteromediales Standardportal: 5,5%; anteromedial distal: 6,1%; anterolaterales Standardportal: 7,7%; anterolateraler distaler: 7,1%).

5.4 Ergebnisse zu „Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“ [89]

Der durchschnittliche axiale Kontaktbogen, der vom anteromedialen Portal aus adressiert werden konnte, betrug $150 \pm 14,1^\circ$ (41,7% des Radiuskopfumfangs), während der vom anterolateralen Portal $257 \pm 29,5^\circ$ (71,4% des Radiuskopfumfangs) und der vom

midlateralen Portal $212,5 \pm 32,6^\circ$ (59,0% des Radiuskopfumfangs) betragen. In einer praktischen Annäherung unter Verwendung der sog. „Uhrreferenz“ bestand der axiale Kontaktbogen des anteromedialen Portals aus einem Winkel zwischen 8 Uhr und 1 Uhr, der des anterolateralen Portals zwischen 10 ½ und 7 Uhr und der des midlateralen Portals zwischen 2 Uhr und 9 Uhr.

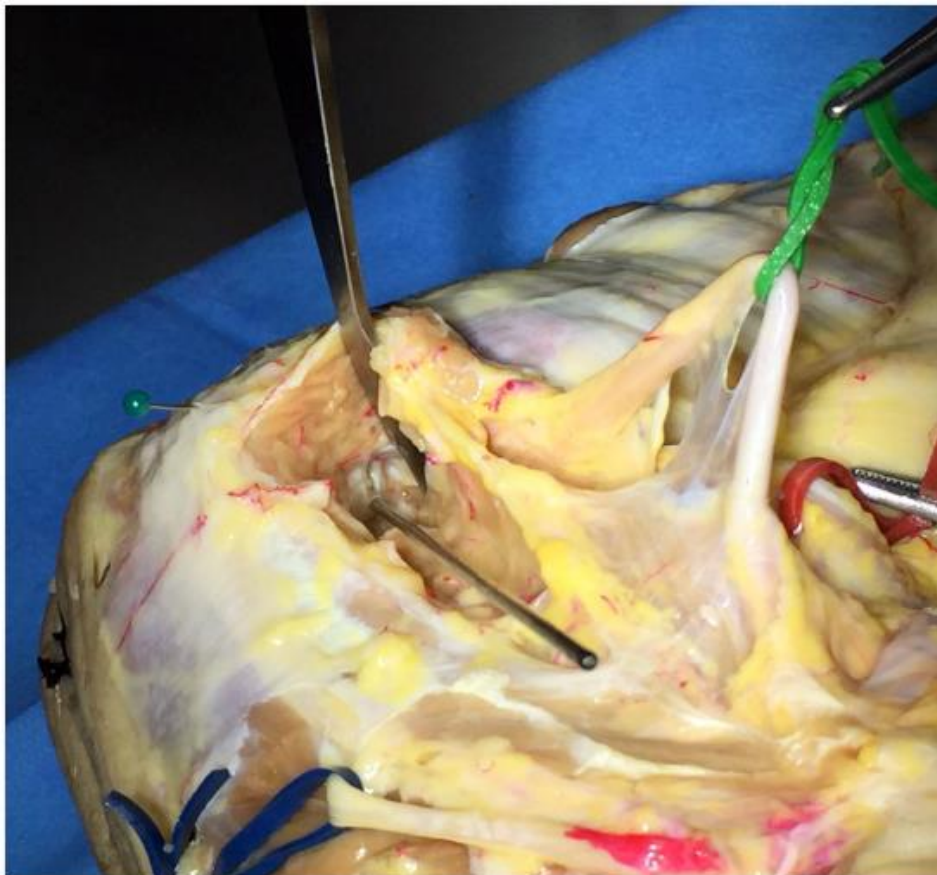


Originalabbildung aus [89]: durchschnittlicher axialer Kontaktbogen adressierbar vom anterolateralen (blau), anteromedialen (grün) und midlateralen (rot) Portal.

Ein signifikanter Unterschied konnte beim Vergleich des axialen Kontaktbogens der drei Portale festgestellt werden (anteromedial vs anterolateral: $p < 0,0001$; anteromedial vs midlateral: $p < 0,0001$; anterolateral vs midlateral: $p = 0,0025$). Unter Berücksichtigung aller drei Portale konnte der gesamte Radiuskopfumfang adressiert werden. Das anteromediale Portal zeigte den kleinsten Variationskoeffizienten (9,4%) im Vergleich zu den anterolateralen (11,5%) und den midlateralen (15,3%) Portalen.

5.5 Ergebnisse zu „Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“ [4]

Es wurden vier linke und zwei rechte Leichenpräparate mit einem medianen Todesalter von 75,5 Jahren [69,5 - 78,5] und einem medianen transepikondylären Abstand von 59,0 mm [51,0 - 66,3] evaluiert. Der Kirschner-Draht konnte ohne Komplikationen in den Coronoidfortsatz aller Präparate gebohrt werden und erreichte die gewünschte Position auf den nach dem Eingriff aufgenommenen seitlichen Röntgenaufnahmen. Eine Schädigung der A. brachialis, des N. medianus oder des N. ulnaris trat bei keinem Präparat auf. Ein für den Führungsdrahtdurchgang geeigneter Korridor zwischen dem M. brachialis und dem Septum intermuscolare brachii mediale und dem M. pronator teres konnte identifiziert werden .



Originalabbildung aus [4]: Dissektion nach erfolgreicher Platzierung des Kirschner-Drahtes ohne Gefährdung des N. medianus (grün), N. ulnaris (blau) und A. brachialis (rot).

6 Diskussion

6.1 Diskussion zu „Die Lageverhältnisse des Nervus medianus zum ulnaren Ansatz des Musculus brachialis: Sicherheitsaspekte und Auswirkungen auf die medialen Zugänge zum Ellenbogengelenk.“ [67]

Die Kenntnis der engen Lageverhältnisse des N. medianus zu leicht identifizierbaren Muskelstrukturen des anteromedialen Aspekts des Ellenbogens ist für alle offenen Zugänge wichtig. Auch in komplexen unfallchirurgischen Fällen, in denen das anteriore Knochenprofil der Ulna, die Ellenbogengelenkkapsel und der mediale Kollateralbandkomplex durch das Trauma beschädigt worden sein können, bleibt der Schaft der Ulna mit der distalen Insertion des M. brachialis als verlässliche Referenz erhalten. Diese ulnare Insertion variiert minimal, wobei die durchschnittliche Länge zwischen 21 mm und 44 mm liegt [103,104]. In unserer Studie wurde die ulnare Insertion des M. brachialis als zuverlässiger Orientierungspunkt bei der Identifizierung der Position des N. medianus während der chirurgischen Dissektion des medialen Aspekts des Ellenbogens bestätigt. Die von uns erhaltene Insertionslänge des M. brachialis liegt zwischen den Bereichen zuvor veröffentlichter Studien, was die Zuverlässigkeit dieser Struktur als reproduzierbaren Orientierungspunkt bestätigt. Ein weiteres relevantes Ergebnis dieser Studie war, dass sich die relative Position des N. medianus zur ulnaren Insertion des M. brachialis mit unterschiedlichen Graden der Ellenbogenflexion und Unterarmbewegungen ändert. Insbesondere ist hervorzuheben, dass der Abstand zwischen dem N. medianus und der ulnaren Insertion des M. brachialis mit gebeugtem Ellenbogen und neutraler Unterarmrotation maximal ist und mit der Ellenbogenstreckung unabhängig von Pronation und Supination signifikant abnimmt.

