

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

**Anatomische Untersuchungen
zur postoperativen Funktionsstörung des Nervus ulnaris
nach Plattenosteosynthese am distalen Humerus beim Erwachsenen**

Dissertation

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

vorgelegt von
Jan Hilmer
2020

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

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

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

Zweitgutachter: PD Dr. med. Thomas Gausepohl

In Liebe und Dankbarkeit meiner Familie gewidmet.

Zusammenfassung

Der Nervus ulnaris beschreibt einen ungewöhnlichen Verlauf auf der Streckseite des Ellenbogengelenks. Sowohl anatomische Varianten als auch Beugebewegungen des Ellenbogengelenks stellen für den Nerv eine potenzielle Gefahr hinsichtlich Dehnung und Kompression dar. Darüber hinaus erfordert die chirurgische Versorgung distaler Humerusfrakturen die Applikation einer anatomischen Platte an der medialen Seite des distalen Humerus sowie eine langstreckige Präparation des N. ulnaris. Vor diesem Hintergrund deutet die hohe Prävalenz postoperativer Funktionsstörungen des N. ulnaris darauf hin, dass das beschriebene Therapieverfahren iatrogene Schäden am Nerv erzeugen könnte. Aus diesem Grund sollte die vorliegende Studie sowohl die dynamische Bewegung des N. ulnaris als auch dessen Gefäßversorgung untersuchen. Langfristig sollen daraus intraoperative Gefahrenpunkte und mögliche Therapiealternativen abgeleitet werden.

Für die Beurteilung der Bewegungsdynamik wurden unter sonographischer Kontrolle drei bis fünf Stücke eines röntgendichten Metalldrahts („Pins“) transkutan in die ellenbogen-nahen Anteile des N. ulnaris von vier oberen Körperspenderextremitäten injiziert. Der Oberarm wurde in einer senkrechten Ebene zum Strahlengang eines C-Bogens fixiert. Röntgenbilder wurden erstellt um die Position der injizierten Pins in verschiedenen Stellungen des Ellenbogengelenks (0° bis 135° Beugung) zu beurteilen. Analog dazu wurde eine weitere Röntgenserie nach der Applikation einer anatomischen Osteosyntheseplatte an der medialen Seite des distalen Humerus erstellt. Sowohl das prä- und postoperative Bewegungsausmaß der Pins zwischen Streckung und endgradiger Beugung (gemessen in Grad) als auch die Distanzen einzelner Pins zueinander und zum Drehzentrum wurden gemessen. Die histologische Untersuchung umfasste die Erstellung verschiedener Schnittpräparate des N. ulnaris und eine mikroskopische Beurteilung dergleichen.

Das physiologische Bewegungsausmaß wurde mit bis zu 128° bestimmt und zeigte Abweichungen zwischen proximal und distal des Kubitaltunnels gelegenen Pins. Postoperativ reduzierte sich das Bewegungsausmaß in drei von vier Fällen um bis zu 51° . Darüber hinaus näherten sich zehn von zwölf Pins mit unterschiedlicher Ausprägung an das Drehzentrum an. Nach der Plattenimplantation zeigten elf von zwölf Pins eine Annäherung an das Drehzentrum. Die Auswertungen der direkten Pin-Abstände waren inkonklusiv. Die intraneurale Gefäßversorgung war im Bereich des Kubitaltunnels besonders stark ausgeprägt und erfolgte dort von lateral.

Der entwickelte Versuchsaufbau erlaubt eine gute Aussagekraft in Bezug auf die dynamische Bewegung des N. ulnaris im Bereich des Ellenbogens. Die Auswertungen ergaben, dass der N. ulnaris ein kompliziertes Bewegungssystem mit multidirektionalen Anpassungsmechanismen - Dehnbarkeit, Längenreserve und anteromedialer Shift - für seinen ungewöhnlichen Verlauf auf der Streckseite des Ellenbogengelenks besitzt. Die Applikation einer anatomischen Osteosyntheseplatte an der medialen Seite des distalen Humerus schränkt diese - individuell betonten - Mechanismen ein und gefährdet den Nerv hinsichtlich Dehnung und Kompression mit möglichen Funktionsstörungen des N. ulnaris als Folge. Trotz der reichen, intraneuralen Vaskularisierung riskiert die langstreckige Präparation darüber hinaus eine Ischämie des N. ulnaris.

Summary

The ulnar nerve describes an atypical course at the extensor side of the elbow joint. Its anatomical variations as well as flexion of the elbow joint are assumed to put the nerve at risk to strain and compression with consequent ulnar neuropathies. In addition surgical treatment of distal humerus fractures - with open reduction and internal fixation (ORIF) - requires the application of an anatomical plate at the medial aspect of the distal humerus as well as neurolysis. In this regard, high prevalences of postoperative ulnar nerve dysfunctions indicate that the typical surgical treatment might induce iatrogenic nerve injuries. For this reason the present study aimed to evaluate the ulnar nerve's dynamic movement as well as its vascular anatomy. In the long term, high-risk, intraoperative steps and alternative therapy concepts shall be deduced from the results.

Under sonographic guidance three to five pieces of a radiopaque metal wire („pins“) were injected transcutaneously into the elbow joint-related parts of the ulnar nerves of four cadaveric upper extremities. The humerus was fixed with the elbow in a perpendicular plane to the X-Ray's beam path. Radiographs were taken to display the location of the injected pins in different positions of elbow movement (0 to 135° of flexion). The same series of radiographs was taken after the implantation of an anatomical plate at the medial aspect of the distal humerus. Pre- and postoperative range of pin movement between extension and maximum flexion (measured in degrees) as well as the distances of pins to each other and to the center of rotation were measured and evaluated. Histologic studies included microscopic evaluation of several histologic preparations of the ulnar nerve.

The physiological range of movement was measured with up to 128° and showed differences regarding the pin position proximal or distal to the elbow joint. Postoperative range of movement decreased in three of four cases by a value of up to 51°. Furthermore ten of twelve injected pins approximated to the center of rotation with varying values. After plate implantation eleven of twelve pins showed approximation to the center of rotation. Measurements of direct pin-distances were inconclusive. The intraneural vascularization was emphasized within the cubital tunnel and is provided from lateral running vessels.

The presented study design allows good evaluation of the ulnar nerve's dynamic movement at the elbow. Evaluation proved that the ulnar nerve features a complicated system of movement including multidirectional coping mechanisms – stretching, reserve of length and anteromedial shifting - for its particular course at the extension side of the elbow joint. The application of anatomical plates at the medial aspect of the distal humerus limits those individually pronounced mechanisms and places the nerve at risk for distension and compression with consequent ulnar nerve dysfunctions. Although its rich vascularization neurolysis risks ischemia of the ulnar nerve.

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
al.	alumni
AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
cm	Zentimeter
DHF	distale Humerusfraktur
EBG	Ellenbogengelenk
EM	Epicondylus medialis humeri
HE	Hämatoxylin-Eosin
IUCA	A. collateralis ulnaris inferior
K-Draht	Kirschner-Draht
KTR	Kubitaltunnelretinakulum
M.	Musculus
Mm.	Musculi
N.	Nervus
Nn.	Nervi
mm	Millimeter
ORIF	<i>Open Reduction and Internal Fixation</i>
PURA	A. recurrens ulnaris (posterior)
SUCA	A. collateralis ulnaris superior
TEA	<i>Total Elbow Arthroplasty</i>
UO	Untersuchungsobjekt
V.	Vena

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anatomische Grundlagen	1
1.1.1	Ursprung und Verlauf des N. ulnaris	1
1.1.2	Die Struthersche Arkade	2
1.1.3	Das Kubitaltunnelretinakulum	3
1.1.4	Der Kubitaltunnel	4
1.1.5	Die arterielle Gefäßversorgung im Bereich des Ellenbogens	5
1.2	Die distale Humerusfraktur	7
1.2.1	Übersicht	7
1.2.2	Die operative Versorgung distaler Humerusfrakturen	8
1.3	Das Bewegungsverhalten des N. ulnaris	12
1.4	Ziele der Studie	14
2	Material und Methoden	15
2.1	Histologische Untersuchungen	15
2.1.1	Arbeitsmittel	15
2.1.2	Durchführung	16
2.2	Radiologisch-anatomische Untersuchungen	22
2.2.1	Arbeitsmittel	22
2.2.2	Injektion der Metalldrähte	23
2.2.3	Versuchsaufbau	27
2.2.4	Versuchsdurchführung	30
2.2.5	Auswertung	33
3	Ergebnisse	39
3.1	Ergebnisse der histologischen Untersuchung	39
3.1.1	Querschnittpräparate	39
3.1.2	Längsschnittpräparate	45
3.1.3	Zusammenfassung der histologischen Ergebnisse	46
3.2	Radiologisch-anatomische Untersuchungen	47
3.2.1	Untersuchungsobjekt 1	48
3.2.2	Untersuchungsobjekt 2	54
3.2.3	Untersuchungsobjekt 3	59
3.2.4	Untersuchungsobjekt 4	64
3.2.5	Einzeluntersuchungen zu Pronation und Supination	69
3.2.6	Zusammenfassung	77
4	Diskussion	80
4.1	Histologische Untersuchungen	80
4.1.1	Diskussion des Studiendesigns	80
4.1.2	Diskussion der Ergebnisse	81

4.1.3	Übertragung auf die chirurgische Praxis.	83
4.2	Radiologisch-anatomische Untersuchungen.	87
4.2.1	Diskussion des Versuchsdesigns.	87
4.2.2	Das physiologische Bewegungsverhalten des N. ulnaris	90
4.2.3	Das postoperative Bewegungsverhalten des N. ulnaris.	97
4.2.4	Übertragung auf die chirurgische Praxis.	99
4.3	Schlussfolgerungen	102
4.4	Limitationen der Studie	103
	Abbildungsverzeichnis.	104
	Tabellenverzeichnis	106
	Literaturverzeichnis.	107
	Anhang.	111
	Danksagung	

KAPITEL 1

Einleitung

1.1 Anatomische Grundlagen

1.1.1 Ursprung und Verlauf des N. ulnaris

Der N. ulnaris entstammt den ventralen Ästen der Nervenwurzeln C8 und Th1. Diese bilden zunächst einen inferioren Truncus, der sich in der Axilla als Fasciculus medialis fortsetzt und schließlich den Ursprung des N. ulnaris als peripheren Nerven darstellt. [1]

Zunächst dem Sulcus bicipitalis medialis folgend durchtritt der Nerv ungefähr acht Zentimeter proximal des Epicondylus medialis humeri das Septum intermusculare mediale um auf die Streckseite des Oberarms zu gelangen [2, 3]. Dort verläuft er zwischen dem Septum intermusculare mediale und dem medialen Trizepskopf kurzzeitig in einem Faszientunnel, der in der Literatur häufig als Struthersche Arkade bezeichnet wird (s. Kapitel 1.1.2) [4, 5]. Anschließend umläuft der N. ulnaris das Ellenbogengelenk dorsal des Epicondylus medialis humeri im Sulcus nervi ulnaris um ein Stück weiter distal zwischen den beiden Köpfen des M. flexor carpi ulnaris in die Flexorenloge einzutreten [1, 6]. In diesem Bereich innerviert der N. ulnaris sowohl den M. flexor carpi ulnaris als auch den ulnaren Anteil des M. flexor digitorum profundus [7]. Im weiteren Verlauf des Unterarms befindet sich der Nerv zusammen mit Arteria ulnaris und Vena ulnaris zwischen den beiden oben genannten Muskeln eingebettet [4]. Vor dem Eintritt in die Hohlhand durchtritt der N. ulnaris anschließend die Guyon-Loge - ein vom Ligamentum carpi palmare überspannter, bindegewebiger Tunnel zwischen dem Os pisiforme und dem Hamulus ossis hamati [1].

In der Hohlhand spaltet der Nerv sich schließlich in einen Ramus superficialis und einen Ramus profundus auf. Der oberflächliche Ast versorgt neben dem M. palmaris brevis das palmare Hautareal über Handballen, viertem Finger (ulnarseitig) und fünftem Finger sensibel. Analog dazu erfolgt die sensible Innervation des ulnarseitigen Handrückens, sowie des vierten Fingers (ulnarseitig) und des fünften Fingers über einen dorsalen Hautast, der sich im Bereich des distalen Unterarms vom N. ulnaris abzweigt. [1] Der Ramus profundus innerviert hingegen als rein motorischer Ast die Muskulatur des Hypothenars, die Mm. interossei, die Mm. lumbricales III und IV, den M. adductor pollicis und das Caput profundum des M. flexor pollicis brevis [1, 7].

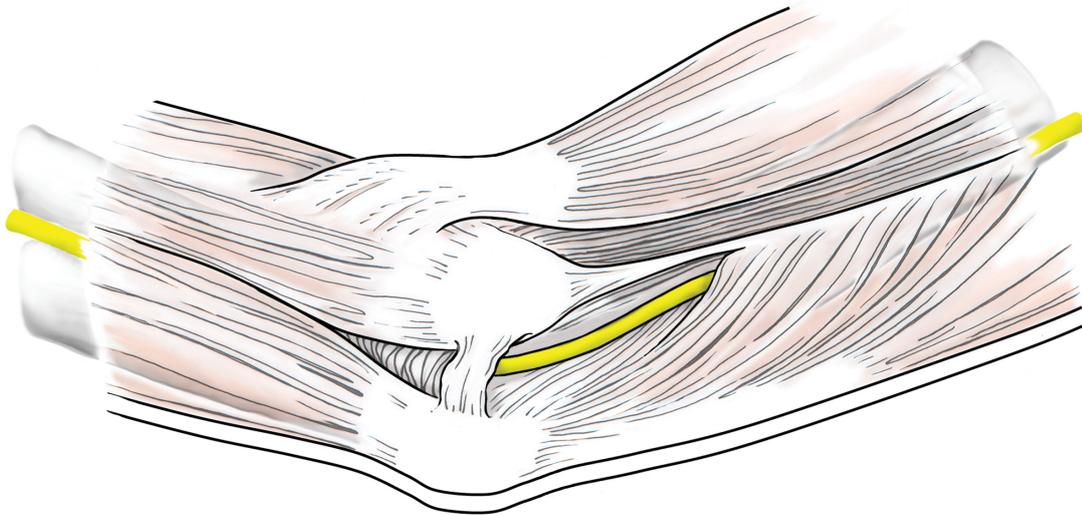


Abb. 1.1: Verlauf des N. ulnaris. Die Abbildung zeigt den Verlauf des N. ulnaris. Im Bereich des mittleren Oberarms tritt er aus der Strutherschen Arkade hervor und tritt im Bereich des Ellenbogens in den Kubitaltunnel ein. Hier wird er vom KTR (proximal) und von der Aponeurose zwischen den beiden Köpfen des M. flexor carpi ulnaris (distal) überspannt. Zeichnung: Frau Christine Opfermann der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

1.1.2 Die Struthersche Arkade

Der schottische Anatom John Struthers beschrieb 1854 in seinem Werk „Anatomical and Physiological Observations: Part 1“ erstmals eine ligamentöse Struktur, die den N. ulnaris im Bereich des Oberarms schützend überspannt und fortan als Ligamentum brachiale internum bezeichnet werden sollte [8].