Hiermit aktualisiert unsere Studie die zuvor veröffentlichten Berichte, wie die kürzlich veröffentlichte Studie von Sukegawa et al., welche Orientierungspunkte zeigte, um den N. medianus in Bezug auf den Epicondylus medialis nach Durchtrennung der Flexor- und Pronatormuskeln leicht zu lokalisieren, jedoch ohne Berücksichtigung der Auswirkung der Unterarmposition auf den Abstand zwischen dem Nerv und den relevanten Orientierungspunkten [105]. Bislang untersuchten nur wenige Studien, wie sich Änderungen der Ellenbogen- und Unterarmposition auf die relative Position des N. medianus in Bezug auf mediale Orientierungspunkte auswirken, welche hauptsächlich auf einem arthroskopischen Modell basierten. In den publizierten Studien zeigt sich ein signifikant zunehmender Abstand des N. medianus zur anterioren Spitze des

Coronoidfortsatzes und zum anterioren Rand der Trochlea humeri ausgehend von der vollen Streckung bis zur 90 ° -Flexion. Das deutet darauf hin, dass die Position des Ellenbogens in einer 90 ° -Flexion das Risiko einer neurovaskulären Verletzung durch das Arthroskop reduziert [106,107]. Für die Rolle der Unterarmrotation wurden widersprüchliche Ergebnisse veröffentlicht, welche alle von Studien mit arthroskopischer Einstellung stammen und nur auf die Höhe der Ellenbogengelenklinie beschränkt waren. [106,108,109]. Unsere detaillierte anatomische Beschreibung und die Information, dass der N. medianus bei gebeugtem Ellenbogen und in neutraler Position des Unterarms von der ulnaren Insertion des M. brachialis weiter entfernt ist, deuten auf Modifikationen der zuvor beschriebenen offenen medialen Zugänge hin, die derzeit mit dem Ellenbogen in 30 ° Flexion und dem Epicondylus medialis in Richtung des Chirurgen durchgeführt werden [62,68,105]. Dank unserer Ergebnisse lässt sich empfehlen, solche Operationen mit dem Ellenbogen in höheren Flexionsgraden zu positionieren, da sich somit der Sicherheitsabstand zum N. medianus vergrößern lässt. Dieses anatomische Wissen ist für alle Zugänge für Prozeduren in der Nähe der ulnaren Insertion des M. brachialis relevant, z. B. die offene Reposition und interne Fixation von Coronoidfrakturen mittels Platten, insbesondere, wenn Schrauben in anteroposteriorer Richtung erforderlich sind oder der Coronoidersatz erfolgen muss [110–118].

6.2 Diskussion zu „Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101]

Laterale Zugänge zum Ellenbogengelenk sind eine vielseitige Option für die Fixation intraartikulärer Frakturen, die Entfernung von Osteophyten oder freien Gelenkkörpern, die Refixation oder Rekonstruktion der lateralen Bänder, die Radiuskopfresektion sowie die Implantation von Radiuskopfprothesen. Die Lage des N. interosseus posterior ist ein kritischer Faktor für jeden der zuvor genannten Eingriffe [69–71]. Kadaverstudien, die unter Verwendung verschiedener Zugänge zum proximalen Radius durchgeführt wurden, deuten darauf hin, dass der Abstand vom Humeroradialgelenk zu dem Punkt, an dem der N. interosseus posterior die laterale Mittellinie des Radiuskopfes kreuzt, bei voller Pronation höher ist als in neutraler Position und voller Supination [31,69,72,73,75,76]. Die Pronation wird daher allgemein als zuverlässige Methode zur Erhöhung der Sicherheitszone für alle offenen lateralen Zugänge empfohlen [74–76]. Dieses besondere

Verhalten, das in der offenen Chirurgie mehrmals beschrieben wurde, wurde jedoch nie bei der Arthroskopie verifiziert. Dennoch kann die Kenntnis dieses Verhaltens des N. interosseus posterior bei Unterarmbewegungen auch bei arthroskopischen Eingriffen hilfreich sein. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen, dass die in der offenen Chirurgie beschriebene Bewegung des N. interosseus posterior (Medialisierung mit Pronation) auch aus arthroskopischer Sicht auftritt, wobei der N. interosseus posterior die Mittellinie des Radiuskopfes mit Pronationsbewegungen des Unterarms kreuzt und sich in Pronation nach medial und in Supination nach lateral bewegt. Die Pronation des Unterarms wird daher weiterhin empfohlen, wenn extraartikuläre Eingriffe an der lateralen Seite des Radiuskopfes mit scharfen Instrumenten durchgeführt werden, z. B. beim Etablieren eines anterolateralen Portals, Einsetzen einer Schraube zur Frakturfixation oder Entfernen großer freier Gelenkkörper durch laterale Portale [40,41,74,91,92,119]. Als mögliche Alternative kann der Schutz des N. interosseus posterior erreicht werden, indem ein Retraktor durch ein zusätzliches proximales anterolaterales Portal (das sich ungefähr 3 cm proximal und 1 cm anterior des Epicondylus lateralis befindet) eingeführt und auf das Humeroradialgelenk gerichtet wird. Ein zweites relevantes Ergebnis dieser Studie war, dass der intraartikuläre Abstand zwischen dem N. interosseus posterior und dem Radiuskopf verglichen mit Messungen in Neutralposition und Pronation signifikant höher ist, wenn der Unterarm in maximaler Supination gedreht wird. Dieser Befund impliziert, dass es ratsam ist, im Gegensatz zu extraartikulären Verfahren, den Unterarm vollständig zu supinieren, um einen breiteren sicheren intraartikulären Arbeitsraum zu erhalten, da die Supination den Abstand zwischen dem N. interosseus posterior und dem anterioren Anteil des Radiuskopfes vergrößert.

6.3 Diskussion zu „Modifizierte anteromediale und anterolaterale Ellenbogenarthroskopieportale zeigen eine Überlegenheit gegenüber Standardportalen bei der Steuerung der arthroskopischen Radiuskopfschraubenfixation.“ [88]

Frakturen des Radiuskopfes treten häufig auf und eine verzögerte oder unangemessene Behandlung kann zu einer Einschränkung der Unterarmrotation mit anschließender Behinderung bei Alltags- und Arbeitsaktivitäten führen. Eine arthroskopische Fixation kann für Frakturen mit maximal 2 Fragmenten in Betracht gezogen werden [53]. Diese Technik ist eine vielversprechende Alternative zur offenen Reposition bei Radiuskopffrakturen, die mit Zugschrauben stabilisiert werden können, da sie die Gelenkoberfläche des

Radiuskopfes direkt sichtbar macht, die Behandlung anderer intraartikulärer Pathologien ermöglicht und das chirurgische Trauma reduziert [120–125]. Daher sind die Ergebnisse für die arthroskopische Fixation von Radiuskopffrakturen ermutigend, obwohl diese Technik erst kürzlich eingeführt wurde [120,122,126–129]. Im Gegensatz zu den zahlreichen Implantaten, die bei offenen Operationen erhältlich sind, wird die arthroskopisch unterstützte Osteosynthese des Radiuskopfes praktisch immer mit kanülierten kopflosen Zugschrauben durchgeführt, die über einen Kirschner-Führungsdraht eingeführt werden. Um eine optimale arthroskopische Behandlung zu gewährleisten, müssen die Fixationsvorrichtungen ordnungsgemäß platziert werden. Bei Knochensegmenten, die keinen axialen Belastungen ausgesetzt sind, erreichen Zugschrauben ihre höchste Primärstabilität, wenn sie senkrecht zur Frakturfläche ausgerichtet sind. Da die meisten Radiuskopffrakturen senkrecht zur Gelenkfläche des Radiuskopfes verlaufen, liegt die ideale Schraubenneigung in einem Winkel von 0° zu der Gelenkfläche selbst [54].

Die Platzierung des Kirschner-Führungsdrahtes, der die Richtung der Schrauben definiert, ist ein herausfordernder chirurgischer Schritt, da er durch die Position der etablierten Portale definiert und eingeschränkt wird und nur eine geringe Weichteilverschiebbarkeit vorhanden ist [25]. Das wichtigste Ergebnis dieser Studie ist, dass es Modifikationen an den anterolateralen und anteromedialen Standardportalen für Ellenbogenarthroskopie ermöglichen, Führungsdrähte für kanülierte Schrauben in einem flacheren Winkel, fast parallel zur Gelenkfläche des Radiuskopfes, zu platzieren. Dies steht im Gegensatz zur Verwendung von Standardportalen. Darüber hinaus zeigte diese Studie eine gute Reproduzierbarkeit dieser Operationstechnik mit einer höheren Präzision für die modifizierten Portale im Vergleich zur Verwendung von Standardportalen. Modifikationen der Standardportale wurden bereits insbesondere lateral beschrieben, , aber die Rolle der Portalmodifikation bei der Unterstützung der Schraubenplatzierung wurde noch nie diskutiert. Unsere Untersuchung zeigt zum ersten Mal, dass Änderungen in der Portaletablierung die Platzierung von Implantaten erheblich und günstig beeinflussen können und den durchschnittlichen Schraubenneigungswinkel sehr nahe an den idealen Zielwert von 0° bringen können [4,130,131].

Alternativ zu den vorderen Portalen kann auch eine Fixation über ein midlaterales Portal in Betracht gezogen werden. Das Ligamentum anulare radii ist jedoch in seinem hinteren Teil weniger beweglich, was den Verlauf der Schrauben erheblich beeinträchtigen kann.

6.4 Diskussion zu Eine Kombination aus anteromedialen, anterolateralen und midlateralen Portalen ist ausreichend für eine 360 ° -Exposition des Radiuskopfes zur arthroskopischen Frakturfixation.“ [89]

Die arthroskopische Fixation von Radiuskopffrakturen ist eine Alternative zur offenen Reposition für ausgewählte Frakturtypen. Mit der arthroskopischen Technik können temporäre oder definitive Fixationsimplantate wie Kirschner-Drähte, Schrauben oder Pins aus verschiedenen Arthroskopieportalen in den Radiuskopf eingeführt werden. Jedes Portal ermöglicht, einen anderen Bereich des Radiuskopfes zu adressieren, und die Unterarmdrehung ermöglicht, einen variablen Arbeitsbereich („axialer Kontaktbogen“), für die Platzierung von Fixationssvorrichtungen von jedem Portal aus zu erreichen. Das Wissen darüber, auf welchen Bereich des Radiuskopfes jedes Portal zugreifen kann, liefert Informationen für die präoperative Planung und kann auch die Grenzen der arthroskopischen Versorgung definieren. In der offenen Chirurgie ist gut dokumentiert, dass unterschiedliche Grade der Unterarmrotation ermöglichen, verschiedene Teile des Radiuskopfes darzustellen. In der Arthroskopie haben Hodax et al. eine erste anatomische Bewertung des Arbeitsbereichs der anterolateralen und anteromedialen Portale geliefert - das erste Portal ermöglichte den Zugang zu ungefähr 156 ° des Radiuskopfes, das zweite zu 147 °. Die Überlagerung beider Bereiche zeigte, dass diese beiden Portale einen durchschnittlichen Bogen von 220 ° abdecken können [132]. Unsere Studie aktualisiert diese Ergebnisse und zeigt, dass der gesamte Radiuskopfumfang bei geeigneter Verwendung von anterolateralen, anteromedialen und midlateralen Standardportalen effektiv zur Fixation von Radiuskopffrakturen adressiert werden kann. Durch die Kombination der drei arthroskopischen Standardportale konnte in dieser Studie auch der 140 ° Bogen auf der Ulnarseite des Radiuskopfes adressiert werden, der zuvor als nicht zugänglich beschrieben wurde [132]. Beim Vergleich von den Portalen bot das anterolaterale Portal einen überlegenen axialer Kontaktbogen und ermöglichte, mehr als zwei Drittel des Radiuskopfumfangs zu erreichen. Dies ist relevant, da die meisten Radiuskopffrakturen den anterolateralen Quadranten des Kopfes betreffen, auf den am besten über das anterolaterale Portal zugegriffen werden kann [133–135]. Darüber hinaus wird in seinem anterioren Teil, der am weitesten von den Ulnarinsertionen und dem lateralen Kollateralbandkomplex entfernt ist, der Verlauf des Ligamentum anulare radii distaler in Bezug auf die Gelenkebene, was eine günstigere Portalplatzierung für die Schraubeninsertion ermöglichen kann [136,137]. Ein weiterer innovativer Aspekt dieser Studie war die Bewertung der Variabilität zwischen Chirurgen über den axialen

Kontaktbogen, der von jedem Portal aus arthroskopisch angegangen werden kann. Die beste Übereinstimmung unter den Operateuren wurde für das anteromediale Portal und die niedrigste für das midlaterale Portal dokumentiert.

6.5 Diskussion zu „Keine neurovaskulären Schäden entstehen nach Etablierung eines zusätzlichen anteromedialen Portals zur arthroskopischen Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen.“ [4]

Diese Studie beschrieb die Sicherheit einer neuen Technik für die Platzierung eines Führungsdrahtes zur Stabilisierung von Frakturen des Coronoidfortsatzes in einer vollständig arthroskopischen Technik, ohne neurovaskuläre Strukturen zu gefährden. Klassische chirurgische Techniken um den Coronoidfortsatz zu erreichen, die Fraktur zu reponieren und sie mit Schrauben oder einer Platte zu fixieren erfordern einen anterioren oder medialen offenen Zugang [12,13,55,56]. Dies kann technisch schwierig sein und die verbleibende anteriore Kapsel und die Blutversorgung der Knochenfragmente beschädigen [13,56,57]. Seit ihrer Einführung wurde die Ellenbogenarthroskopie verwendet, um die Reposition und Fixation von Coronoidfrakturen zu unterstützen, und es wurden zahlreiche verschiedene arthroskopisch unterstützte Techniken zur Fixation von Coronoidfrakturen entwickelt [83–85]. Es war jedoch noch in keiner Technik möglich, die Vorteile einer direkten antegraden Fixation des Frakturfragments (welche eine optimale Bestimmung der Implantatposition ermöglicht) mit der Fixation mit einer retrograden kanülierten Schraube vom dorsalen Aspekt der Ulna (welche die biomechanisch überlegene Fixationsvorrichtung ist) zu kombinieren [86]. Die Einführung eines sicheren und reproduzierbaren arthroskopischen antegraden Fixationssystems, wie das in dieser Studie beschriebene, kann die visuelle Kontrolle über die Fixation des Coronoidfortsatzes und die Präzision der Reposition verbessern. Im Vergleich zu zuvor beschriebenen, ähnlichen Techniken, wie der "Wechselstab" Technik, ist mit diesem neuen Ansatz die Notwendigkeit eines anterioren Zuganges überflüssig [57]. Die Sicherheit und Reproduzierbarkeit der Technik wird durch mehrere Schritte gewährleistet, die den Schutz der empfindlichen neurovaskulären Strukturen im anterioren Bereich des Ellenbogens sicherstellen: Verwendung eines Kanülensystems, Etablierung des zusätzlichen anteromedialen Portals in eine „sichere Zone“ weit entfernt von der Mittellinie, Einführung des Kirschner-Drahtes senkrecht zur Längsachse des Arms, bis der Kontakt mit der anterioren Kortikalis des Humerus erreicht ist, und Erhalt des konstanten Kontaktes des

Kirschner-Drahtes mit der anterioren Kortikalis des Humerus, bis die Ellenbogenkapsel erreicht wird. Um maximale Sicherheit zu gewährleisten, empfehlen wir außerdem, beim Einführen des Kirschner-Drahtes, das Ellenbogengelenk zu beugen, damit die Spannung auf Blutgefäße und Nerven verringert und der Abstand des N. medianus zur Kapsel vergrößert wird [25]. Die Sicherheit und Machbarkeit dieser Technik wurde im Anschluss an die Durchführung der dargestellten Studie in vivo bei sieben Patienten bewertet [3].

6.6 Limitationen der zusammengelegten Studien

Die vorgestellten anatomischen Studien weisen einige Limitationen auf. Das Alter der Patienten, die sich normalerweise einer Ellenbogenoperation unterziehen, ist niedriger als das der eingeschlossenen Leichenpräparate. Das Altern sollte jedoch weder die Position und das Verhalten der Nerven noch die Dehnbarkeit der Kapsel- und Bandstrukturen signifikant beeinflussen. Zweitens war die Anzahl der untersuchten Präparate begrenzt: dies könnte die Verzerrung in Bezug auf anatomische Varianten, Vorbereitung und Dissektionstechnik verstärken. Um die Variabilität im Zusammenhang mit dem chirurgischen Eingriff zu minimieren, wurden Chirurgen mit umfassender Erfahrung in der Ellenbogenchirurgie zur Durchführung der Eingriffe ausgewählt, und erforderlichenfalls wurden Präparationen akribisch genau durchgeführt und auf ein Minimum beschränkt. Schließlich waren die Studien nicht darauf ausgelegt, die Auswirkungen systemischer Bindegewebserkrankungen oder lokaler pathologischer Veränderungen auf das Weichgewebe der medialen und lateralen Seite des Ellenbogens zu erfassen. Trotzdem wurde darauf geachtet, die Leichenpräparate auf sichtbare Anzeichen eines früheren Traumas, einer Hyperlaxizität, einer groben Instabilität oder einer Deformität zu untersuchen. Eine besondere Einschränkung der Studie „Der Nervus interosseus posterior kreuzt die Mittellinie des Radiuskopfes und vergrößert seinen Abstand zu knöchernen Strukturen mit der Supination des Unterarms“. [101] war die Notwendigkeit, die anteriore Gelenkkapsel zu entfernen, um den N. interosseus posterior sichtbar zu machen und zu messen, was eine unvermeidliche Verzerrung in einem anatomischen Modell darstellt. Derzeit haben noch keine Studien untersucht, ob der N. interosseus posterior nach Kapsulektomie mehr oder weniger beweglich wird. Eine besondere Einschränkung der beiden Studien, die sich mit der Präzision der Kirschner-Drahtplatzierung im Radiuskopf befassen [88,89], besteht darin, dass die Vorbereitung der Arthroskopie und die Etablierung der Portale von einem einzigen Operateur durchgeführt wurde, die

anschließende Prozedur jedoch durch mehrere andere Chirurgen erfolgte. Da minimale, erfahrungsbasierte Variationen der Standardportale möglich sind, könnten Chirurgen durch die zuvor bereits gesetzten Portale und die sich daraus gegebenenfalls ergebenden Abweichungen zu ihren Erfahrungswerten etwas verunsichert worden sein.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Behandlung intraartikulärer proximaler Unterarmfrakturen ist eine besondere Herausforderung für den behandelnden Arzt. Bei allen chirurgischen Zugängen am Ellenbogen ist der Nervenschutz während der Exposition ein kritischer Faktor. Sobald die Fraktur stabilisiert wurde, spielt die Präzision der Implantatplatzierung eine entscheidende Rolle für den Erfolg der Operation, da der Coronoidfortsatz und der Radiuskopf, trotz ihrer geringen Größe eine extreme Bedeutung für die Stabilität und Funktion des Ellenbogens haben. In der Tat können Verletzungen des Coronoidfortsatzes und des Radiuskopfes bei falscher Diagnose oder inadäquater Behandlung zu Behinderungen, einschließlich einer posttraumatischen Gelenkdegeneration, Instabilität, Steife und Einschränkungen der Unterarm- und Handfunktion führen.