Über ein Jahrhundert später entdeckten die Autoren Kane, Spinner und Kaplan [9] im Rahmen einer Arbeit zum Verlauf des N. ulnaris eine muskulotendinöse Arkade am distalen Oberarm, die unter anderem durch das Ligamentum brachiale internum gebildet wird und den N. ulnaris kurzstreckig überdeckt. Aufgrund seiner wegweisenden Erstbeschreibung sprachen sie Struthers die Entdeckung zu und definierten die heute bekannte Struthersche Arkade¹ wie folgt: „Mit dem Arm in physiologischer Position betrachtet man die Arkade von medial. Sie bildet sich aus einer Verdickung der tiefen Faszie des distalen Teils des Oberarms, oberflächlichen Muskelfasern des medialen Kopfes des M. triceps brachii und Anlagerungen des 'Ligamentum brachiale internum'. Das Letztere kann zu seinem Ursprung in der Region der Sehne des M. coracobrachialis zurückgeführt werden. Die vordere Grenze ist das Septum intermusculare mediale. Lateral wird die Arkade durch den medialen Aspekt des Humerus gebildet, der von Fasern des medialen Kopfes des M. triceps brachii bedeckt wird.“[2].

Der unklare anatomische Zusammenhang zwischen dem von Struthers beschriebenen Ligamentum brachiale internum und der durch Kane et al. definierten Strutherschen Ar-

¹Diese ist von dem Strutherschen Band abzugrenzen - eine 1848 von Struthers beschriebene, seltene anatomische Variante eines Ligaments zwischen einem angeborenen Processus supracondylaris und dem Epicondylus medialis humeri [8].

kade begründet möglicherweise, dass bis heute keine einheitliche Definition einer solchen Struktur existiert [5, 10]. Darüber hinaus stellen einige Autoren die Existenz einer Strutherschen Arkade gänzlich infrage [11, 12]. Folglich variiert auch die Häufigkeit mit der die Struthersche Arkade in verschiedenen Studien gefunden wurde: Bartels et al. [12] fanden in über 200 Operationen und 10 präparierten Körperspenderarmen in keinem Fall eine Struthersche Arkade. Al-Qattan et al. [3] verzeichneten in 17 von 25 (68 %) Körperspenderarmen eine Struthersche Arkade - eine Häufigkeit ähnlich der von Kane et al. [2] mit 70 % (14 von 20). Zuletzt konnten Caetano et al. [5] eine Struthersche Arkade in 40 von 40 präparierten Armen (100 %) nachweisen.

1.1.3 Das Kubitaltunnelretinakulum

Das Kubitaltunnelretinakulum wurde 1957 erstmals durch Geoffrey Vaughan Osborne als fibröses Band beschrieben, das sich zwischen dem humeralen und ulnaren Kopf des M. flexor carpi ulnaris aufspannt und somit das Dach des Kubitaltunnels (s. Kapitel 1.1.4) bildet [13, 14]. In den Jahren nach der Erstbeschreibung durch Osborne führte die physiologische Variabilität des Kubitaltunnelretinakulums – in Analogie zur Strutherschen Arkade – zu einer uneinheitlichen Definition. Einige Autoren beschrieben demzufolge ein Osborne-Band, ein Osborne-Ligament, eine Osborne-Faszie, ein trianguläres, bogenförmiges Ligament oder einen M. anconeus epitrochlearis². [14, 16–19]

1991 forderten die Autoren O’Driscoll et al. [19] aufgrund der knöchernen Insertion am Epicondylus medialis humeri und medialem Olekranon eine anatomisch orientierte Bezeichnung als „Kubitaltunnelretinakulum“. Daran angelehnt beschrieben Macchi et al. [18] im Rahmen histologischer Untersuchungen des Kubitaltunnels ein „Myofasziales Trilaminäres Retinakulum“. Die zugrundeliegende Dreischichtung ergibt sich dabei aus bindegewebigen, sehnigen und muskulären Anteilen, die sowohl eine Dehnung als auch eine mäßige Kontraktion des Retinakulums ermöglichen. Obwohl davon auszugehen ist, dass die histologisch gesicherte Beschreibung des myofaszialen trilaminären Retinakulums am ehesten die anatomischen Gegebenheiten des Kubitaltunneldachs erfasst, konnte sich diese Bezeichnung bis zum aktuellen Zeitpunkt nicht in der Literatur durchsetzen. Aus diesem Grund soll in der vorliegenden Arbeit der von vielen Autoren anerkannte Begriff „Kubitaltunnelretinakulum“ verwendet werden. [16, 19–22]

Zusammenfassend lassen sich trotz der uneinheitlichen Nomenklatur folgenden Aussagen zum Kubitaltunnelretinakulum festhalten:

1. Eine fibromuskuläre Schicht schützt den N. ulnaris im Kubitaltunnel vor einer antero-medialen Luxation. Diese besteht aus einem proximalen Anteil zwischen Epicondylus medialis humeri und Olekranon und einem distalen Anteil zwischen den beiden Köpfen des M. flexor carpi ulnaris. [1, 13, 17, 19, 20, 22, 23]
2. Verschiedene Pathologien im Bereich des Ellenbogens - beispielsweise entzündlicher, degenerativer oder traumatischer Genese - können zur mechanischen Reizung des

²Der M. anconeus epitrochlearis wird als eine, das Osborne-Band ersetzende, muskuläre Struktur beschrieben, die als Ursache ulnarer Neuropathien diskutiert wird. [15]

N. ulnaris führen und Funktionsstörungen in dessen Innervationsgebiet begünstigen. [4, 7, 13, 16–18]

1.1.4 Der Kubitaltunnel

Der Kubitaltunnel ist ein fibro-ossärer Kanal an der dorsalen Seite des Ellenbogengelenks [22]. Der knöcherne Anteil des Kubitaltunnels wird durch den Sulcus nervi ulnaris gebildet - eine Knochenrinne zwischen Epicondylus medialis humeri und Olekranon. Hierin verläuft der N. ulnaris bis er zwischen die beiden Köpfe des M. flexor carpi ulnaris tritt. Die Basis des Kanals bilden sowohl die Kapsel des Ellenbogengelenks als auch die Pars posterior und die Pars transversa des Ligamentum collaterale ulnare. [18, 19, 22] Nach lateral ist der Kanal durch das Olekranon und die mediale Kante des M. triceps brachii begrenzt und nach medial durch den Epicondylus medialis humeri. Das Dach wird durch das Kubitaltunnelretinakulum und die Aponeurose zwischen den beiden Köpfen des M. flexor carpi ulnaris gebildet. [7, 19, 22]

Die Lage des N. ulnaris im Kubitaltunnel - in der Umgebung von knöchernen und straffbindegewebigen Strukturen - stellt vor allem in Flexionsstellung des Ellenbogengelenks eine Gefahr hinsichtlich mechanischer Irritationen des N. ulnaris dar [19, 22, 24]. Diesbezüglich wird neben dem oberflächlichen Nervenverlauf insbesondere die Reduktion des Kubitaltunnelvolumens bei zunehmender Flexion als möglicher Ursprung von Irritationen angesehen [7, 22, 24]. Grundlegend werden hierfür die beiden folgenden physiologischen Mechanismen angeführt: Mit zunehmender Flexion distanzieren sich der Epicondylus medialis humeri und die mediale Kante des Olekranons voneinander. Das an diesen beiden Strukturen ansetzende Kubitaltunnelretinakulum wird hierbei gespannt, wodurch sich das Dach des Kubitaltunnels in Richtung des fibro-ossären Bodens absenkt [7, 25]. Gleichzeitig kommt es während der Flexion zu einer Spannung des Ligamentum collaterale ulnare, das sich als Boden des Kubitaltunnels in Richtung des Kubitaltunnelretinakulums anhebt [20, 24]. Folglich ergibt sich eine Annäherung der beiden ligamentären Strukturen bei Flexion des Ellenbogengelenks, die zu einer Kompression des zwischen ihnen verlaufenden N. ulnaris führen kann [24].

In Anlehnung daran wird das häufig beschriebene Kubitaltunnelsyndrom³ in den meisten Fällen auf eine Kombination aus der oben genannten Verengung des Kubitaltunnels und gleichzeitig bestehenden Pathologien - wie z.B. Ganglien, Frakturen, Osteophyten, Infektionen und Synovitis im Bereich des Ellenbogens [1] - zurückgeführt. Hierbei kann es zu einer Reizung des N. ulnaris mit sensiblen und motorischen Funktionsstörungen kommen. Eine konservative Therapie erfolgt bei milden bis moderaten Symptomen unter anderem als Schienung des Ellenbogengelenks zur Vermeidung von endgradigen Flexionsbewegungen [27, 28]. Die darüber hinaus bestehenden, zahlreichen operativen Therapieansätze verdeutlichen in diesem Zusammenhang, dass nach wie vor unzureichende Kenntnisse über den außergewöhnlichen Verlauf des N. ulnaris existieren [26].

³Das Kubitaltunnelsyndrom ist neben dem Karpaltunnelsyndrom das zweithäufigste Engpasssyndrom mit einer Inzidenz von 24,7 Fällen pro 100.000 Personenjahre.[26]

1.1.5 Die arterielle Gefäßversorgung im Bereich des Ellenbogens

Die arterielle Blutversorgung des N. ulnaris im Bereich des Ellenbogengelenks erfolgt durch drei Gefäße: die A. collateralis ulnaris superior (SUCA), die A. collateralis ulnaris inferior (IUCA) und die A. recurrens ulnaris posterior (PURA) (Abb. 1.2) [4].

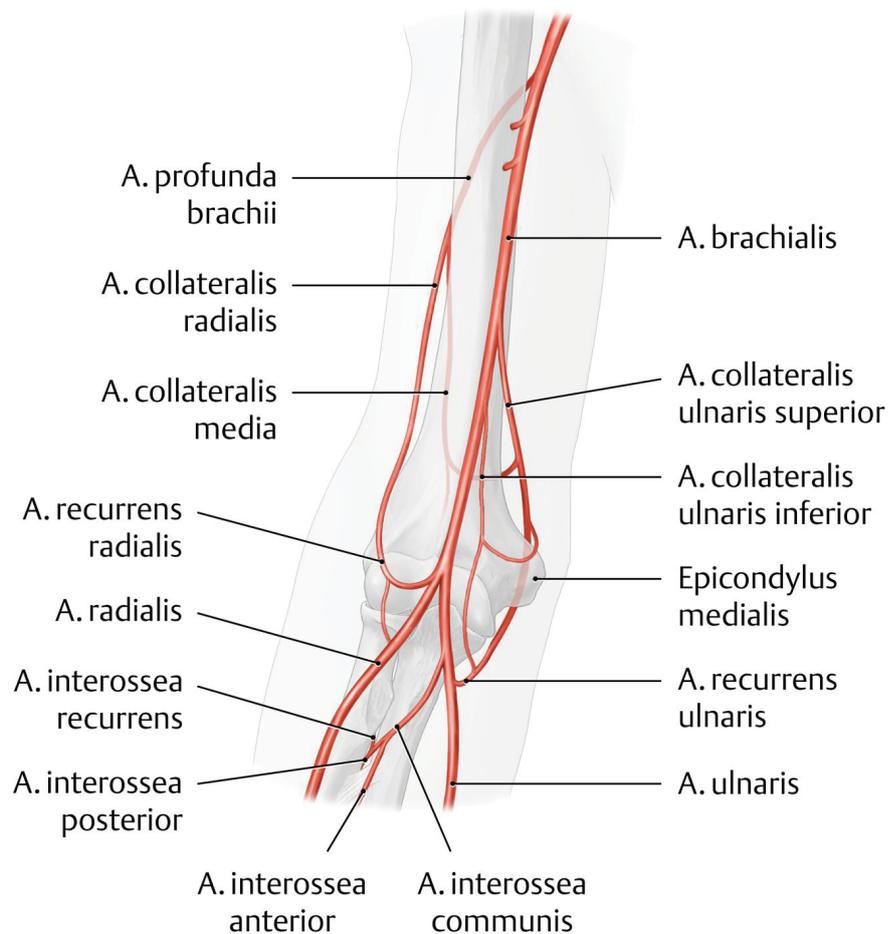


Abb. 1.2: Arterielle Gefäßversorgung des N. ulnaris. Abgebildet ist die arterielle Gefäßversorgung des N. ulnaris mit SUCA, IUCA und PURA. Die Graphik beschreibt a.e. ein Vaskularisierungsmuster nach den Autoren Li et al., die eine zusätzliche Anastomose zwischen SUCA und PURA nachwiesen.[29] Der Zufluss aus der IUCA kommt in diesem Beispiel von ventral des EM. Dies entspricht den Ergebnissen von Yamaguchi et al. [30] und verdeutlicht gleichzeitig, dass die IUCA bei Pathologien im Bereich des Kubitaltunnels eine entscheidende Rolle bei der Versorgung des N. ulnaris haben könnte. [27] Graphik aus „PROMETHEUS - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem“ [31] des Thieme Verlags.

Im Folgenden sollen die detailreichen Ergebnisse von Yamaguchi et al. [30] und Li et al. [29] zur grundlegenden Erläuterung des Gefäßmusters im Bereich des Ellenbogens herangezogen werden. Dabei sind die angegebenen Distanzen als Durchschnittswerte beider Arbeiten zusammengefasst worden um einen nachvollziehbaren Überblick über das komplexe Gefäßmuster zu ermöglichen.

Die A. collateralis ulnaris superior entspringt der A. brachialis im Durchschnitt 179 mm proximal des Epicondylus medialis humeri und verläuft durchschnittlich über eine Distanz von 119 mm parallel zum N. ulnaris. Einige Zentimeter proximal des Ellenbogengelenks bildet sie eine Anastomose mit der A. collateralis ulnaris inferior. Während ihres Verlauf am Oberarm gibt die A. collateralis ulnaris superior bis zu zehn Äste zur Versorgung des N. ulnaris ab. Diese Äste teilen sich - ebenso wie die Äste der A. collateralis ulnaris inferior und der A. recurrens ulnaris posterior - beim Durchtreten des Epineuriums in einen aufsteigenden und einen absteigenden Ast auf, die schließlich mit den proximalen und distalen Ästen anastomosieren. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Yamaguchi et al. [30] beschreiben Li et al. [29] eine zusätzliche Anastomose zwischen der A. collateralis ulnaris superior und der A. recurrens ulnaris posterior.

Die A. collateralis ulnaris inferior spaltet sich im Durchschnitt 66 mm proximal des Epicondylus medialis humeri von der A. brachialis ab und verläuft von dort dorsal des Septum intermusculare mediale. Im Verlauf gibt sie mindestens einen Ast zur Versorgung des N. ulnaris ab und bildet im Kubitaltunnel schließlich ein engmaschiges Kapillarnetz mit der A. recurrens ulnaris posterior. [30] Im Vergleich zu einigen älteren Arbeiten, die der A. collateralis ulnaris inferior eine geringe bis fehlende Beteiligung an der arteriellen Versorgung des N. ulnaris zusprechen, betonen aktuelle Ergebnisse ihre Bedeutung als Anastomose zwischen A. collateralis ulnaris superior und A. recurrens ulnaris posterior für die Vaskularisierung des N. ulnaris im Kubitaltunnel [29, 30, 32–35].

Die A. recurrens ulnaris posterior zweigt sich durchschnittlich 73 mm distal des Epicondylus medialis humeri von der A. ulnaris ab und tritt zwischen den beiden Köpfen des M. flexor carpi ulnaris in den Kubitaltunnel ein. Vor der Anastomosierung mit der A. collateralis ulnaris inferior gibt die A. recurrens ulnaris posterior bis zu sechs Äste zur Versorgung des N. ulnaris ab. [30]

Zusätzlich fanden Yamaguchi et al. [30] unter mikroskopischer Betrachtung Äste der oben beschriebenen Hauptgefäße, die nach kurzstreckigem Verlauf innerhalb des Epineuriums intraneurale Plexus bildeten und mit den proximalen und distalen Plexus anastomosierten.

Zusammenfassend findet sich im Bereich des Ellenbogens eine ausgeprägte Vaskularisierung des N. ulnaris über drei arterielle Hauptgefäße, die segmental über einzelne Äste an den Nerv herantreten und sowohl extraneural als auch intraneural miteinander kommunizieren. Anatomische Varianten sind häufig und verlangen eine sorgsame Präparation bei operativer Freilegung des N. ulnaris. [29, 30]

1.2 Die distale Humerusfraktur

1.2.1 Übersicht

Die Fraktur des distalen Humerus ist mit etwa 2 % eine der selteneren Frakturen des erwachsenen Menschen [36]. Gleichzeitig macht sie über 30 % aller humeralen Frakturen beim Erwachsenen aus [37]. Die Inzidenz wird in der Literatur mit 5,7/100000 Personen pro Jahr angegeben [38]. Aufgrund des zunehmenden Alters der Bevölkerung ist in Zukunft jedoch mit einem deutlichen Anstieg der Inzidenz zu rechnen [36, 39].

Eine Besonderheit der distalen Humerusfraktur ergibt sich in der Aufteilung des Patientenguts in zwei Altersgipfel mit einem mittleren Patientenalter von 36,8 Jahren bei Männern bzw. 59,7 Jahren bei Frauen [38]. Demnach setzt sich das jüngere Patientengut vor allem aus jungen Männern zusammen. Unfallmechanismen sind in der Regel hochenergetische Traumata im Rahmen von Verkehrs- oder Sportunfällen [36]. Das weitaus größere Patientengut stellen Frauen mittleren und hohen Alters dar bei denen meist einfache Stürze auf den Ellenbogen oder den ausgestreckten Arm zu Frakturen des distalen Humerus führen [36, 40]. Grund ist in vielen Fällen die osteoporosebedingte Verminderung der Knochensubstanz postmenopausaler Frauen [39].⁴

Die Einteilung distaler Humerusfrakturen erfolgt anhand des Klassifikationssystems der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO; Abb. 1.3) [36, 41]. Diese unterscheidet extraartikuläre Frakturen (Typ A) von teilweise intraartikulären Frakturen (Typ B) beziehungsweise vollständig intraartikulären Frakturen mit Trennung von Humerusschaft und Gelenkfläche (Typ C). Die nähere Beschreibung des Frakturmusters erfolgt über numerische Zusatzbezeichnungen (Zahlen 1-3) [39]. Alternativ bestehende Klassifikationssysteme werden zwar nicht standardmäßig verwendet, können jedoch für die Therapieplanung oder zur prognostischen Abschätzung hilfreich sein [40, 42].

Die Therapie der Wahl ist in aller Regel eine operative Versorgung der Fraktur. Konservative Verfahren stellen allenfalls bei älteren Patienten⁵ mit Kontraindikationen für eine Operation in Narkose und mit geringem funktionellem Anspruch an die obere Extremität eine Alternative dar [36, 44]. Dabei liegt der Vorteil einer operativen Therapie vor allem in der Wiederherstellung einer Übungsstabilität, die - zur Prävention einer Gelenksteife - eine frühzeitige postoperative Mobilisierung des Ellenbogengelenks erlaubt [39, 45]. Zum näheren Verständnis findet sich im folgenden Kapitel eine detaillierte Beschreibung des Operationsvorgangs.

⁴Vervollständigend sollte hier erwähnt werden, dass sich auch bei Männern ein erneuter Häufigkeitsgipfel im höheren Alter zeigt, der auch im Rahmen von Komorbiditäten gewertet werden muss [38].

⁵In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

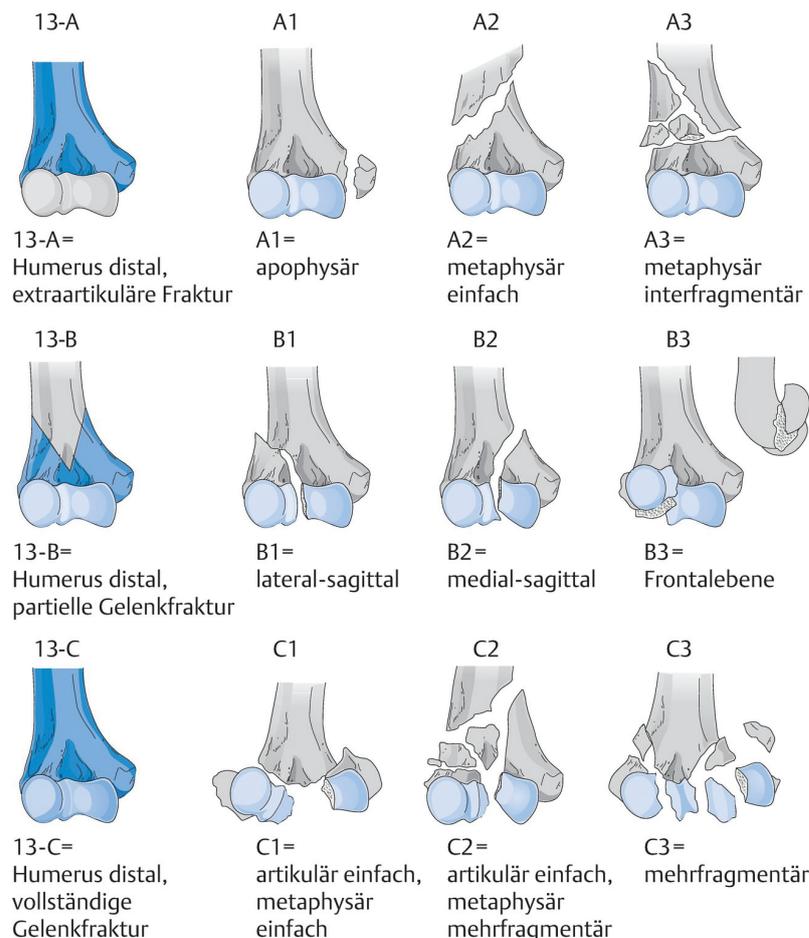


Abb. 1.3: AO-Klassifikation der distalen Humerusfraktur. Die Abbildung veranschaulicht die Einteilung der distalen Humerusfraktur in extraartikuläre, teilweise intraartikuläre und intraartikuläre Frakturen im Sinne der AO. Frakturen des Typs „C“ stellen die kompliziertesten Frakturen dar und bedürfen einer offen-chirurgischen Frakturversorgung. Graphik aus „Checkliste Traumatologie“ [43] des Thieme Verlags.

1.2.2 Die operative Versorgung distaler Humerusfrakturen

Grundlagen

Die operative Versorgung der distalen Humerusfraktur kann beim Erwachsenen auf drei Arten erfolgen:

1. Externe Fixationssysteme: Hierbei handelt es sich um ein gelenkübergreifendes Stangensystem, welches über mehrere - in Humerus und Ulna eingebrachte - Schanz-Schrauben eine Ruhigstellung von Ellenbogengelenk und Fraktur ermöglicht [40]. Anwendung finden diese Systeme in der Regel bei der passageren Ruhigstellung ausgedehnter Weichteilverletzungen, offener Frakturen und/oder beim Vorliegen lebensbedrohlicher Verletzungen des Gesamtorganismus [44]. Eine definitive Versorgung mittels externer Fixationssysteme wird darüber hinaus zunehmend in der Literatur diskutiert. Vorteile könnten in der verminderten Bildung von Narbengewebe, in der Reduktion von Infektionen und in der geringeren Devaskularisation des Operationsgebiets liegen. [46]

2. **Totaler Gelenkersatz:** Der totale Gelenkersatz (*Total Elbow Arthroplasty*, TEA) oder der partielle Gelenkersatz (Hemiarthroplastie) stellen eine zunehmende Alternative zu der nachfolgend beschriebenen Plattenosteosynthese dar [36, 47]. Verschiedene Arbeiten zum Vergleich postoperativer Ergebnisse von TEA und Plattenosteosynthese konnten bislang kein Verfahren hervorheben [39]. Als häufigste Indikationen gelten die ausbleibende Frakturheilung nach Plattenosteosynthese, posttraumatische Arthrosen des Ellenbogengelenks und Osteoporose [36]. Ein entscheidender Nachteil kann sich aus der Einschränkung des erlaubten Hubgewichts auf 2,3kg bei wiederholtem Heben oder 4,5kg bei einmaliger Belastung ergeben. Weitere Komplikationen können Implantatlockerungen, periprothetische Frakturen und Prothesenversagen sein. [39]
3. **Open Reduction and Internal Fixation (ORIF):** Die ORIF lässt sich sinngemäß als offene Reposition und interne Fixierung (mittels Plattenosteosynthese) übersetzen. Sie gilt bis heute als Goldstandard in der Therapie distaler Humerusfrakturen des Erwachsenen und soll im Folgenden näher erläutert werden. [36]

Die grundlegenden Ziele der operativen Therapie distaler Humerusfrakturen sind die anatomische Reposition und Wiederherstellung von Ellenbogengelenk und Gelenkfläche, die starre Verbindung von Humerusschaft (Diaphyse) und Gelenkfläche und die daraus resultierende Übungsstabilität zur Sicherung einer frühen postoperativen Mobilisation [39]. Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden der typische Operationsvorgang zur Versorgung einer komplexen Fraktur des distalen Humerus im Sinne einer ORIF beschrieben werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass das operative Prozedere stets auf den Patienten und das individuelle Frakturmuster abzustimmen ist und somit dem jeweiligen Operateur obliegt.

Lagerung und Zugang

Die Lagerung des Patienten erfolgt in Seiten- oder Bauchlage [42]. Der Oberarm befindet sich in 90 Grad Abduktion des Schultergelenks und liegt einer Armrolle beziehungsweise einem kleinen Armtisch auf, sodass eine freie Bewegung des Ellenbogengelenks möglich ist. Als Vorteil gelten sowohl die erleichterte Erweiterbarkeit des Zugangs nach proximal und distal im Verlauf der Operation als auch die gute Sicht auf den N. ulnaris. Gleichzeitig können die Armrolle bzw. der Armtisch als Hypomochlion verwendet werden um eine Reposition der distalen Hauptfragmente durchzuführen. [40, 48] Der Zugang erfolgt als dorsaler Hautschnitt mit radialer Umschneidung des Olekranons. Das subkutane Fettgewebe wird bis auf die Faszie des M. triceps brachii präpariert und die Bursa olecrani entfernt. [40]

Handhabung des N. ulnaris

Der N. ulnaris wird ungefähr fünf bis acht Zentimeter proximal des Epicondylus medialis humeri an der medialen Kante des M. triceps brachii identifiziert und unter Zuhilfenahme einer Lupenbrille dargestellt [39, 40]. Es folgt die weitergehende Präparation des Nervs inklusive umgebenden Bindegewebes nach distal bis zum Eintritt in den Kubitaltunnel [49]. Die zahlreichen, zum N. ulnaris ziehenden Gefäßäste werden mit einer bipolaren Pinzette

verödet. Nun wird das Kubitaltunnelretinakulum mit einem Skalpell oder einer Präparierschere in Längsrichtung des Nervs durchtrennt, sodass der N. ulnaris vollständig aus dem Kubitaltunnel gelöst werden kann. [40] Eine weitere Präparation nach distal wird durch die ersten motorischen Äste des Nervs zum M. flexor carpi ulnaris und zum M. flexor digitorum profundus limitiert. Die Nervenäste sollten zwar präparatorisch dargestellt, aber nicht durchtrennt werden. [40]

Für den weiteren Verlauf der Operation wird der N. ulnaris einmalig mit einem Vessel-Loop umfahren und vor den Epicondylus medialis humeri verlagert um ausreichenden Zugang zum distalen Humerus zu erlangen [48]. Diesen Vorgang bezeichnet man auch als (temporäre) anteriore Transposition des N. ulnaris. Während der gesamten Operation gilt es unbedingt zu verhindern, dass Zug- oder Druckkräfte auf den N. ulnaris wirken [50].

Olekanonosteotomie und Frakturversorgung

Zur Exposition des distalen Humerus wird eine V-förmige Osteotomie des Olekanons (Chevron-Osteotomie, Abb. 1.4a) vorgenommen und der distale Anteil des M. triceps brachii unter dezemtem Zug nach proximal vom Humerus abpräpariert. Das osteotomierte Olekanonfragment und der präparierte M. triceps brachii werden nach proximal umgeschlagen und mit einem feuchten Bauchtuch umwickelt. [40, 48]

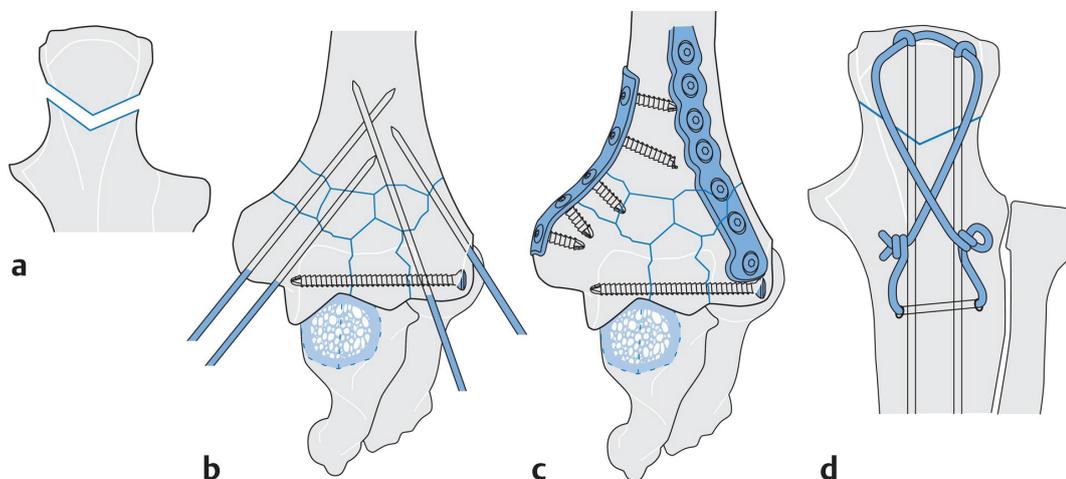


Abb. 1.4: Chirurgische Versorgung der DHF. Die Abbildung veranschaulicht die chirurgische Versorgung der distalen Humerusfraktur. (a) Chevron-Osteotomie, (b) Rekonstruktion der Gelenkfläche, (c) Plattenosteosynthese am distalen Humerus und (d) Zuggurtungsosteosynthese der Olekanonosteotomie. Graphik aus „Checkliste Traumatologie“ [43] des Thieme Verlags.