Daher sollte die optimale Behandlung zeitgerecht erfolgen und einen gewebeschonenden Zugang verwenden, der die drei Hauptnerven berücksichtigt, die das Ellenbogengelenk kreuzen. Darüber hinaus sollte die Platzierung von Fixationsimplantaten auf hochpräzise Weise und in der biomechanisch besten Position erfolgen.

Die klassische offene Reposition und interne Fixation ist ein Grundpfeiler für die meisten Frakturen am Ellenbogen. Trotzdem kann bei bestimmten Frakturtypen die arthroskopische Fixation von intraartikulären proximalen Unterarmfrakturen eine zuverlässige Alternative sein. Die Arthroskopie ermöglicht die direkte Visualisierung der Gelenkoberflächen, verbessert das Verständnis der Morphologie der Fraktur und führt zu einer geringeren Schädigung der Weichteile und der Blutversorgung, welche möglicherweise die Heilung verbessern und den Bedarf an Analgetika und den Krankenhausaufenthalt verringern kann. Unabhängig von der Art der Operation (offen oder arthroskopisch) ist ein kritischer Punkt aller Eingriffe die Notwendigkeit, die Nervenstrukturen zu schonen, insbesondere den N. medianus auf der medialen Seite und den N. interosseus posterior auf der lateralen Seite. Die vorgestellten Studien ermöglichten es, das verfügbare Wissen über den Nervenschutz beim Ellenbogen sowohl für die offenen als auch für die arthroskopischen Zugänge zu aktualisieren und Techniken zu definieren, welche die Präzision der Implantatplatzierung für die Frakturfixation erhöhen.

Der Schutz des N. medianus ist ein Schlüsselaspekt bei allen Prozeduren am Coronoidfortsatz. Bei offenen Zugängen an der Basis des Coronoidfortsatzes ist häufig eine erweiterte Dissektion erforderlich, die diesen Nerv möglicherweise gefährden kann.

Wir konnten zeigen, dass die ulnare Insertion des M. brachialis als zuverlässige Referenz zur Definition einer sicheren Zone zum Schutz des N. medianus verwendet werden kann, und wirksame Modifikationen der häufig verwendeten Zugänge zum medialen Ellenbogen vorschlagen, um die Sicherheit durch erhöhte Flexion zu erhöhen [67].

Auf der arthroskopischen Seite wurde eine neue Methode zur arthroskopisch unterstützten Fixation von Coronoidfrakturen durch ein zusätzliches anteromediales Portal vorgestellt, welche durch bestimmte in dieser Technik beschriebene Schritte ausreichenden Schutz des N. medianus bietet [4] und deren Sicherheit und Wirksamkeit später auch im klinischen Umfeld nachgewiesen wurden [3]. Der Nervenschutz ist auch auf der radialen Seite des Ellenbogens ein wichtiges Thema. Hier ist die Kenntnis der engen Beziehung des N. interosseus posterior zum Radiuskopf und zum M. supinator ein bekannter Aspekt jedes offenen Zugangs. Die in der offenen Chirurgie gewonnenen Erfahrungen zeigten, dass sich der Nerv bei maximaler Pronation des Unterarms anteromedial verschieben lässt und die „sichere Zone“ des Zuganges somit vergrößert. Wir konnten bestätigen, dass dieses Verhalten auch in einer arthroskopischen Einstellung [101] vorliegt, wodurch die Empfehlung „Schutz mit Pronation“ auf alle Situationen ausgedehnt wird, in denen extraartikuläre Eingriffe mit scharfen Instrumenten an der lateralen Seite des Ellenbogens durchgeführt werden sollen, wie z.B. die Etablierung anterolateraler Portale, Einführung von Kirschner-Drähten oder -Schrauben zur Frakturfixation oder Entfernen von Knochenfragmenten oder freien Gelenkkörpern durch laterale Portale.

Ein weiteres innovatives Ergebnis dieser Studie war, dass der intraartikuläre Sicherheitsabstand zwischen dem anterioren Teil des Radiuskopfes und der anterolateralen Ellenbogenkapsel, hinter der der N. interosseus posterior liegt, mit der Supination im Vergleich zur Pronation zunimmt [101,106,138]. Daher wird bei arthroskopischen intraartikulären Prozeduren an der lateralen Seite des Ellenbogens eine Supination zusammen mit einer Ellenbogenflexion empfohlen, um den Arbeitsraum und somit die Sicherheit zu erhöhen. Als Alternative oder Ergänzung zur Unterarmpronation kann ein Retraktor durch ein zusätzliches proximales anterolaterales Portal eingeführt werden, durch das die vordere Kapsel nach anteromedial verschoben werden kann. Durch die Erweiterung des sicheren Arbeitsraumes können bei Eingriffen an der lateralen Seite des Ellenbogens, wie z. B. die Osteosynthese von Radiuskopffrakturen, Fehlstellungen aufgrund einer eingeschränkten Sicht minimiert werden.

Die Präzision der Implantatplatzierung ist ein weiteres kritisches Problem bei der arthroskopisch unterstützten Fixation von Radiuskopffrakturen, hauptsächlich weil die

Schraubenposition durch die Position des Portals bestimmt und eingeschränkt wird. Sobald ein Portal etabliert wird, sind aufgrund der begrenzten Verschiebung des Weichgewebes und der Interferenz des Ligamentum anulare radii, der Plica radiocapitellaris und der darüber liegenden Muskeln nur minimale Abweichungen im Verlauf zwischen Portal und Radiuskopfoberfläche zulässig. Der Widerstand all dieser Strukturen, insbesondere des Ligamentum anulare radii, kann ausreichen, um die dünnen Kirschner-Drähte, die zur Führung der kanülierten Schraubenplatzierung verwendet werden, von der gewünschten Richtung abzubringen. Eine sorgfältige Auswahl des chirurgischen Zuganges ist daher für ein schnelles und erfolgreiches Verfahren von größter Bedeutung.

Die meisten Frakturen des Radiuskopfes betreffen den anterolateralen Quadranten, wodurch die anterioren Portale am vielseitigsten sind [135]. Eine Minderheit der Frakturen betrifft jedoch auch die anderen Quadranten, die von einem posterioren Portal aus fixiert werden können. Bei der chirurgischen Planung und Durchführung sind die Auswahl der geeigneten Portale relevante Faktoren für eine erfolgreiche Operation. Zu diesem Zweck konnten wir zeigen, dass der gesamte Radiuskopfumfang zur Fixation von Radiuskopffrakturen unter angemessener Verwendung von anterolateralen, anteromedialen und midlateralen Portalen und angemessenen Pronations- und Supinationsmanövern des Unterarms effektiv adressiert werden kann.

Das anterolaterale Portal bietet im Vergleich zu den anteromedialen und midlateralen Portalen einen breiteren axialen Kontaktbogen zum Radiuskopf und ermöglicht aufgrund seines engen Lageverhältnisses zum Radiuskopf und der Tatsache, dass das Ligamentum anulare radii dort am beweglichsten ist, mehr als die Hälfte des Radiuskopfumfangs zu adressieren [89]. Es wurden verschiedene Variationen des anterolateralen Portals vorgeschlagen. Insbesondere konnten wir zeigen, dass die Etablierung des anterolateralen Portals in einer distaleren Position (1 cm proximal und 1 cm anterior des Epicondylus lateralis) es ermöglicht, Führungsdrähte für kanülierte Schrauben in einem „flacheren“ Winkel zu platzieren; somit können die üblicherweise verwendeten Zugschrauben ihre höchste Primärstabilität erreichen, wodurch die biomechanische Leistung der Fixation verbessert wird. Ein distales anterolaterales Portal schien reproduzierbar und präzise zu sein, was auf ein Potenzial für eine bessere intraoperative Behandlung von Frakturfragmenten hinweist [88].