Nach initialer Darstellung des Frakturmusters werden sowohl der distale Gelenkblock als auch die humerale Gelenkfläche anatomisch rekonstruiert. Dafür werden die Fragmente temporär mithilfe einer Repositionszange gegeneinander stabilisiert und über transtrocchleäre Kirschner-Drähte fixiert (1.4b). Diese werden über den Epicondylus medialis humeri und den Epicondylus lateralis humeri eingebracht. [48] Alternativ kann eine - von medial nach lateral verlaufende - Zugschraube zur Osteosynthese des Gelenkblocks verwendet werden [49].

Anschließend erfolgt über die Einbringung von winkelstabilen und anatomisch vorgeformten Osteosyntheseplatten die Fixierung des Gelenkblocks am Humerusschaft sowie die Rekonstruktion von medialem und lateralem Pfeiler⁶. Der mediale Pfeiler wird dabei stets über eine Platte am medialen Humerus versorgt während der laterale Pfeiler sowohl über eine radiolaterale (parallele Verplattung) als auch über eine radiodorsale Plattenanlage (auch perpendikuläre oder rechtwinklige Verplattung) versorgt werden kann.⁷ Art und Anzahl der verwendeten Schrauben richten sich in jedem Fall nach dem Frakturmuster und dem eingebrachten Implantat. [40, 48] Zur Sicherstellung einer adäquaten Frakturstabilisierung sollten jedoch wenigstens drei bikortikale Schrauben proximal des Frakturspalts eingebracht werden. [48]

Nach erfolgreicher Rekonstruktion der Fraktur wird der M. triceps brachii in seine physiologische Lage gebracht und die Olekranonosteotomie über eine Zuggurtungssynthese refixiert (Abb. 1.4c) [40, 48, 49].

Versorgung des N. ulnaris

Im Anschluss an die Frakturversorgung wird in Abhängigkeit vom intraoperativen Befund eine endgültige anteriore Transposition des N. ulnaris gegenüber einer Rückverlagerung des Nervs in das ursprüngliche Bett des Sulcus nervi ulnaris abgewogen. Grundsätzlich liegt die Entscheidung zur anterioren Transposition des N. ulnaris im Ermessen des Operateurs. Direkte Gründe für eine anteriore Transposition ergeben sich zumeist aus einer intraoperativ sichtbaren Einklemmung des N. ulnaris an der medialen Osteosyntheseplatte sowie durch intraoperative Irritationen des Nervs oder präoperative neurologische Störungen des N. ulnaris. [48, 53] Andere Autoren empfehlen hingegen eine routinemäßige anteriore Transposition des N. ulnaris [4] beziehungsweise Rückverlagerung des Nervs in den Sulcus nervi ulnaris [54]. Die anteriore Transposition des N. ulnaris kann sowohl subkutan als auch intra- oder submuskulär erfolgen [55]. Am weitesten verbreitet ist jedoch die subkutane Transposition bei welcher der Nerv langstreckig freipräpariert wird und anschließend in einem subkutanen Bindegewebsmantel ventral des Epicondylus medialis belassen wird [53, 56].

Idealerweise kann der N. ulnaris jedoch in sein physiologisches Bett zurückverlagert werden. Der knöcherne Boden des Sulcus nervi ulnaris muss dabei auf Stufen oder einliegendes Fremdmaterial untersucht werden. Unter adäquaten Bedingungen kann der Nerv anschließend mitsamt einer umgebenden Fettschicht in den Sulcus nervi ulnaris zurückverlagert werden und der Kubitaltunnel mit einer Naht der Stärke 4-0 locker geschlossen werden. In jedem Fall sollte eine abschließende endgradige Beugung und Streckung

⁶Als Pfeiler werden der mediale (ulnare) und laterale (radiale) lasttragende Anteil des distalen Humerus bezeichnet, die Humerusschaft und Gelenkblock miteinander verbinden. Nach distal laufen die Pfeiler dreieckförmig auseinander und verbinden sich über eine dünne Knochenlamelle, die ventral die Fossa coronoidea und dorsal die Fossa olecrani bilden. [51]

⁷Aufgrund der variierenden Ergebnisse verschiedener Arbeiten ist bis heute keine Empfehlung für die Platzierung der lateralen Platte möglich [36, 39, 40, 45–48, 51, 52]. Die Entscheidung für eines der Verfahren ist der Präferenz des Operateurs in Bezug auf das individuell vorliegende Frakturmuster überlassen [47].

des Ellenbogengelenks stattfinden, sodass eine Einklemmung des N. ulnaris ausgeschlossen werden kann. [40]

Abschluss der Operation

Abschließend wird die Wunde ausgiebig gespült, eine tiefe Redon-Drainage eingelegt und das Gewebe sowie der Kapsel-Band-Apparat schichtweise verschlossen. Ein Oberarmgips sollte vorübergehend als Schiene angelegt werden. Die physiologische Übungstherapie kann idealerweise am ersten postoperativen Tag begonnen werden. [40]

Komplikationen

Postoperative Komplikationen sind bis heute eine führende Problematik der chirurgischen Versorgung distaler Humerusfrakturen [40]. Neben allgemeinen Komplikationen der operativen Frakturversorgung - wie Infektionen, Blutungen, Wund- und Frakturheilungsstörungen, periartikulären Ossifikationen, Kapselfibrose, usw. - stellt insbesondere der Umgang mit dem N. ulnaris eine große Herausforderung für den Operateur dar. Funktionsstörungen des N. ulnaris werden in bis zu 51 %⁸ der Fälle angegeben, sind jedoch in ihrem Charakter, ihrer Häufigkeit und ihrer Persistenz sehr variabel. [4, 44, 48, 51, 53, 54] Als Ursache werden sowohl mechanische Einflüsse - durch Fremdmaterial, Narbengewebe, heterotope Ossifikation, Kallusbildung, usw. - als auch intraoperative Druckschäden oder die langstreckige Devaskularisation des N. ulnaris im Rahmen der Präparation in Betracht gezogen [4, 29, 53, 57, 58]. Bis heute werden Verfahren wie die anteriore Transposition des N. ulnaris zur Vermeidung postoperativer Funktionsstörungen diskutiert [53, 54, 59]. Zum aktuellen Zeitpunkt finden sich jedoch keine Ergebnisse aus denen eine grundsätzliche Empfehlung abgeleitet werden könnten. Folglich bedarf es dringend weiterer Studien zur intraoperativen Handhabung des N. ulnaris. [53, 56]

1.3 Das Bewegungsverhalten des N. ulnaris

Die vorliegende Arbeit soll insbesondere das physiologische und postoperative Bewegungsverhalten des N. ulnaris evaluieren. Diesbezüglich haben bereits zahlreiche Autoren verschiedene Faktoren untersucht, die Verlaufsänderungen des N. ulnaris in Beugung des Ellenbogengelenks induzieren könnten. Hierzu gehören beispielsweise die flexionsbedingte Verengung des Kubitaltunnels (s. Kapitel 1.1.4) oder ein tief ausgebildeter Sulcus nervi ulnaris [60]. Auf Basis dieser Untersuchungen evaluierten weitere Arbeiten das dynamische Bewegungsverhalten des N. ulnaris [20, 60–62]. Die grundlegende Annahme dieser Studien ist dabei, dass der streckseitige Verlauf des N. ulnaris bei Beugebewegungen des Ellenbogengelenks eine Anpassung des Nervs an die vergrößerte Distanz zwischen seinem Ursprung und der finalen Innervation der Hohlhand erfordert. Diese Anpassung wird auf verschiedene Mechanismen des N. ulnaris zurückgeführt, die eine individuelle Ausprägung

⁸Hierbei muss beachtet werden, dass einige Arbeiten keine eindeutige Einteilung zum Auftretenszeitpunkt der Funktionsstörung in präoperativ, direkt postoperativ und verzögert postoperativ vornehmen. Eine repräsentative Aussage zur Auftretenswahrscheinlichkeit einer postoperativen Funktionsstörung nach distaler Humerusfraktur ist nach heutigem Stand nicht verfügbar. [4]

aufweisen und in Zusammenhang mit den oben genannten Einflussfaktoren zu betrachten sind. Eine übersichtliche Darstellung, der zum aktuellen Zeitpunkt nachgewiesenen Anpassungsmechanismen des N. ulnaris an die Beugebewegung des Ellenbogengelenks findet sich im Folgenden. Gleichzeitig ist der Einfluss einer Plattenosteosynthese am distalen Humerus - mit einer möglichen Einschränkung der Anpassungsmechanismen - momentan unklar und soll in der vorliegenden Studie zusätzlich zum physiologischen Bewegungsverhalten evaluiert werden.

Morphologische Veränderungen des N. ulnaris

Schuind et al. [22] wiesen in einer - durch Präparationen gestützten - Studie zur Biodynamik des N. ulnaris nach, dass der N. ulnaris in Streckstellung des Ellenbogengelenks proximal des Kubitaltunnels in seinem Verlauf aufgelockert ist und durch eine Beugung des Gelenks in diesem Bereich zunehmend gestreckt wird. Darüber hinaus untersuchten Patel et al. [24] wenige Jahre später mithilfe nicht-invasiver, MRT-gestützter Bildgebungen erneut die morphologischen Veränderungen des N. ulnaris bei der Beugung des Ellenbogengelenks. Hierbei zeigte sich vor allem in den sagittalen Schnittbildern die Aufhebung des gewundenen Nervenverlaufs mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks [24]. In Zusammenhang mit der beugebedingten Streckung des N. ulnaris beschrieben diese und weitere Autoren eine zusätzliche Abflachung des Nervs in Beugung des Ellenbogengelenks [20, 22, 24].

Dehnung des N. ulnaris

Die beschriebenen, morphologischen Veränderungen des N. ulnaris führten die Autoren Gelberman et al. [21] im Rahmen einer zusätzlichen Studie auf eine Dehnung des N. ulnaris unter Flexion des Ellenbogengelenks zurück. Dabei wiesen die Autoren nach, dass der intraneurale Druck im Vergleich zum extraneuralen Druck im Kubitaltunnel mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks deutlich stärker ansteigt und in einer Beugung von 130° durchschnittlich 45 % über dem extraneuralen Druck liegt. Dies zeigte sich auch bei Vergleichsmessungen in einem Bereich von vier Zentimetern proximal des Kubitaltunnels. Die Autoren schlussfolgerten, dass eine intraneurale Druckerhöhung im gesunden, flektierten Ellenbogengelenk am ehesten durch eine zugkraftbedingte Verformung des N. ulnaris zurückzuführen ist. [21] Bereits 1973 hatten auch Apfelberg et al. [7] eine durchschnittliche Dehnung des N. ulnaris von 4,7 mm (proximal und distal des Ellenbogengelenks) bzw. 5,4 mm (im Bereich des Ellenbogens) nachgewiesen. Auch die Autoren Schuind et al. [22] bestimmten in der oben genannten Studie die Dehnung des N. ulnaris und zeigten, dass der N. ulnaris in einem definierten Bereich proximal des Ellenbogengelenks ab einer Beugung von 90° - im Vergleich zur vollen Streckung des Gelenks - eine durchschnittliche Dehnung von 18 % erfährt. Neben einer hohen interindividuellen Variabilität beschrieben die Autoren darüber hinaus, dass distal des Kubitaltunnels keine entsprechende, signifikante Dehnung gemessen werden konnte. [22]

Verlagerung der N. ulnaris

Vor allem die sonographische Evaluation des Kubitaltunnels konnte in der Vergangenheit den Nachweis erbringen, dass der N. ulnaris mit zunehmender Flexion - zusätzlich zu den oben beschriebenen Mechanismen - eine physiologische Ventralbewegung erfährt, die in Richtung des Kubitaltunnelbodens gerichtet ist und mit einer Bewegung nach medial verbunden sein kann [20, 61, 63]. Zusätzliche Bestätigung fanden die sonographischen Ergebnisse in der bereits erwähnten, MRT-gestützten Studie von Patel et al. [24], wobei die genannte Ventralbewegung in den zitierten Studien als Verkürzung des Radius bei der Bewegung des N. ulnaris um das Ellenbogengelenk herum verstanden wird und somit zu einer Reduktion der Einwirkung von Zugkräften auf den Nerv führen kann.

1.4 Ziele der Studie

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist einerseits die Beurteilung der dynamischen Bewegung des N. ulnaris im Bereich des Ellenbogens sowie der Einflüsse einer Plattenosteosynthese an der medialen Seite des distalen Humerus auf die vermuteten Bewegungsmuster. Hierfür soll sowohl ein neu entwickeltes, röntgenbasiertes Untersuchungsverfahren an Körperspendern angewandt und bewertet werden als auch eine Einordnung der entsprechenden Ergebnisse in die teilweise kontrovers diskutierte Fachliteratur erfolgen. Darüber hinaus wird anhand von Schnittpräparaten des N. ulnaris mehrerer Körperspender eine Beurteilung der extra- und intraneuralen Gefäßversorgung des N. ulnaris im Vergleich proximaler und distaler Anteile des Nervs vorgenommen. Schließlich soll die vorliegende Arbeit weitere Erkenntnisse zum näheren Verständnis der vaskulären und dynamischen Anatomie des N. ulnaris beitragen und vor diesem Hintergrund einen Ausblick auf mögliche Gefahrenpunkte der chirurgischen Versorgung distaler Humerusfrakturen geben.

KAPITEL 2

Material und Methoden

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden mit Zustimmung der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität unter der Studiennummer 5188 durchgeführt.

2.1 Histologische Untersuchungen

2.1.1 Arbeitsmittel

Geräte

Die verwendeten Geräte sind in der Tabelle 2.1 alphabetisch aufgelistet.

Tabelle 2.1: Geräte der histologischen Untersuchungen

Gerät	Bezeichnung	Hersteller
Gewebeinfiltrationsautomat	TP1020	Leica
iMac	27 Zoll (2011)	Apple Inc.
Mikroskop	BA410E	Motic®
Mikroskopkamera	Moticam 10	Motic®
Mikrotom	HM360	Thermo Fischer Scientific

Instrumente

Die verwendeten Instrumente sind in der Tabelle 2.2 alphabetisch aufgelistet.

Tabelle 2.2: Instrumente der histologischen Untersuchungen

Instrument	Bezeichnung	Hersteller
Pinzette, chirurgisch	BD557R	Aesculap (B. Braun)
Skalpellsgriff	Modell Nr. 1, 13 cm	C. Bruno Bayha GmbH
Skalpells Klinge	Größe 23,24	C. Bruno Bayha GmbH

Substanzen

Die verwendeten Substanzen sind in der Tabelle 2.3 alphabetisch aufgelistet. Die Eosinlösung war lediglich auf 0,3% wässrig verdünnt worden.

Tabelle 2.3: Substanzen der histologischen Untersuchungen

Substanz	Bezeichnung	Hersteller
Eindeckmedium	DePeX	Serva
Entwachsungsmedium	Roticlear®	Carl Roth
Eosin-Färbung	0,3%-ige Eosin-Lösung	Eigenherstellung
Formalinlösung		Eigenherstellung (s. Anhang)
Gewebemarkierungsfarbe	Tissue Marking Dye (green)	Cancer Diagnostics Inc.
Hämalaun-Färbung	Hämalaunlösung sauer nach Mayer	Carl Roth
Isopropanol	2-Propanol	Carl Roth
Paraffin	Surgipath Paraplast Plus	Leica
Xylol	Xylol (Isomere)	Carl Roth

2.1.2 Durchführung

Entnahme der Präparate

Für die histologische Darstellung der arteriellen Gefäßversorgung des N. ulnaris wurden fünf Nn. ulnares aus drei in Formalin fixierten Körperspendern entnommen, die im Folgenden als Präparate 1 bis 5 (P1 bis P5) bezeichnet werden sollen. Bei keinem der Körperspender zeigten sich Hinweise auf Voroperationen oder offensichtliche Pathologien im Bereich des Ellenbogens.

Die Körperspender befanden sich während der Präparation in Bauchlage auf einem Präpariertisch mit leicht abduziertem Arm. Der Hautschnitt erfolgte dorsalseitig mit einem Skalpell und reichte von zehn Zentimetern proximal des Epicondylus medialis humeri, über diesen herüber, bis zehn Zentimeter distal des Epicondylus medialis humeri. Am proximalen und distalen Ende des Hautschnitts wurde ein zusätzlicher Schnitt über eine Strecke von drei Zentimetern nach medial und lateral gesetzt, sodass die Haut nach medial und lateral abpräpariert und umgeschlagen werden konnte.

Anschließend erfolgte die Präparation des Fettgewebes bis auf die Faszie des M. triceps brachii beziehungsweise der Flexorenloge des Unterarms. Im Bereich des Ellenbogengelenks wurde das Kubitaltunnelretinakulum nach sorgfältiger Präparation an seiner Insertion an Epicondylus medialis humeri und medialer Olekranonkante durchtrennt. In einem nächsten Schritt wurde der Verlauf des N. ulnaris visuell oder palpatorisch identifiziert und der Nerv einige Zentimeter proximal sowie distal des Epicondylus medialis humeri durchtrennt, sodass dieser in einem Präparatblock - mit einem Gewebemantel von ungefähr einem Zentimeter zu allen Seiten - aus dem umgebenden Muskel- und Bindegewebe präpariert werden konnte. Zur Schonung des Gewebemantels erfolgte die Präparation im Sulcus nervi ulnaris scharf und unmittelbar am Knochen. Die Seite des Präparats, die in-situ dem Olecranon zugewandt gewesen war wurde mit einer Gewebefarbe dünn markiert um in den späteren Schnittpräparaten eine anatomische Orientierung gewährleisten zu können (Abb. 2.1).

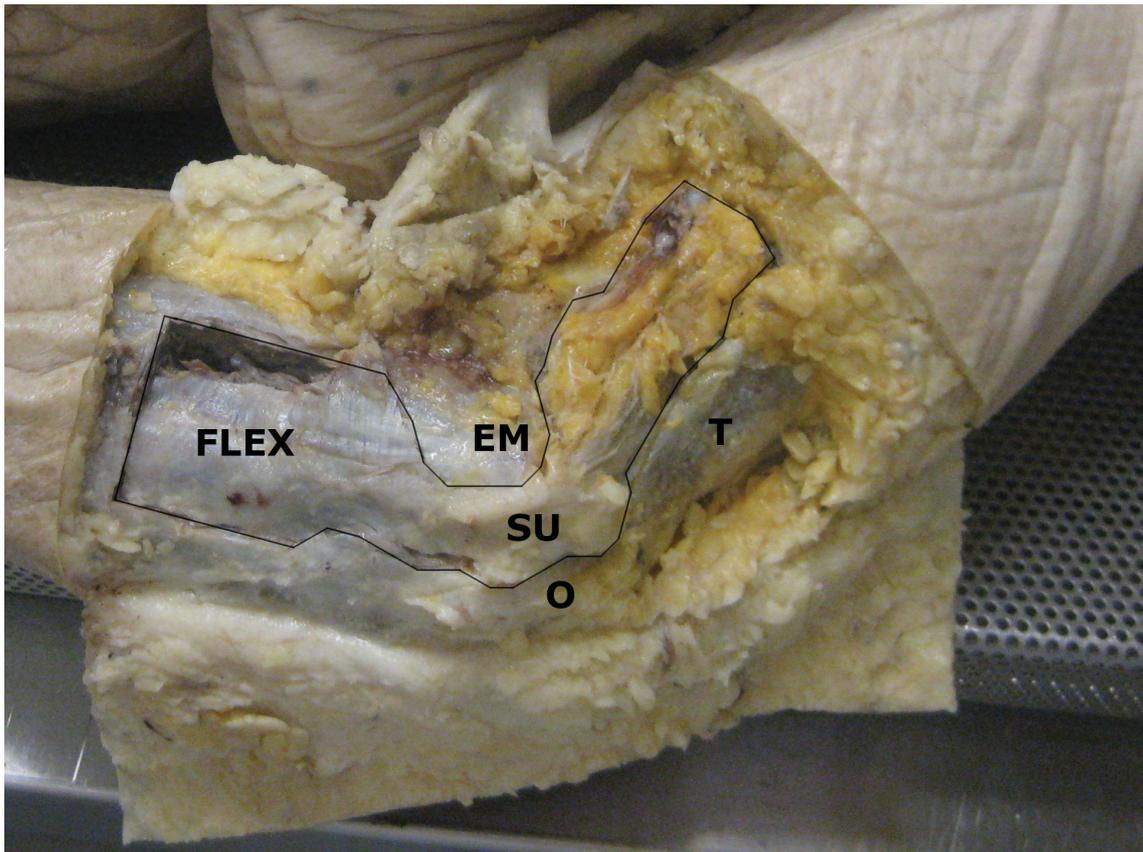


Abb. 2.1: Präparatentnahme. Präparationssitus eines rechten Ellenbogens vor Entnahme des Präparatblocks (Schnittführung nachgezeichnet) mit nach medial und lateral weggeklappten Hautlappen. Das subkutane Fettgewebe ist größtenteils abpräpariert. Der N. ulnaris ist nicht sichtbar. FLEX *Flexorenloge des Unterarms*, EM *Epicondylus medialis humeri*, SU *Sulcus nervi ulnaris*, O *Olekranon*, T *M. triceps brachii*

Erstellung der Schnittpräparate

Zur Erstellung von Querschnittpräparaten des N. ulnaris wurden von den Präparaten 2 bis 5 jeweils drei Blöcke der Dicke 0,5 bis 1 Zentimeter mit einem Skalpell abgesetzt und in einer entsprechend beschrifteten Präparatkapsel platziert. Die Entnahme der Blöcke erfolgte dabei am proximalen und distalen Ende des Präparats (5 bis 8 Zentimeter proximal und distal des Epicondylus medialis humeri) sowie im Bereich des Kubitaltunnels (Abb. 2.2 und 2.3). Von Präparat 1 wurde nur ein proximaler Präparatblock als Querschnittpräparat aufbereitet. Für die spätere Erstellung von Querschnitten musste der Präparatblock mit der in situ nach proximal weisenden Seite nach unten in die Präparatkapsel gestellt werden (Abb. 2.4(a)).

Ergänzend wurde ein einzelner Block von ungefähr zwei Zentimetern Länge am proximalen Ende des Präparats 1 abgetrennt und mit der in situ dem Humerus zugewandten Seite auf den Boden der Kapsel gelegt (Abb. 2.4(b)). Hieraus ergaben sich später Anschnitte des N. ulnaris in Längsrichtung.

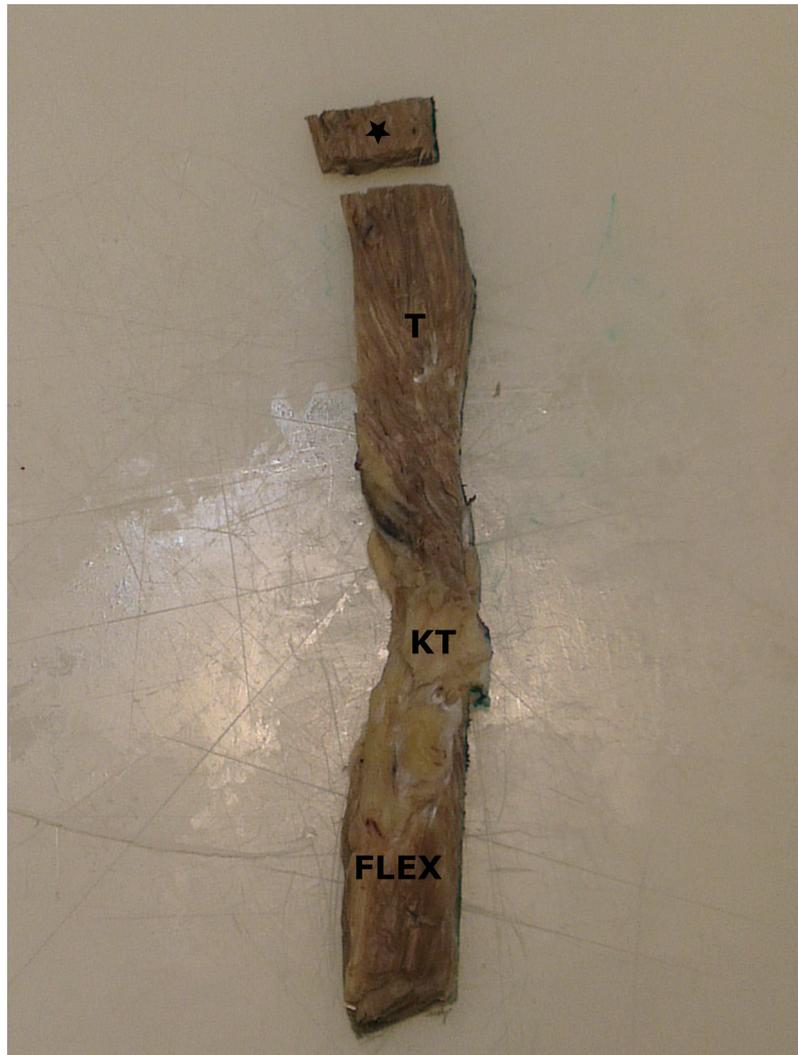
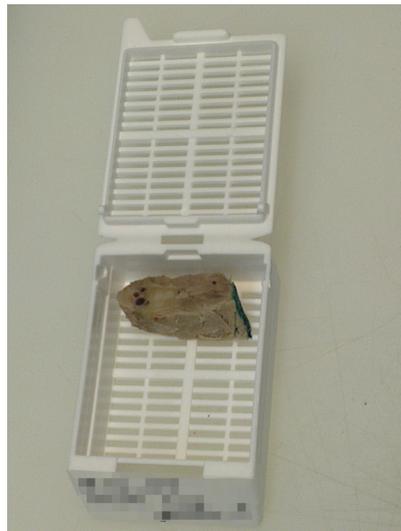


Abb. 2.2: Proximaler Schnittblock. P1 nach Färben der olekranonahen Seite und Absetzen des proximalen Blocks (Sternchen).



Abb. 2.3: Kubitaler und distaler Schnittblock. P2 nach Färbung der olekranonahen Seite und Absetzen des distalen Blocks (schwarze Kugel) sowie des Blocks im Bereich des Kubitaltunnels (Sternchen).



(a) Einbettung für Querschnitte



(b) Einbettung für Längsschnitte

Abb. 2.4: Präparatbettung. Verschiedene Formen der Einbettung in die Präparatkapseln.

Zur Auswaschung der Formalinlösung wurden alle Präparate 24 Stunden unter laufendem Leitungswasser platziert und anschließend mithilfe des Gewebeeinfiltrationsautomaten TP1020 der Firma Leica in mehreren Schritten entwässert und paraffiniert. Die einzelnen Schritte sind im Folgenden aufgeführt und wurden - sofern nicht näher bezeichnet - unter Raumtemperatur durchgeführt.

1. Isopropanolol 50% für 8 Stunden
2. Isopropanolol 70% für 8 Stunden
3. Isopropanolol 90% für 8 Stunden im Vakuum
4. Isopropanolol 96% für 10 Stunden
5. Isopropanolol 96% für 10 Stunden im Vakuum
6. Isopropanolol absolut für 10 Stunden
7. Isopropanolol absolut für 10 Stunden im Vakuum
8. Roticlear für 10 Stunden
9. Roticlear für 10 Stunden im Vakuum
10. Roticlear für 10 Stunden
11. Umsetzung des Präparatblocks in ein passendes Gußsiebchen
12. Paraffinierung für 12 Stunden im Vakuum bei 60° Celsius
13. Paraffinierung für 8 Stunden bei 60° Celsius

Nach Beedigung der zweiten Paraffinierung wurden die Gußsiebchen auf eine Eisplatte gelegt bis der Paraffinblock sich davon löste. Daraufhin konnten die Präparate auf die Rückseite der Präparatkapseln paraffiniert werden und mit einem Microm HM 360 der Firma Thermo Fischer Scientific in Schichten von $6\ \mu\text{m}$ geschnitten werden.⁹ Abschließend wurden die Schnittpräparate auf einem Objektträger mit adhäsiver Oberfläche platziert und nach dem folgenden Schema mit Hämalaun-Eosin gefärbt.