Auf der anderen Seite ermöglicht das anteromediale Portal den Zugang zu ungefähr 150 ° des Radiuskopfumfangs, wobei der gesamte anteromediale Quadrant abgedeckt wird, und

es scheint das reproduzierbarste Portal unter verschiedenen Operateuren zu sein. Darüber hinaus ermöglicht die sehr dehnbare Kapsel im anteromedialen Bereich des Ellenbogens einen breiten sicheren Arbeitsraum, der dem der anterolateralen und midlateralen Portale überlegen ist [89]. Ein Retraktor, der durch ein akzessorisches anteromediales Portal eingeführt wird, kann den Arbeitsraum weiter vergrößern und die vordere Kapsel nach vorne verschieben. Ähnlich wie beim anterolateralen Portal, ermöglicht eine Distalisierung des anteromedialen Standardportals auch die Platzierung von Kirschner-Drähten in einem „flacheren“ Winkel, was eine bessere Platzierung der Schrauben in Bezug auf die Gelenkfläche des Radiuskopfs ermöglicht.

Alle in der vorliegenden Habilitationsschrift zusammengefassten Arbeiten ermöglichen es, sowohl für die offenen als auch für die arthroskopischen Zugänge das verfügbare Wissen über den Nervenschutz um den Ellenbogen zu aktualisieren und Techniken zur Verbesserung der Genauigkeit der Implantatplatzierung für Frakturfixation aufzuzeigen. Diese Studien zeigen und diskutieren neue Optionen, welche die Sicherheit und Präzision bei der chirurgischen Behandlung von intraartikulären proximalen Unterarmfrakturen erhöhen, um für Patienten die optimale und am wenigsten invasive Behandlungsstrategie wählen zu können.

8 Literaturverzeichnis

1. Zimmerman, N.B. (2002). Clinical application of advances in elbow and forearm anatomy and biomechanics. *Hand Clin.* 18, 1–19.
2. Karbach, L.E., and Elfar, J. (2017). Elbow Instability: Anatomy, Biomechanics, Diagnostic Maneuvers, and Testing. *J. Hand Surg. Am.* 42, 118–126.
3. Luceri, F., Lesman, J.J., Cucchi, D., Dom, M., Randelli, P.S., and Arrigoni, P. (2020). Antegrade Reduction and Fixation of Coronoid Fractures : A New Arthroscopic Technique. *Tech. Shoulder Elbow Surgery*, 21, 1–5.
4. Arrigoni, P., Cucchi, D., Guerra, E., Luceri, F., Nicoletti, S., Menon, A., and Randelli, P. (2019). No neurovascular damage after creation of an accessory anteromedial portal for arthroscopic reduction and fixation of coronoid fractures. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 27, 314–318..
5. Cucchi, D., Luceri, F., Celli, A., Menon, A., Barco, R., Wegmann, K., Randelli, P., Eygendaal, D., Arrigoni, P., Pederzini, L., *et al.* (2020). Fracture Pattern Influences Radial Head Replacement Size Determination Among Experienced Elbow Surgeons. *Indian J. Orthop.* 54, 539–547.
6. Sukegawa, K., Suzuki, T., Ogawa, Y., Ueno, K., Kiuchi, H., Kanazuka, A., Matsuura, Y., and Kuniyoshi, K. (2016). Anatomic cadaveric study of the extensile extensor digitorum communis splitting approach for exposing the ulnar coronoid process. *J. Shoulder Elbow Surg.* 25, 1268–1273.
7. Kiene, J., Bogun, J., Brockhaus, N., Waizner, K., Schulz, A.-P., and Wendlandt, R. (2014). Biomechanical testing of a novel osteosynthesis plate for the ulnar coronoid process. *Shoulder Elb.* 6, 191–9.
8. Farr, S., Rois, J., Ganger, R., and Girsch, W. (2016). Reconstruction for elbow instability caused by congenital aplasia of the ulnar coronoid process--a case report. *Acta Orthop.* 87, 85–6.
9. O'Driscoll, S.W., Jupiter, J.B., Cohen, M.S., Ring, D., and McKee, M.D. (2003). Difficult elbow fractures: pearls and pitfalls. *Instr. Course Lect.* 52, 113–34.
10. O'Driscoll, S.W., Bell, D.F., and Morrey, B.F. (1991). Posterolateral rotatory instability of the elbow. *J. Bone Joint Surg. Am.* 73, 440–6.
11. Doornberg, J., Ring, D. (2006). Coronoid fracture patterns. *J. Hand Surg.* 31, 45–52.
12. Sanchez-Sotelo, J., O'Driscoll, S.W., Morrey, B. (2005). Medial oblique compression fracture of the coronoid process of the ulna. *J. Shoulder Elbow Surg.* 14, 60–4.

13. Pugh, D.M.W., Wild, L.M., Schemitsch, E.H., King, G.J.W., and McKee, M.D. (2004). Standard surgical protocol to treat elbow dislocations with radial head and coronoid fractures. *J. Bone Joint Surg. Am.* *86-A*, 1122–30.
14. Closkey, R.F., Goode, J.R., Kirschenbaum, D., and Cody, R.P. (2000). The role of the coronoid process in elbow stability. A biomechanical analysis of axial loading. *J. Bone Joint Surg. Am.* *82-A*, 1749–53.
15. Hull, J.R., Owen, J.R., Fern, S.E., Wayne, J.S., and Boardman, N.D. (2005). Role of the coronoid process in varus osteoarticular stability of the elbow. *J. Shoulder Elbow Surg.* *14*, 441–6.
16. Jeon, I.H., Sanchez-Sotelo, J., Zhao, K., An, K.N., and Morrey, B.M. (2012). The contribution of the coronoid and radial head to the stability of the elbow. *J. Bone Joint Surg. Br.* *94-B*, 86–92.
17. Regan, W., and Morrey, B.F. (1992). Classification and Treatment of coronoid process fractures. *Orthopedics* *15*, 845–848.
18. Hackl, M., Wegmann, K., Kahmann, S.L., Heinze, N., Staat, M., Neiss, W.F., Scaal, M., and Müller, L.P. (2017). Radial shortening osteotomy reduces radiocapitellar contact pressures while preserving valgus stability of the elbow. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* *25*, 2280–2288.
19. Morrey, B.F., An, K.N., and Stormont, T.J. (1988). Force transmission through the radial head. *J. Bone Joint Surg. Am.* *70*, 250–6.
20. Hilgersom, N.F.J., Eygendaal, D., and van den Bekerom, M.P.J. (2017). Is radial head resection the first choice treatment of comminuted radial head fractures without associated instability? *Injury* *48*, 560–562.
21. Mason, M.L. (1954). Some observations on fractures of the head of the radius with a review of one hundred cases. *Br. J. Surg.* *42*, 123–32.
22. Hotchkiss, R. (1997). Displaced Fractures of the Radial Head: Internal Fixation or Excision? *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* *5*, 1–10.
23. Gunther, S.F., DiPasquale, D., and Martin, R. (1992). The internal anatomy of the median nerve in the region of the elbow. *J. Hand Surg. Am.* *17*, 648–656.
24. Hackl, M., Lappen, S., Burkhart, K.J., Neiss, W.F., Müller, L.P., and Wegmann, K. (2015). The course of the median and radial nerve across the elbow: an anatomic study. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* *135*, 979–983.
25. Malagelada, F., Dalmau-Pastor, M., Vega, J., and Golanó, P. (2014). Elbow Anatomy. In *Sports Injuries*, M. N. Doral and J. Karlsson eds. (Springer), pp. 1–30.