1. Bebrütung der getrockneten Schnitte im Brutschrank bei 60° Celsius für 20 Minuten
2. sofortiges Tränken in Roticlear für zwei Mal 10 Minuten ohne vorherige Abkühlung
3. Tränken in absteigender Alkoholreihe mit 100%-igem, 90%-igem, 80%-igem und 70%-igem Alkohol für jeweils 2 Minuten
4. Tränken in Aqua bidest für wenige Sekunden
5. Kernfärbung in saurem Hämalaun nach Mayer für acht bis zehn Minuten
6. Abspülen unter fließendem Leitungswasser für fünf Minuten
7. Plasmafärbung mittels 0,3%-igem Eosin für 90 Sekunden bis drei Minuten
8. erneutes Abspülen unter fließendem Leitungswasser für kurze Zeit
9. Tränken in aufsteigender Alkoholreihe mit 70%-igem, 80%-igem und 90%-igem Alkohol für jeweils 2 Minuten
10. abschließendes Tränken in 100%-igem Alkohol (zwei Mal) und Xylol (zwei Mal) für jeweils zwei Minuten
11. Eindeckung der Schnitte mit DePeX und Deckplättchen
12. Trocknung der fertigen Schnittpräparate (Abb. 2.5) für zwei Tage



Abb. 2.5: Eingedecktes Längsschnittpräparat. Beispielhaft abgebildet ist ein fertiges Längsschnittpräparat von P1.

⁹Von den Querschnittpräparaten wurde jeweils ein Objektträger mit zwei Schnittpräparaten angefertigt. Von den Längsschnitten wurden alle $50\ \mu\text{m}$ ebenfalls zwei Schnittpräparate aufgefangen.

Auswertung

Die histologische Aufarbeitung des Präparats 1 ergab ein Querschnitt des N. ulnaris (ungefähr fünf Zentimeter proximal des Epicondylus medialis humeri) und 30 weitere Objektträger mit jeweils zwei Schnittpräparaten des N. ulnaris in Längsrichtung (drei bis fünf Zentimeter proximal des Epicondylus medialis humeri). Anschnitte von P1 im Kubitaltunnel oder distal des Epicondylus medialis humeri liegen nicht vor.

Die Präparate 2 bis 5 wurden als Querschnitte des N. ulnaris angefertigt, sodass letztendlich von jedem Präparat drei Objektträger (proximal und distal des Kubitaltunnels und im Bereich des Kubitaltunnels) mit jeweils zwei Anschnitten des Nervs entstanden. Vereinfachend sollen die Schnitte im Folgenden mit ihrer Präparatnummer und der Lage zum Epicondylus medialis humeri bzw. im Kubitaltunnel bezeichnet werden - beispielsweise 'P1prox' für den proximalen Anschnitt des Präparats 1 oder 'P3kub' für den Anschnitt des dritten Präparats im Kubitaltunnel.

Die orientierende Betrachtung der Schnittpräparate erfolgte am Mikroskop BA410E der Marke Motic®. Über die daran angeschlossene Mikroskopkamera Moticam 10 konnten die mikroskopisch dargestellten Strukturen über die Programme „Motic Live Imaging Module“ und „Motic Images Plus 3.0 ML“¹⁰ auf einem iMac-Computer digital abgebildet, gespeichert und anschließend ausgewertet werden.

¹⁰Beide Programme sind ausschließlich über den Kauf einer zugehörigen Mikroskopkamera zu erwerben.

2.2 Radiologisch-anatomische Untersuchungen

In einem experimentellen Ansatz sollte die Lage des N. ulnaris vor und nach Implantation einer anatomischen Osteosyntheseplatte am medialen, distalen Humerus dargestellt und verglichen werden. Hierfür wurden unter sonografischer Kontrolle röntgendichte Stücke eines Metalldrahts über eine Kanüle in die Nn. ulnares mehrerer Körperspender eingebracht und anschließend röntgenologisch abgebildet. Abschließend erfolgte eine computerbasierte Auswertung der Bilddaten. Die interventionelle Sonografie des N. ulnaris an Körperspendern stellt dabei einen neuen, experimentellen Untersuchungsansatz zur Darstellung von Nervenverläufen dar. Dementsprechend wurden die theoretischen Ansätze dieses Verfahrens über das Prinzip von „Versuch und Irrtum“ mehrfach getestet bis sich eine zufriedenstellende Methodik entwickelt hatte. Diese soll im Folgenden näher beschrieben werden.

2.2.1 Arbeitsmittel

Geräte

Die verwendeten Geräte sind in der Tabelle 2.4 alphabetisch aufgelistet.

Tabelle 2.4: Geräte der radiologisch-anatomischen Untersuchungen

Gerät	Bezeichnung	Hersteller
Bohrmaschine	SKIL 2834	SKIL®
C-Bogen	BV Endura (2.2.6)	Philips Medial Systems
Handtacker	Lux-Tools Handtacker Comfort	Emil Lux GmbH & Co. KG
Schallkopf, linear	75L38EB	Mindray
Ultraschallgerät	DP-10	Mindray

Instrumente

Die verwendeten Instrumente sind in der Tabelle 2.5 alphabetisch aufgelistet.

Tabelle 2.5: Instrumente der radiologisch-anatomischen Untersuchungen

Instrument	Bezeichnung	Hersteller
Bohrer	verschiedene Größen	Craftomat®
Einmal-Injektions-Kanüle	0,9 mm x 40 mm	B. Braun
Nadelhalter	BM013R	Aesculap (B. Braun)
Pinzette, chirurgisch	BD557R	Aesculap (B. Braun)
Selbstspreizer	BV074R	Aesculap (B. Braun)
Skalpellsgriff	Modell Nr. 1, 13 cm	C. Bruno Bayha GmbH
Skalpells Klinge	Größe 23,24	C. Bruno Bayha GmbH

Materialien

Die verwendeten Materialien sind in der Tabelle 2.6 alphabetisch aufgelistet.

Tabelle 2.6: Materialien der histologischen Untersuchungen

Material	Bezeichnung	Hersteller
Duct Tape	n.n.bez.	tesa [®]
Europoolpalette	EPAL 1	n.n.bez.
Feindrahtklammern	Lux-Tools FE21, 10 mm	Emil Lux GmbH & Co. KG
Fixationssystem, externes	n.n.bez.	n.n.bez.
Hammer	n.n.bez.	n.n.bez.
Hautnaht	Daclon Nylon Blue, 3/8, 19 mm, DS-19	SMI
Kunststoffplane	n.n.bez.	n.n.bez.
Metalldraht	Durchmesser 0,3 mm	n.n.bez.
Osteosyntheseplatte, mediale	L/R, 629284	Stryker GmbH & Co. KG
Referenzkugel	Stahl, 5 mm	n.n.bez.
Referenzkugel	Stahl, 10 mm	n.n.bez.
Stahlschraube	4 mm x 70 mm	n.n.bez.

Substanzen

Die verwendeten Substanzen sind in der Tabelle 2.7 alphabetisch aufgelistet. Die Herstellungsanleitungen der Brust-Bauch-Injektionslösung nach Thiel und der Leicheninfusionslösung nach Thiel finden sich im Anhang.

Tabelle 2.7: Substanzen der radiologisch-anatomischen Untersuchungen

Substanz	Bezeichnung	Hersteller
Brust-Bauch-Injektionslösung nach Thiel		Eigenherstellung
Leicheninfusionslösung nach Thiel		Eigenherstellung
Ultraschallgel	Ultrasound Gel	Vermed [®]

2.2.2 Injektion der Metalldrähte

Es wurden vier obere Extremitäten von drei männlichen, nach Thiel fixierten Körperspendern (zwei rechte und zwei linke obere Extremitäten) in die Arbeit aufgenommen. Diese sollen im Folgenden als Untersuchungsobjekte 1 bis 4 bezeichnet werden. Bei keinem der Körperspender fanden sich Hinweise auf Voroperationen oder offensichtliche Pathologien im Bereich der oberen Extremität. In einigen Testreihen konnte gezeigt werden, dass der N. ulnaris aufgrund der Gewebezusammensetzung unter der Fixierung nach Thiel und der häufig vorzufindenden Atrophie des Nervs sowie der von ihm innervierten Muskulatur in vielen Fällen nicht hinreichend sonografisch darstellbar ist. Somit hatte eine Vorauswahl der Körperspender zu erfolgen, die einerseits durch eine optische Sichtung der zur Verfügung stehenden Körperspender sowie durch eine palpatorische Einschätzung des Zustands

des N. ulnaris im Bereich des Kubitaltunnels erfolgte. Abschließend wurde die Morphologie des N. ulnaris sonographisch beurteilt.

Im Folgenden befanden sich die Untersuchungsobjekte in Rückenlage auf einem Präpariertisch. Der zu untersuchende Arm wurde durch einen zweiten Untersucher vor dem Brustkorb des Körperspenders auf der Gegenseite manuell fixiert, sodass das gebeugte Ellenbogengelenk von ventral erreichbar war (Abb. 2.6).¹¹



Abb. 2.6: Versuchsaufbau der Metalldrahtinjektion. Versuchsaufbau während der sonographischen Darstellung des N. ulnaris. Untersucher 2 und 3 fehlen.

Der N. ulnaris wurde nach dem Auftragen von Ultraschallgel auf den Schallkopf sonographisch im Sulcus nervi ulnaris identifiziert und der Nervenverlauf nach proximal und

¹¹Die Flexion des Ellenbogengelenks ist dringend zu empfehlen, da der N. ulnaris hierdurch angemessen im Sulcus nervi ulnaris fixiert ist und die anschließende Injektion deutlich erleichtert wird. Alternativ kann der N. ulnaris mit zwei Hautnähten im Sulcus nervi ulnaris transkutan unterfahren werden und während des Injektionsvorgangs durch Zug an den Nähten gegen den Epicondylus medialis humeri fixiert werden. Dies ist jedoch invasiver und erbringt nur in wenigen Fällen eine ausreichende Fixierung des Nerven.

distal verfolgt. Der hieraus gewonnene Eindruck über den Verlauf des N. ulnaris erleichterte die nachfolgende Injektion. Die Konfiguration des Schallgeräts wurde immer an die Schallbedingungen des jeweiligen Körperspenders angepasst, jedoch ergab sich in den meisten Fällen eine bestmögliche Darstellung des N. ulnaris über eine Voreinstellung des Ultraschallgeräts mit dem Namen „Vascular“.

Vorbereitend waren mehrere, 0,5 bis einen Zentimeter lange Stücke von einem Metalldraht abgetrennt worden, die im Folgenden als „Pins“ bezeichnet werden sollen. Für die Injektion war einer der Pins vollständig in die Spitze einer Einmal-Injektions-Kanüle eingeführt worden, sodass er durch ein ungefähr zehn Zentimeter langes, am spitzenfernen Ende der Kanüle eingebrachtes Stück desselben Metalldrahts („Vorschiebedraht“) vorgeschoben werden konnte. Am Vorschiebedraht wurde - in einem an die Länge des Pins angepassten Abstand zum hinteren Ende der Kanüle - ein Nadelhalter befestigt. Dieser stellte den exakten Austrieb des Pins bei der Injektion sicher (Abb. 2.7).



Abb. 2.7: Injektionsvorrichtung. Kanüle mit einliegendem Pin und Vorschiebedraht. Der Abstand des Nadelhalters zum Ende der Kanüle entspricht der Länge des eingebrachten Pins.

Es erfolgte nun die sonografische Darstellung des N. ulnaris im Längsschnitt durch den zweiten Untersucher. Der Arm des Körperspender musste wie oben beschrieben von einem dritten Untersucher in Flexion des Ellenbogengelenks vor dem Brustkorb des Körperspenders fixiert werden.¹² Zur Injektion des Pins durchstach der erste Untersucher die Haut ein bis zwei Zentimeter proximal oder distal der erwünschten Endlage des Pins im N. ulnaris und schob die Kanüle unter sonografischer Kontrolle - antero- oder retrograd - bis in den Nerv vor (Abb. 2.8). Der Winkel zwischen der Längsachse von Kanüle und Nerv sollte dabei so gering wie möglich sein um eine adäquate Platzierung des Pins in der Längsrichtung des N. ulnaris zu erreichen.

¹²Die Unterstützung durch einen dritten Untersucher zeigte sich nach einigen Testreihen als nahezu unverzichtbar. Einerseits benötigte der zweite Untersucher beide Hände um den Schallkopf in der punktgenauen Einstellung am Ellenbogen zu fixieren. Andererseits erforderte die Injektion des Pins die Beidhändigkeit des ersten Untersuchers, sodass die Kanüle und der Vorschiebedraht gleichzeitig bedient werden konnten. Somit musste die Fixierung des Arms im besten Fall durch einen Drittuntersucher erfolgen.

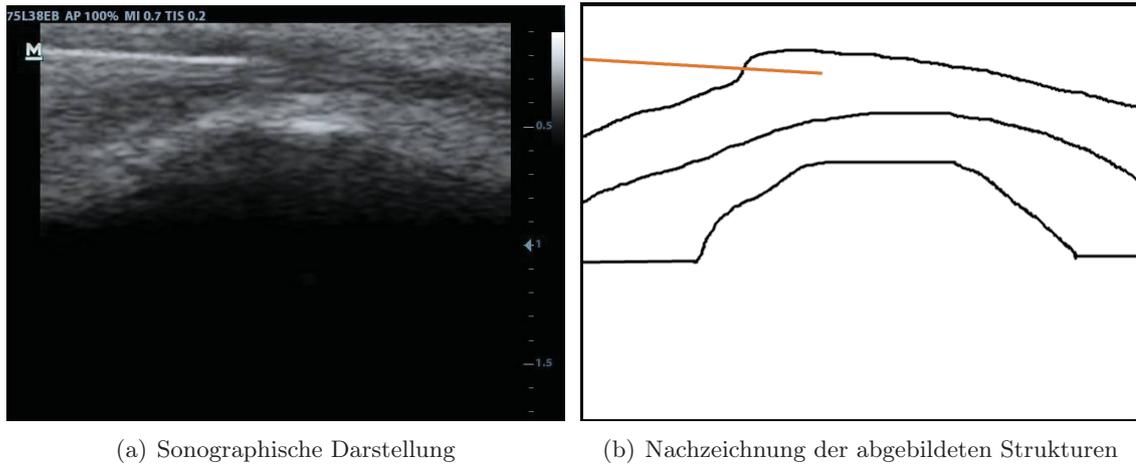


Abb. 2.8: Kanülenpositionierung im N. ulnaris. Die echoreiche Kanüle (orange) befindet sich intraneural im Längsverlauf des N. ulnaris. Die knöchernen Anteile des Humerus sowie der prominente EM sind ebenfalls abgebildet.