26. Canovas, F., Mouilleron, P., and Bonnel, F. (1998). Biometry of the muscular branches of the median nerve to the forearm. *Clin. Anat.* 11, 239–245.
27. Agarwal, S., Tuli, A., and Raheja, S. (2011). Communication between median and musculocutaneous nerves in the forearm hooking around the origin of the median artery: a rare variation. *Anat. Sci. Int.* 86, 175–7.
28. Kazuki, K., Egi, T., Okada, M., and Takaoka, K. (2004). Anatomic variation--a bony canal for the median nerve at the distal humerus. *J. Hand Surg. Am.* 29, 953–6.
29. Ozkan, M., Bacakoğlu, a K., Gül, O., Ekin, A., Mağden, O., Özkan, M., Bacakoğlu, A.K.K., Gül, Ö., Ekin, A., and Mağden, O. (1999). Anatomic study of posterior interosseous nerve in the arcade of Frohse. *J. Shoulder Elbow Surg.* 8, 617–620.
30. Clavert, P., Lutz, J.C., Adam, P., Wolfram-Gabel, R., Liverneaux, P., and Kahn, J.L. (2009). Frohse's arcade is not the exclusive compression site of the radial nerve in its tunnel. *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 95, 114–8. A
31. Lawton, J.N., Cameron-Donaldson, M., Blazar, P.E., and Moore, J.R. (2007). Anatomic considerations regarding the posterior interosseous nerve at the elbow. *J. Shoulder Elbow Surg.* 16, 502–507.
32. Thomas, S.J., Yakin, D.E., Parry, B.R., and Lubahn, J.D. (2000). The anatomical relationship between the posterior interosseous nerve and the supinator muscle. *J. Hand Surg. Am.* 25, 936–941.
33. Spinner, M. (1968). The arcade of Frohse and its relationship to posterior interosseous nerve paralysis. *J. Bone Joint Surg. Br.* 50, 809–12.
34. Gagliardo, A., and Granata, G. (2016). Posterior interosseous nerve anatomical variation: A possible protective factor for injuries. *Muscle Nerve* 53, 154–5.
35. Daurka, J., Chen, A., Akhtar, K., and Kamineni, S. (2009). Tardy posterior interosseous nerve palsy associated with radial head fracture. *Cases J.* 2, 22.
36. Erra, C., De Franco, P., Granata, G., Coraci, D., Briani, C., Paolasso, I., and Padua, L. (2016). Secondary posterior interosseous nerve lesions associated with humeral fractures. *Muscle Nerve* 53, 375–8.
37. Van Geertruyden, J.P., and Vico, P.G. (1996). Iatrogenic posterior interosseous nerve palsy following an elbow fracture. *Acta Orthop. Belg.* 62, 222–4.
38. Saldua, N., Carney, J., Dewing, C., and Thompson, M. (2008). The Effect of Drilling Angle on Posterior Interosseous Nerve Safety During Open and Endoscopic Anterior Single-Incision Repair of the Distal Biceps Tendon. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.* 24, 305–310.

39. Lo, E.Y., Li, C.-S., and Van den Bogaerde, J.M. (2011). The Effect of Drill Trajectory on Proximity to the Posterior Interosseous Nerve During Cortical Button Distal Biceps Repair. *Arthroscopy* 27, 1048–1054.
40. Gupta, A., and Sunil, T.M. (2004). Complete division of the posterior interosseous nerve after elbow arthroscopy: A case report. *J. Shoulder Elbow Surg.* 13, 566–567.
41. Mercer, D.M., Baldwin, E.D., and Moneim, M.S. (2015). Posterior interosseous nerve laceration following elbow arthroscopy. *J. Hand Surg. Am.* 40, 624–6.
42. Kane, E., Kaplan, E., and Spinner, M. (1973). Observations of the course of the ulnar nerve in the arm. *Ann. Chir.* 27, 487–496.
43. Hahn, M., and Grossman, J.A.I. (1998). Ulnar Nerve Laceration as a Result of Elbow Arthroscopy. *J. Hand Surg. Am.* 23, 109–109.
44. Hilgersom, N.F.J., van Deurzen, D., Gerritsma, C., van der Heide, H., Malessy, M., Eygendaal, D., and van den Bekerom, M.P.J. (2018). Nerve injuries do occur in elbow arthroscopy. *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.* 26, 318–324.
45. Hilgersom, N.F.J., Cucchi, D., Luceri, F., van den Bekerom, M.P.J., Oh, L.S., Arrigoni, P., and Eygendaal, D. (2019). Locating the ulnar nerve during elbow arthroscopy using palpation is only accurate proximal to the medial epicondyle. *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.* 27, 3254–3260.
46. Schneeberger, A.G., Sadowski, M.M., and Jacob, H.A.C. (2004). Coronoid process and radial head as posterolateral rotatory stabilizers of the elbow. *J. Bone Joint Surg. Am.* 86-A, 975–82.
47. Deutch, S.R., Jensen, S.L., Tyrdal, S., Olsen, B.S., and Sneppen, O. Elbow joint stability following experimental osteoligamentous injury and reconstruction. *J. shoulder Elb. Surg.* 12, 466–71.
48. Jeon, I.-H., Oh, C.-W., and Kim, P.-T. (2004). Minimal invasive percutaneous plate osteosynthesis for complex monteggia fracture with type III coronoid process fracture. *Injury* 35, 631–3.
49. Garrigues, G., Wray, W., Lindenhovius, A., Ring, D., Ruch, D. (2011). Fixation of the coronoid process in elbow fracture-dislocations. *J. Bone Joint Surg. Am.* 93, 1873–81.
50. Han, S.-H., Yoon, H.-K., Rhee, S.-Y., and Lee, J.-K. (2013). Anterior approach for fixation of isolated type III coronoid process fracture. *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* 23, 395–405.
51. Vishwanath, J., Agarwal, A., Mehtani, A., and Kapoor, S.K. (2002). Isolated type IIIA fracture of the coronoid process of ulna. A case report and brief review of literature.

- Arch. Orthop. Trauma Surg. 122, 184–5.
52. Smith, G.R., and Hotchkiss, R. Radial head and neck fractures: anatomic guidelines for proper placement of internal fixation. *J. Shoulder Elbow Surg.* 5, 113–7.
 53. Thès, A., and Hardy, P. (2016). Elbow Fractures Treatment. In *Arthroscopy*, P. Randelli, D. Dejour, C. N. van Dijk, M. Denti, R. Seil, eds. (Springer), pp. 725–732.
 54. Ruedi, T., and Buckley, R. (2007). *AO Principles of Fracture Management* (Thieme)
 55. Regan, W., and Morrey, B. (1989). Fractures of the coronoid process of the ulna. *J. Bone Joint Surg. Am.* 71, 1348–54.
 56. Hausman, M.R., Klug, R.A., Qureshi, S., Goldstein, R., and Parsons, B.O. (2008). Arthroscopically assisted coronoid fracture fixation: a preliminary report. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 466, 3147–52.
 57. Ouyang, K., Wang, D., Lu, W., Xiong, J., Xu, J., Peng, L., Liu, H., Li, H., and Feng, W. (2017). Arthroscopic reduction and fixation of coronoid fractures with an exchange rod—a new technique. *J. Orthop. Surg. Res.* 12, 9.
 58. Patterson, S.D., Bain, G.I., and Mehta, J.A. (2000). Surgical Approaches to the Elbow. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 370, 19–33.
 59. Smith, G.R., Altchek, D.W., Pagnani, M.J., and Keeley, J.R. (1996). A muscle-splitting approach to the ulnar collateral ligament of the elbow. *Neuroanatomy and operative technique.* *Am. J. Sports Med.* 24, 575–80.
 60. Ring, D., and Doornberg, J.N. (2007). Fracture of the Anteromedial Facet of the Coronoid Process. *J. Bone Jt. Surg.* 89, 267–283.
 61. Jobe, F.W., Stark, H., and Lombardo, S.J. (1986). Reconstruction of the ulnar collateral ligament in athletes. *J. Bone Joint Surg. Am.* 68, 1158–63.
 62. Hotchkiss, R.N., and Kasparyan, G.N. (2000). The Medial “Over the Top” Approach to the Elbow. *Tech. Orthop.* 15, 105–112.
 63. Molesworth, H.W.L. (1930). An operation for the complete exposure of the elbow-joint. *Br. J. Surg.* 18, 303–307.
 64. Campbell, W. (1932). Incision for exposure of the elbow joint. *Am. J. Surg.* 15, 65–67.
 65. Taylor, T.K., and Scham, S.M. (1969). A posteromedial approach to the proximal end of the ulna for the internal fixation of olecranon fractures. *J. Trauma* 9, 594–602.
 66. Huh, J., Krueger, C.A., Medvecky, M.J., and Hsu, J.R. (2013). Medial Elbow Exposure for Coronoid Fractures. *J. Orthop. Trauma* 27, 730–734.
 67. Cucchi, D., Luceri, F., Menon, A., Müller, L., Kabir, K., Randelli, P., Arrigoni, P., and Wegmann, K. (2021). Anatomic relations of the median nerve to the ulnar insertion