Nach sicherer Identifizierung und guter Positionierung des vorderen Anteils der Kanüle im N. ulnaris fixierte der Erstuntersucher den am Vorschiebedraht angeklebten Nadelhalter in seiner Position und zog die Kanüle - unter fortlaufender sonografischer Kontrolle - bis zum Anstoßen am Nadelhalter zurück. Die Kanüle und der Draht konnten daraufhin gemeinsam entfernt werden. Zur Sicherung des Ergebnisses wurde die Lage des Pins nochmals kontrolliert und beispielhaft dokumentiert (Abb. 2.9).¹³

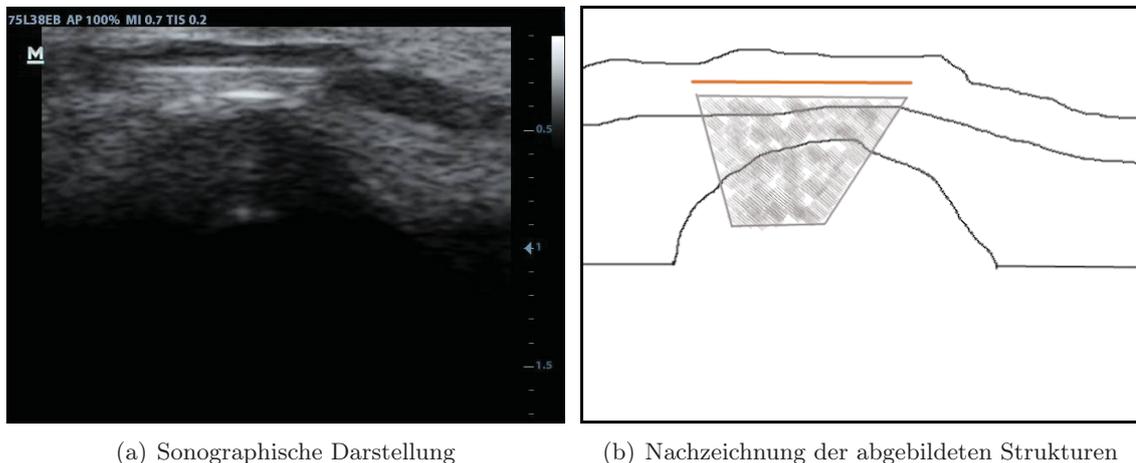


Abb. 2.9: Injizierter Pin. Der Pin (orange) liegt nach erfolgreicher, intraneuraler Injektion im Längsverlauf des N. ulnaris. Die echoreichen Areale (a) bzw. die schraffierte Fläche (b) stellen den Schallschatten des Pins dar. Die knöchernen Anteile des Humerus sowie der prominente EM sind erneut abgebildet.

¹³In einigen Fällen gestaltete sich die sonografische Lagekontrolle des Pins nach der Injektion erschwert. Als Ursache sind die schlechten Schallbedingungen unter einer Fixierung nach Thiel und der geringe Durchmesser der Pins zu vermuten.

Diesem Schema entsprechend wurden weitere Pins in den N. ulnaris injiziert, sodass im besten Fall ein Pin im Kubitaltunnel sowie jeweils ein Pin proximal und distal des Kubitaltunnels in den Nerv eingebracht worden waren. Unter guten Schallbedingungen wurden darüber hinaus bis zu zwei weitere Pins im Bereich des Ellenbogens in den N. ulnaris injiziert. Anschließend konnten die Körperspender den Röntgenuntersuchungen zugeführt werden.

2.2.3 Versuchsaufbau

Die Durchführung des Versuchs erfolgte an einem Präpariertisch. An das Kopfende des Tisches schloss eine Konstruktion aus zwei aufrecht stehenden Europaletten an, die über Querbretter in einem Abstand von 30 Zentimetern miteinander verschraubt waren. Am oberen Teil der Konstruktion wurden zwei Backen eines externen Fixationssystems in einem Abstand von zehn Zentimetern mit Schrauben fixiert, sodass diese mindestens acht Zentimeter nach oben aus der Konstruktion ragten. Zum Schutz der Holzkonstruktion wurde diese im Ganzen von einer Kunststoffplane umhüllt, die mit den Feindrahtklammern eines Handtackers am Holz der Europaletten fixiert wurde. Über den befestigten Backen des externen Fixateurs erfolgte eine - dem Durchmesser der Backen entsprechende - Inzision der Plane mit einem Skalpell, sodass die Plane dem Holz der Europaletten einheitlich anlag und die entstandenen Undichtigkeiten mit einem Klebenband an der Basis der Gelenke des externen Fixateurs geschlossen werden konnten. Der Anteil der Plane, der sich seitlich zwischen den Europaletten aufspannte wurde ebenfalls ausgeschnitten. Somit konnte in den anschließenden Untersuchungen ein C-Bogen des Modells „BV Endura“ zwischen den Europaletten platziert werden (Abb. 2.10).

Vorbereitung der Untersuchungsobjekte

Im Rahmen der Vorbereitung wurden eine große (Durchmesser: 10 mm) und zwei kleine (Durchmesser: 5 mm) Referenzkugeln aus Stahl an drei verschiedenen Stellen in Humerus und Ulna eingebracht. Diese waren für die späteren Auswertungen notwendig. Um eine direkte Interaktion mit dem N. ulnaris zu vermeiden erfolgte die Einbringung der Referenzkugeln außerhalb des Nervenverlaufs am proximalen, lateralen Humerus (große Kugel), am Epicondylus lateralis humeri und an der proximalen, lateralen Ulna (jeweils eine kleine Kugel). Die Implantation der Kugeln ist im Folgenden schrittweise erläutert:

1. Hautinzision (Länge: 1 cm)
2. vorsichtige Präparation des subkutanen Gewebes und der Muskulatur bis zum Knochenkontakt
3. Eröffnung des Markraums mit einem Metallbohrer des Durchmessers 4,5 mm (kleine Kugel) bzw. 9,5 mm (große Kugel) unter Schonung des Gewebes mit einem Selbstspreizer
4. sanftes Einschlagen der Kugel mit einem Hammer und einem dem Durchmesser der Kugel entsprechenden Metallstab

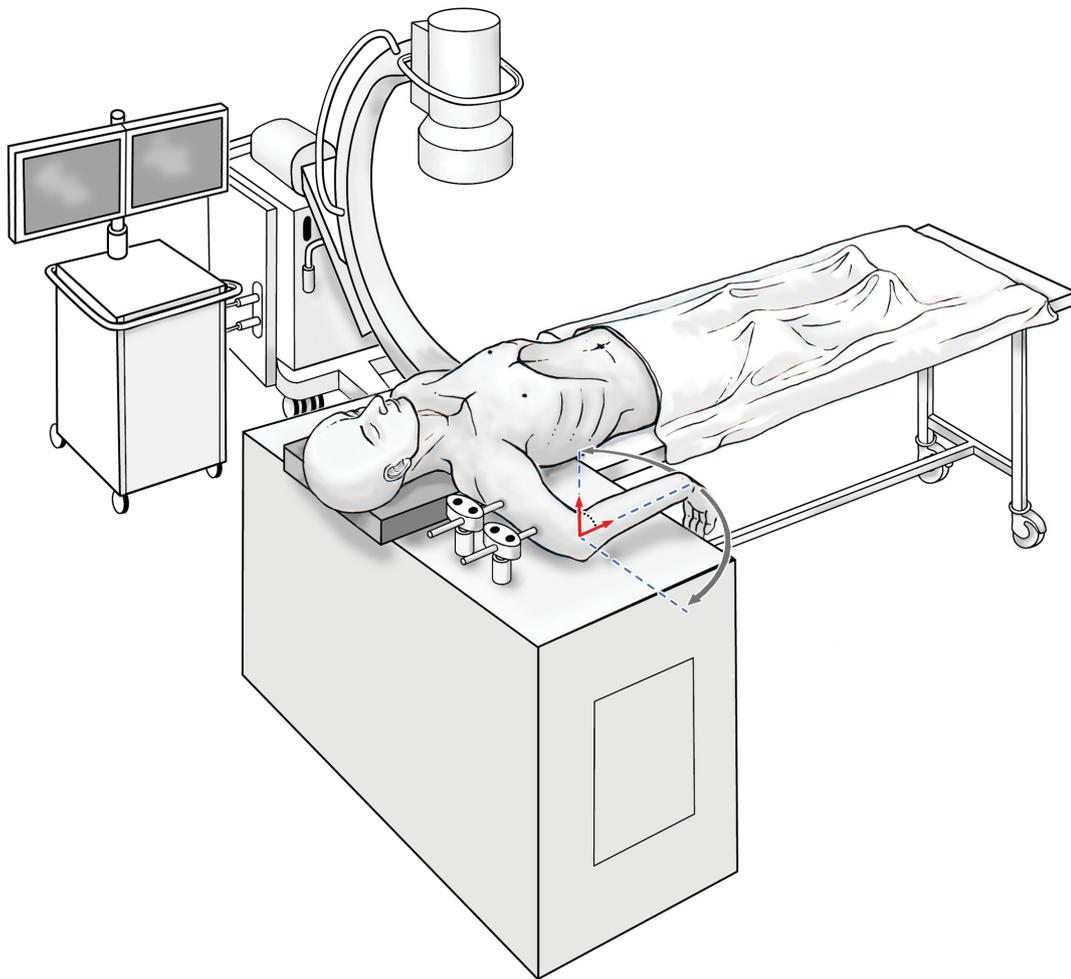


Abb. 2.10: Übersicht des Versuchsaufbaus. Die Abbildung zeigt den eigens für die Untersuchungen entwickelten Versuchsaufbau. Der rechte Oberarm ist bereits im externen Fixationssystem fixiert, sodass die Bewegungsebene des EBG senkrecht zum Lot eingestellt ist. Der C-Bogen kann sowohl von links als auch von rechts in die Konstruktion gefahren werden. Zeichnung: Frau Christine Opfermann der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Anschließend wurde das Untersuchungsobjekt in Rückenlage auf dem Präpariertisch platziert und vorsichtig mit dem Oberkörper kopfwärts auf die Konstruktion gezogen. Der zu untersuchende Arm befand sich in 90 Grad Abduktion des Schultergelenks und sollte sich in dieser Gelenkstellung mit der Oberarmrückseite unmittelbar am oberen Pol der Backen des externen Fixationssystems befinden. Unter Umständen musste der Oberkörper des Körperspenders hierfür leicht erhöht gelagert werden (s. Abb. 2.10).

In dieser Position konnte nun - unter Beachtung der zuvor eingebrachten Referenzkugeln - die erste Schanzsche Schraube des externen Fixationssystems von dorsolateral in den distalen Humerus eingebracht werden. Nach einer initialen Hautinzision von einem Zentimeter und einer vorsichtigen Präparation des darunter liegenden Gewebes bis zum Knochen wurde ein Bohrkanal mit einem Bohrer des Durchmessers 4 Millimeter vorgebohrt. Daraufhin konnte eine Schanzsche Schraube von 5 Millimetern Durchmesser maschinell in den

Humerus geschraubt werden und in die Backe des externen Fixationssystems eingespannt werden. Von nun an musste der Arm durch einen zweiten Untersucher stabilisiert werden um ein Ausbrechen der einzelnen Schanzschraube zu vermeiden.

In einem nächsten Schritt wurde der Oberarm mit einem zweiten Stab in der horizontalen Ebene fixiert werden. Dafür wurde der C-Bogen zwischen die Europaletten geschoben und die erwünschte Ebene mit Hilfe eines zweiten Untersuchers und unter Röntgenkontrolle des Ellenbogengelenks eingestellt. Während der zweite Untersucher den Arm in der erwünschten Stellung stabilisierte, schob der Erstuntersucher die proximal einzubringende Schanzschraube durch eines der Backenlöcher und markierte mit der Spitze der Schraube die entsprechende Eintrittsstelle.

Für die Einbringung der proximalen Schanzschraube musste die distal bereits eingebrachte Schraube nochmals aus der Backe gelöst werden. Es folgte die Einbringung der proximalen Schraube nach dem oben beschriebenen Schema an der zuvor markierten Stelle am dorsolateralen Oberarm. Geringe Abweichungen in der Positionierung der Schrauben konnten dabei über eine leichte Anpassung der Backen des externen Fixateurs ausgeglichen werden. Anschließend wurden die beiden Schanzschrauben in der proximalen und distalen Backe sicher eingespannt und die Einstellung der horizontalen Ebene unter Durchleuchtung des Ellenbogengelenks erneut vorgenommen. Ab diesem Zeitpunkt wurde keine weitere Stabilisierung des Oberarms durch den Zweituntersucher mehr benötigt.

Um die Einstellung des Beugungsgrads zu objektivieren wurde dem Ellenbogengelenk ein Goniometer aufgelegt, das mit seinem Drehpunkt über einen von lateral in den distalen Humerus eingebrachten K-Draht mit einer Dicke von einem Millimeter gesichert wurde. Die Lage des K-Drahts sollte sich dabei in einer Röntgenkontrolle punktuell und zentral in die Gelenkrolle des distalen Humerus projizieren und somit das Drehzentrum des Ellenbogengelenks in den Röntgenaufnahmen abbilden. Die Befestigung des proximalen und distalen Endes des Goniometers erfolgte mithilfe von Klebebandstreifen, die das Goniometer an Ober- und Unterarm fixierten. Die Ausrichtung des Goniometers orientierte sich dabei an der Längsachse von Humerus und Ulna, die zuvor durch eine Palpation abgeschätzt worden waren. Abschließend wurde der Unterarm hinsichtlich Pronation und Supination neutral eingestellt und durch einen zweiten Untersucher stabilisiert. Der Erstuntersucher fixierte diese Stellung durch Einbohrung eines weiteren K-Drahts durch Radius und Ulna, sodass die beiden Knochen nicht mehr gegeneinander rotiert werden konnten.

Die obere Extremität des Untersuchungsobjekts war somit in einer festgelegten Ebene am Humerus fixiert während der Unterarm im Ellenbogengelenk in einer rechtwinkligen Ebene zum Strahlengang des Bildwandlers bewegt werden konnte (Abb. 2.10 und 2.11).