- of the brachialis muscle: safety issues and implications for medial approaches to the elbow joint. *Arch. Orthop. Trauma. Surg.* in press, doi: 10.1007/s00402-021-03753-y
68. Jost, B., Benninger, E., Erhardt, J., Külling, F., Zdravkovic, V., Spross, C. (2015). The extended medial elbow approach. *J. Shoulder Elbow Surg.* 24, 1074–1080.
 69. Diliberti, T., Botte, M.J., and Abrams, R.A. (2000). Anatomical considerations regarding the posterior interosseous nerve during posterolateral approaches to the proximal part of the radius. *J. Bone Joint Surg. Am.* 82, 809–13.
 70. Kaplan, E. (1941). Surgical approach to the proximal end of the radius and its use in fractures of the head and neck of the radius. *J. Bone Jt. Surg. - Br. Vol.* 23, 86–92.
 71. Strauch, R.J., Rosenwasser, M.P., and Glazer, P.A. (1996). Surgical exposure of the dorsal proximal third of the radius: how vulnerable is the posterior interosseous nerve? *J. Shoulder Elbow Surg.* 5, 342–6.
 72. Schimizzi, A., MacLennan, A., Meier, K.M., Chia, B., Catalano, L.W., and Glickel, S.Z. (2009). Defining a safe zone of dissection during the extensor digitorum communis splitting approach to the proximal radius and forearm: an anatomic study. *J. Hand Surg. Am.* 34, 1252–5.
 73. Heidari, N., Kraus, T., Weinberg, A.M., Weiglein, A.H., and Grechenig, W. (2011). The risk injury to the posterior interosseous nerve in standard approaches to the proximal radius: a cadaver study. *Surg. Radiol. Anat.* 33, 353–7.
 74. Strachan, J.C., and Ellis, B.W. (1971). Vulnerability of the posterior interosseous nerve during radial head resection. *J. Bone Joint Surg. Br.* 53, 320–3.
 75. Calfee, R.P., Wilson, J.M., and Wong, A.H.W. (2011). Variations in the anatomic relations of the posterior interosseous nerve associated with proximal forearm trauma. *J. Bone Joint Surg. Am.* 93, 81–90.
 76. Hackl, M., Wegmann, K., Lappen, S., Helf, C., Burkhart, K.J., and Müller, L.P. (2015). The course of the posterior interosseous nerve in relation to the proximal radius: is there a reliable landmark? *Injury* 46, 687–92.
 77. Bush, R.B., Leonhardt, H., Bush, I. V, and Landes, R.R. (1974). Dr. Bozzini's Lichtleiter. A translation of his original article (1806). *Urology* 3, 119–23.
 78. Kieser, C.W., and Jackson, R.W. (2001). Severin Nordentoft: The first arthroscopist. *Arthroscopy* 17, 532–535.
 79. Takagi, K. (1982). The classic. Arthroscope. Kenji Takagi. *J. Jap. Orthop. Assoc.*, 1939. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 6–8.
 80. Kieser, C. (2004). Eugen Bircher - Schweizer Pionier der Arthroskopie (1883-1956).

Arthroscopie 17, 272–276.

81. DeMaio, M. (2013). Giants of orthopaedic surgery: Masaki Watanabe MD. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 471, 2443–8.
82. Burman, M.S. (2001). Arthroscopy or the direct visualization of joints: an experimental cadaver study. 1931. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 5–9.
83. Adams, J.E., Merten, S.M., and Steinmann, S.P. (2007). Arthroscopic-assisted treatment of coronoid fractures. *Arthroscopy* 23, 1060–5.
84. Arrigoni, P., D'Ambrosi, R., Cucchi, D., Nicoletti, S., and Guerra, E. (2016). Arthroscopic fixation of coronoid process fractures through coronoid tunnelling and capsular plication. *Joints* 4, 153–158.
85. Lee, J.M., Yi, Y., and Kim, J.W. (2015). Arthroscopically Assisted Surgery for Coronoid Fractures. *Orthopedics* 38, 742–746.
86. Moon, J.-G., Zobitz, M.E., An, K.-N., and O'Driscoll, S.W. (2009). Optimal screw orientation for fixation of coronoid fractures. *J. Orthop. Trauma* 23, 277–80.
87. Garofalo, R., Bollmann, C., Kombot, C., Moretti, B., Borens, O., and Mouhsine, E. (2005). Minimal invasive surgery for coronoid fracture: technical note. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 13, 608–11.
88. Cucchi, D., Arrigoni, P., Luceri, F., Menon, A., Guerra, E., Müller, L.P., Burger, C., Eygendaal, D., and Wegmann, K. (2019). Modified anteromedial and anterolateral elbow arthroscopy portals show superiority to standard portals in guiding arthroscopic radial head screw fixation. *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.* 27, 3276–3283.
89. Cucchi, D., Guerra, E., Luceri, F., Lenich, A., Nicoletti, S., Randelli, P., Wirtz, D.C., Eygendaal, D., Arrigoni, P. (2019). A combination of an anteromedial, anterolateral and midlateral portals is sufficient for 360° exposure of the radial head for arthroscopic fracture fixation. *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.* 27, 319–325.
90. Hilgersom, N.F., Oh, L.S., Flipsen, M., Eygendaal, D., and Bekerom, M.P. van den (2017). Tips to avoid nerve injury in elbow arthroscopy. *World J. Orthop.* 8, 99.
91. Blonna, D., Wolf, J.M., Fitzsimmons, J.S., and O'Driscoll, S.W. (2013). Prevention of nerve injury during arthroscopic capsulectomy of the elbow utilizing a safety-driven strategy. *J. Bone Joint Surg. Am.* 95, 1373–81.
92. Chaware, P.N., Santoshi, J.A., Pakhare, A.P., and Rathinam, B.A.D. (2016). Risk of nerve injury during arthroscopy portal placement in the elbow joint: A cadaveric study. *Indian J. Orthop.* 50, 74–9.

93. Pederzini, L.A., Nicoletta, F., Tosi, M., Prandini, M., Tripoli, E., and Cossio, A. (2014). Elbow arthroscopy in stiff elbow. *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.* 22, 467–473.
94. Savoie, F.H. (2007). Guidelines to Becoming an Expert Elbow Arthroscopist. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.* 23, 1237–1240.
95. Carofino, B.C., Bishop, A.T., Spinner, R.J., and Shin, A.Y. (2012). Nerve Injuries Resulting From Arthroscopic Treatment of Lateral Epicondylitis: Report of 2 Cases. *J. Hand Surg. Am.* 37, 1208–1210.
96. Desai, M.J., Mithani, S.K., Lodha, S.J., Richard, M.J., Leversedge, F.J., and Ruch, D.S. (2016). Major Peripheral Nerve Injuries After Elbow Arthroscopy. *Arthroscopy* 32, 999-1002.e8.
97. Jinnah, A.H., Luo, T.D., Wiesler, E.R., Li, Z., Poehling, G.G., Tuohy, C.J., Graves, B.R., Freehill, M.T., and Papadonikolakis, A. (2018). Peripheral Nerve Injury After Elbow Arthroscopy: An Analysis of Risk Factors. *Arthroscopy* 34, 1447-1452.
98. Nelson, G.N., Wu, T., Galatz, L.M., Yamaguchi, K., and Keener, J.D. (2014). Elbow arthroscopy: early complications and associated risk factors. *J. Shoulder Elbow Surg.* 23, 273–8.
99. Kelly, E.W., Morrey, B.F., and O’Driscoll, S.W. (2001). Complications of elbow arthroscopy. *J. Bone Joint Surg. Am.* 83-A, 25–34.
100. Noticewala, M.S., Trofa, D.P., Vance, D.D., Jobin, C.M., Levine, W.N., and Ahmad, C.S. (2018). Elbow Arthroscopy: 30-Day Postoperative Complication Profile and Associated Risk Factors. *Arthroscopy* 34, 414–420.
101. Arrigoni, P., Cucchi, D., Menon, A., Guerra, E., Nicoletti, S., Colozza, A., Luceri, F., Pederzini, L.A., and Randelli, P.S. (2019). 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.* 28, 365–370.
102. Kamineni, S., Ankem, H., and Patten, D.K. (2009). Anatomic relationship of the radial nerve to the elbow joint: clinical implications of safe pin placement. *Clin. Anat.* 22, 684–8.
103. Kamineni, S., Bachoura, A., Behrens, W., Kamineni, E., and Deane, A. (2015). Distal Insertional Footprint of the Brachialis Muscle. *Anat. Res. Int.* 2015, 1–6.
104. Leonello, D.T., Galley, I.J., Bain, G.I., and Carter, C.D. (2007). Brachialis Muscle Anatomy. *J. Bone Jt. Surg.* 89, 1293–1297.
105. Sukegawa, K., Suzuki, T., Ogawa, Y., Kobayashi, T., Matsuura, Y., and Kuniyoshi,

- K. (2016). Anatomical Cadaver Study of the Hotchkiss Over-the-Top Approach for Exposing the Anteromedial Facet of the Ulnar Coronoid Process. *J. Hand Surg. Am.* *41*, 819–823.
106. Hackl, M., Lappen, S., Burkhart, K.J., Leschinger, T., Scaal, M., Müller, L.P., and Wegmann, K. (2015). Elbow Positioning and Joint Insufflation Substantially Influence Median and Radial Nerve Locations. *Clin. Orthop. Relat. Res.* *473*, 3627–3634.
 107. Cushing, T., Finley, Z., O'Brien, M.J., Savoie, F.H., Myers, L., and Medvedev, G. (2019). Safety of Anteromedial Portals in Elbow Arthroscopy: A Systematic Review of Cadaveric Studies. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.* *35*, 2164–2172.
 108. Drescher, H., Schwering, L., Jerosch, J., and Herzig, M. (2008). Das Risiko Neurovaskulärer Schädigungen bei der Ellenbogengelenkarthroskopie. *Z. Orthop.* *132*, 120–125.
 109. Unlu, M.C., Kesmezacar, H., Akgun, I., Ogut, T., and Uzun, I. (2006). Anatomic relationship between elbow arthroscopy portals and neurovascular structures in different elbow and forearm positions. *J. Shoulder Elbow Surg.* *15*, 457–62.
 110. Ma, J.-F., and Chang, S.-M. (2011). Brachialis insertion measurement: An anatomic cadaver study for plate fixation of the coronoid process fracture. *Cl. Anat.* *24*, 179–82.
 111. Morellato, J., Louati, H., Desloges, W., Papp, S., and Pollock, J.W. (2018). Fixation of Anteromedial Coronoid Facet Fractures. *J. Orthop. Trauma* *32*, e451–e456.
 112. Rashid, A., Copas, D., Granville-Chapman, J., and Watts, A. (2019). Arthroscopically-assisted fixation of anteromedial coronoid facet fracture and lateral ulnar collateral ligament repair for acute posteromedial rotatory fracture dislocation of the elbow. *Shoulder Elb.* *11*, 378–383.
 113. Rausch, V., Hackl, M., Seybold, D., Wegmann, K., and Müller, L.P. (2020). Plattenosteosynthese des Processus coronoideus ulnae. *Op. Orth. Traum.* *32*, 35–46.
 114. Shen, J.-J., Qiu, Q.-M., Gao, Y.-B., Tong, S.-L., and Huang, J.-F. (2019). Direct anterior approach for mini plate fixation of Regan-Morrey type II comminuted ulnar coronoid process fracture. *J. Orthop. Surg. (Hong Kong)* *27*, 2309499018825223.
 115. Chung, C.-H., Wang, S.-J., Chang, Y.-C., and Wu, S.-S. (2007). Reconstruction of the coronoid process with iliac crest bone graft in complex fracture-dislocation of elbow. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* *127*, 33–7.
 116. Silveira, G.H., Bain, G.I., and Eng, K. (2013). Reconstruction of coronoid process using costochondral graft in a case of chronic posteromedial rotatory instability of the elbow. *J. Shoulder Elbow Surg.* *22*, e14-8.

117. Bellato, E., Rotini, R., Marinelli, A., Guerra, E., and O'Driscoll, S.W. (2016). Coronoid reconstruction with an osteochondral radial head graft. *J. Shoulder Elbow Surg.* 25, 2071–2077.
118. van Riet, R.P., Morrey, B.F., and O'Driscoll, S.W. (2005). Use of osteochondral bone graft in coronoid fractures. *J. Shoulder Elbow Surg.* 14, 519–523.
119. Marshall, P.D., Fairclough, J.A., Johnson, S.R., and Evans, E.J. (1993). Avoiding nerve damage during elbow arthroscopy. *J. Bone Joint Surg. Br.* 75, 129–31.
120. Michels, F., Pouliart, N., and Handelberg, F. (2007). Arthroscopic management of Mason type 2 radial head fractures. *Knee Surgery, Sport. Traumatol. Arthrosc.* 15, 1244–1250.
121. Dawson, F.A., and Inostroza, F. (2004). Arthroscopic reduction and percutaneous fixation of a radial neck fracture in a child. *Arthroscopy* 20 *Suppl* 2, 90–3.
122. Rolla, P.R., Surace, M.F., Bini, A., and Pilato, G. (2006). Arthroscopic treatment of fractures of the radial head. *Arthroscopy* 22, 233.e1-233.e6.
123. Moverley, R., Colaco, H.B., Rudran, B., Szarko, M., Arnander, M., and Tennent, D. (2017). Quantification of the articular view of the elbow afforded by standard portals using 30° arthroscopy. *Shoulder Elb.* 9, 205–211.
124. Dei Giudici, L., Faini, A., Garro, L., Tucciarone, A., and Gigante, A. (2016). Arthroscopic management of articular and peri-articular fractures of the upper limb. *EFORT open Rev.* 1, 325–331.
125. Van Tongel, A., Macdonald, P., Van Riet, R., and Dubberley, J. (2012). Elbow arthroscopy in acute injuries. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 20, 2542–8.
126. Baker, C.L., and Jones, G.L. (1999). Arthroscopy of the elbow. *Am. J. Sports Med.* 27, 251–64.
127. Burkhart, K.J., Wegmann, K., Müller, L.P., and Gohlke, F.E. (2015). Fractures of the Radial Head. *Hand Clin.* 31, 533–546.
128. Fink Barnes, L.A., Parsons, B.O., and Hausman, M. (2015). Arthroscopic Management of Elbow Fractures. *Hand Clin.* 31, 651–661.
129. Atesok, K., Doral, M.N., Whipple, T., Mann, G., Mei-Dan, O., Atay, O.A., Beer, Y., Lowe, J., Soudry, M., and Schemitsch, E.H. (2011). Arthroscopy-assisted fracture fixation. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 19, 320–9.
130. Thon, S., Gold, P., Rush, L., O'Brien, M.J., and Savoie, F.H. (2017). Modified Anterolateral Portals in Elbow Arthroscopy: A Cadaveric Study on Safety. *Arthroscopy* 33, 1981–1985.

131. Field, L.D., Altchek, D.W., Warren, R.F., O'Brien, S.J., Skyhar, M.J., and Wickiewicz, T.L. (1994). Arthroscopic anatomy of the lateral elbow: a comparison of three portals. *Arthroscopy* 10, 602–7.
132. Hodax, J.D., Blood, T.D., Kleinhenz, D.T., Gorman, M., Biercevicz, A., and DaSilva, M. (2017). An Anatomic Evaluation of Arthroscopic Access to the Radial Head. *Arthroscopy* 33, 953–958.
133. van Leeuwen, D.H., Guitton, T.G., Lambers, K., and Ring, D. (2012). Quantitative measurement of radial head fracture location. *J. Shoulder Elb. Surg.* 21, 1013–1017.
134. Capo, J.T., Shamian, B., Francisco, R., Tan, V., Preston, J.S., Uko, L., Yoon, R.S., and Liporace, F.A. (2015). Fracture pattern characteristics and associated injuries of high-energy, large fragment, partial articular radial head fractures: a preliminary imaging analysis. *J. Orthop. Traumatol.* 16, 125–31.
135. Mellema, J.J., Eygendaal, D., van Dijk, C.N., Ring, D., and Doornberg, J.N. (2016). Fracture mapping of displaced partial articular fractures of the radial head. *J. shoulder Elb. Surg.* 25, 1509–16. A
136. Mak, S., Beltran, L.S., Bencardino, J., Orr, J., Jazrawi, L., Cerezal, L., Beltran, J., Mak, S., Ls, B., and Bencardino, J. (2014). MRI of the Annular Ligament of the Elbow: Review of Anatomic Considerations and Pathologic Findings in Patients With Posterolateral Elbow Instability. *AJR* 20314, 1272–1279.
137. Sanal, H.T., Chen, L., Haghighi, P., Trudell, D.J., Resnick, D.L., Ht, S., Haghighi, C.L., Dj, T., and DI, R. (2009). Annular Ligament of the Elbow: MR Arthrography Appearance With Anatomic and Histologic Correlation. *AJR* 193, 122–126.
138. Arrigoni, P., Cucchi, D., Guerra, E., Marinelli, A., Menon, A., Randelli, P.S., Pederzini, L.A., and SIGASCOT Upper Limb Committee (2017). Distance of the Posterior Interosseous Nerve from the Radial Head during Elbow Arthroscopy: An Anatomical Study. *Joints* 5, 147–151.

9 Danksagung

Mein persönlicher Dank gebührt meiner Familie und meinen Weggefährten, die diese Jahre in Deutschland mit ihrer Nähe bereichert haben sowie meinem Mentor und meinen Kollegen, die mich in meiner Arbeit unterstützt haben.