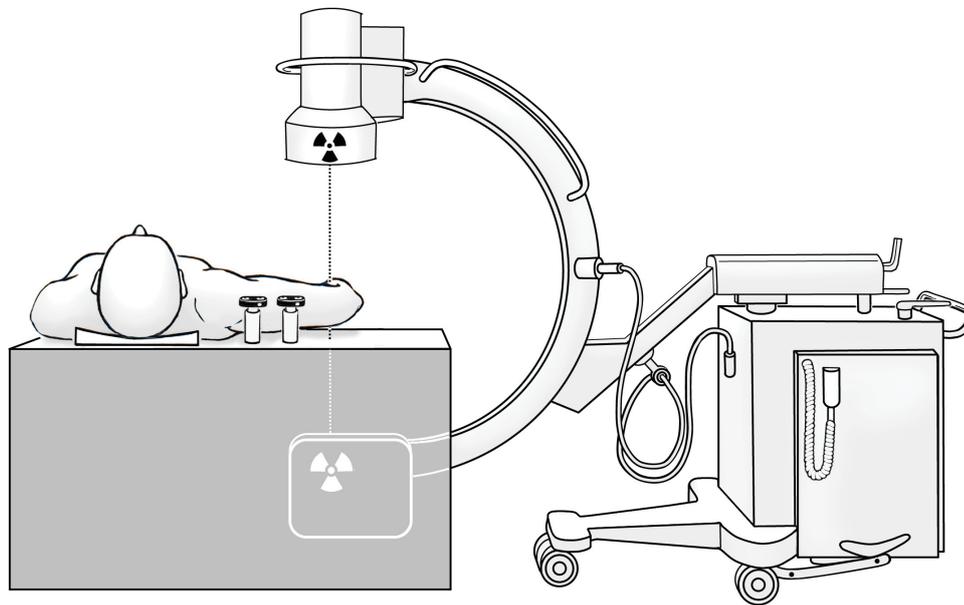


Abb. 2.11: Endgültiger Versuchsaufbau. Die Abbildung zeigt den fixierten Oberarm aus einem kranialen Blickwinkel des Untersuchungsobjekts. Der C-Bogen ist in die Konstruktion eingeschoben. Der Strahlengang ist senkrecht zur Bewegungsebene des EBG's ausgerichtet. Zeichnung: Frau Christine Opfermann der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

2.2.4 Versuchsdurchführung

Die obere Extremität der zu untersuchenden Untersuchungsobjekte befand sich zu Beginn der Untersuchung in einer Abduktion des Schultergelenks von 90 Grad und in Neutralstellung des Ellenbogengelenks. Der jeweilige Beugungs- oder Streckungsgrad konnte am Goniometer abgelesen werden. Die Untersuchung aller Untersuchungsobjekte erfolgte nun nach dem folgenden Protokoll:

1. Röntgenkontrolle der Bewegungsebene des Ellenbogengelenks
2. gegebenenfalls Anpassung der Ebene durch Feineinstellung des externen Fixations-systems
3. Positionierung des Ellenbogengelenks in der Neutralstellung mittels manueller Fixierung des Handgelenks durch den Zweituntersucher
4. Erstellung einer Röntgenaufnahme des Ellenbogengelenks durch den Erstuntersucher
5. lokale Speicherung der Aufnahme auf der Festplatte des Röntgengeräts
6. Beugung des Ellenbogengelenks um 15 Grad (Ablesung am Goniometer) durch den Zweituntersucher

7. erneutes Röntgen des Ellenbogengelenks durch den Erstuntersucher
8. erneute, digitale Speicherung der Röntgenaufnahme
9. Wiederholung von Beugung, Röntgen und Speicherung bis eine abschließende Röntgenaufnahme und Speicherung in einer Beugung von 135 Grad¹⁴ erfolgt war

Anschließend wurde der C-Bogen aus der Holzkonstruktion entfernt und die beiden Schanzschrauben aus den Backen gelöst. Es schloss sich die Implantation einer im 3D-Drucker nachgebildeten anatomischen Osteosyntheseplatte aus Kunststoff an. Diesbezüglich gebührt Herrn Dr. rer. physiol. Keywan Sohrabi der Technischen Hochschule Mittelhessen großer Dank für die Bereitstellung der 3D-Replikat. Als Druckvorlage war eine Osteosyntheseplatte der Firma Stryker verwendet worden (Abb. 2.12). Die Nachbildung der Osteosyntheseplatte hatte sich in den Voruntersuchungen bewährt, da die Röntgengichtigkeit der gebräuchlichen, aus Titan gefertigten Platten häufig zu einer Überlagerung mit den intraneuralen Pins im Röntgenbild führte.



Abb. 2.12: Plattennachbildung. Abbildung der originalen Osteosyntheseplatte der Firma Stryker aus Titan (links im Bild) und des im 3D-Drucker erstellten Replikats (rechts im Bild). Das Replikat ist aus produktionstechnischen Gründen am proximalen - und damit vom Untersuchungsbereich entfernten - Ende leichtgradig gekürzt.

Die Implantation der Osteosyntheseplatte erfolgte durch einen erfahrenen Unfallchirurgen. Nach einer dorsalen Hautinzision von ca. 20 Zentimetern Länge stellte dieser den

¹⁴Eine Beugung von ungefähr 135 Grad erwies sich in allen vier Körperspendern als das (sub-)maximale Beugungsausmaß.

distalen Humerus von medial dar. Von einer Olekranonosteotomie konnte an dieser Stelle abgesehen werden, da von medial ausreichend Zugang zu Humerus und N. ulnaris vorhanden war und eine Darstellung der Gelenkfläche nicht benötigt wurde. Der N. ulnaris wurde langstreckig freigelegt und der Kubitaltunnel in Längsrichtung des Nervs gespalten, sodass der Nerv während der Plattenimplantation ventral des Epicondylus medialis humeri zum Liegen kommen konnte. Während dieses Schrittes erfolgte eine sorgfältige Dokumentation der Lage der eingebrachten Pins. Trotz sonografisch unterstützter Injektion der Pins befanden sich wenige Pins nicht direkt im N. ulnaris. Diese wurden unter direkter Sicht identifiziert, dem entsprechenden Pin im Röntgenbild zugeordnet und bei der späteren Auswertung der Bilder exkludiert.

Die anatomisch vorgeformte Osteosyntheseplatte aus Kunststoff legte sich dem Humerus passend an und wurde nach der Vorbohrung mit einem Bohrer des Durchmessers 3,0 Millimeter mit einer handelsüblichen Schraube des Gewindedurchmessers 4 Millimeter im proximalen - und damit am weitesten vom Untersuchungsbereich entfernten - Loch der Platte am Humerus befestigt (Abb. 2.13).

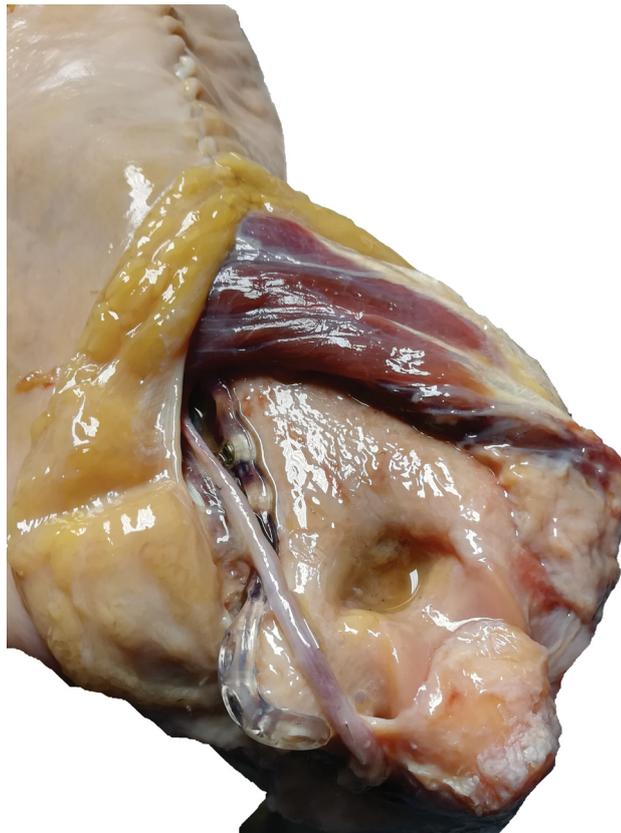


Abb. 2.13: Plattenimplantation. Blick von dorsal auf das gebeugte Ellenbogengelenk. Der Trizeptus wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit am Olekranon abgesetzt. Erkennbar ist die dorsomediale Facette des Humerus mit anliegendem Plattenreplikat. Dieses reicht bis über den Epicondylus medialis humeri. Der N. ulnaris befindet sich stark gedehnt (mit einliegenden Pin) im Sulcus nervi ulnaris. Eine Interaktion mit dem Implantat ist in diesem Fall sehr wahrscheinlich.

Die Kompression der einzelnen, proximalen Schraube zeigte sich ausreichend stabil, sodass von der Einbringung einer weiteren Schraube abgesehen werden konnte. Daraufhin wurde der N. ulnaris zurück in den Sulcus nervi ulnaris gebettet und der Kubitaltunnel mit einer Hautnaht der Stärke 3/0 spannungsfrei rekonstruiert. Sowohl das Subkutangewebe als auch die Haut wurden mit Einzelknopfnähten verschlossen.

Die abschließende Dokumentation des postoperativen Nervenverlaufs erfolgte gemäß des oben beschriebenen Protokolls nachdem der Humerus erneut durch Röntgen-Kontrollen in einer rechtwinkligen Ebene zum Strahlengang des C-Bogens eingestellt und in dieser Position durch die Schanzschrauben im externen Fixationssystem befestigt worden war. Die angefertigten Aufnahmen wurden auf einen USB-Stick übertragen und waren nun als BMP-Bilddateien über gebräuchliche Computerprogramme einsehbar.

Einzeluntersuchungen in Pronation und Supination

Zur Abschätzung des Einflusses von Pronation und Supination auf den Verlauf des N. ulnaris wurden bei Untersuchungsobjekt 3 vier weitere Röntgenserien¹⁵ erstellt. Hierfür erfolgte sowohl vor Implantation der Platte als auch danach eine zusätzliche Fixierung des Unterarms jeweils in endgradiger Pronations- und Supinationsstellung mithilfe des K-Drahtes, der zu Beginn die Neutralstellung fixiert hatte.

2.2.5 Auswertung

Die Bilddateien wurden entsprechend den zugehörigen Untersuchungsobjekten, den Winklereinstellungen und dem prä- oder postoperativen Zustand am Computer eindeutig umbenannt und in Ordnern strukturiert abgelegt. Anschließend erfolgte die - für die Auswertungen benötigte - Bearbeitung der Bilder mithilfe des Bildbearbeitungsprogramms 'Gimp' in der Version 2.10.12¹⁶ nach dem folgenden Schema:

1. Aufrufen der Bilddatei im Programm „Gimp“
2. Anlegen einer neuen Ebene „Markierung 1“
3. Markierung der großen humeralen Kugel mit der Einstellung: schwarzer Stift als Kreis. Der Durchmesser der Kugel wurde an die Größe der Kugel angepasst und variierte von Untersuchungsobjekt zu Untersuchungsobjekt. Die Werte des Durchmessers lagen dabei zwischen 82 Pixeln und 97 Pixeln.¹⁷
4. Anlegen einer neuen Ebene „Markierung 2“
5. Markierung der kleinen humeralen Kugel mit der bekannten Einstellung (Durchmesser ca. 40 Pixel)

¹⁵Eine Röntgenserie wurde als Reihe von zehn Röntgenbildern bezeichnet, die das Ellenbogengelenk jeweils in einer definierten Stellung zwischen 0 und 135 Grad Beugung darstellten.

¹⁶Der Download erfolgte auf der folgenden Internetseite: <https://www.gimp.org/downloads/>.

¹⁷Die Durchmesser der großen, humeralen Kugel wurden für spätere Transformation in metrische Maße dokumentiert.

6. Anlegen einer neuen Ebene „Markierung 3“
7. Markierung des röntgendichten Rings des Goniometers mit Zentrierung über dem K-Draht im Zentrum des Ellenbogengelenks (Durchmesser ca. 25 Pixel)
8. Anlegen einer neuen Ebene „Markierung 4“
9. Markierung der ulnaren Referenzkugel mit der bekannten Einstellung (Durchmesser ca. 40 Pixel)
10. maximale Zoomeinstellung des Bildes
11. Anlegen einer neuen Ebene „Draht1“
12. Markierung des proximalen Pins mit der Einstellung: schwarzer Stift als Kreis; der Durchmesser betrug in allen weiteren Markierungen 2 Pixel
13. Markierung des Pins durch manuelles Nachzeichnen mit dem Stift
14. Anlegen einer neuen Ebene „Draht2“
15. Markierung des am nächsten distal von Pin 1 gelegenen Pins nach dem beschriebenen Schema
16. Anlegen einer neuen Ebene „Draht3“
17. Markierung des am nächsten proximal von Pin 2 gelegenen Pins nach dem beschriebenen Schema
18. Exportieren der erstellten Ebenen sowie des aktuellen Projekts in einem eigenen Ordner

Die Bearbeitungen wurden für alle Röntgenbilder einzeln und manuell durchgeführt. Im Einzelfall ergaben sich Abweichungen des Prozederes in Bezug auf die Bezeichnung der Pins, da einige Pins durch ihre extraneural bestätigte Lage nicht ausgewertet werden konnten. Anschließend erfolgte die automatisierte Auswertung der Markierungen anhand eines für diesen Zweck verfassten Programms, das als Erweiterung der Bildbearbeitungssoftware „Fiji“¹⁸ in der Programmiersprache Java erstellt worden war. Die Software erfasste die Mittelpunkte der Kugeln, des Drehzentrums und der Pins¹⁹ als Koordinaten mit X- und Y-Werten (Ausgabe der Daten in Pixel) innerhalb der Abbildungen und ordnete diese in eine Excel-Tabelle ein. Der entsprechende Quelltext wurde dieser Arbeit aufgrund dessen Umfang nicht angehängt, kann jedoch auf Nachfrage gerne zur Verfügung gestellt werden. Die darauf folgenden Messungen werden im Folgenden näher erläutert.

¹⁸Der Download erfolgte auf der folgenden Internetseite: <https://fiji.sc>.

¹⁹Die Mittelpunkte der Pins wurden in Bezug auf ihre längliche Ausdehnung festgelegt. Somit konnte der Pin selbst bei leichten Verkippungen in der verwendeten Röntgenebene einheitlich markiert und ausgewertet werden.

Bestimmung von Winkelpositionen

Die Bestimmung der Winkelposition erfolgte in Bezug auf eine imaginäre Gerade, die durch den Mittelpunkt der großen, humeralen Kugel und den Mittelpunkt des Drehzentrums verlief. Das Drehzentrum des Ellenbogengelenks wurde dabei als Drehzentrum der Winkelmessungen verwendet. Die Messung der Winkelposition erfolgt stets über eine Öffnung des Winkels in Richtung der Streckseite des Humerus.²⁰ Die Abbildung 2.14 verdeutlicht den Messvorgang.



Abb. 2.14: Bestimmung der Winkelposition. Die Abbildung veranschaulicht die Messung der Winkelposition der ulnaren Referenzkugel in Bezug auf die Gerade zwischen der großen, humeralen Kugel und dem Drehzentrum. Der Winkel öffnet in jedem Fall in Richtung der Streckseite des Humerus.

²⁰Bei den späteren Berechnungen der Winkelposition konnten die Winkelmessungen teilweise über 180° betragen. Dies wurde durch das Programm in einigen Fällen nicht erkannt, sodass alle Daten, die eine Winkelposition über 160° aufwiesen manuell nachkontrolliert werden mussten.

Für die Bestimmung der Winkelposition der ulnaren Referenzkugel wurden zunächst zwei Vektoren berechnet.²¹ Der Vektor \vec{k} verband den Mittelpunkt der großen, humeralen Kugel (k) mit dem Mittelpunkt des Drehzentrums anhand der X- und Y-Koordinaten. Zur Berechnung dessen wurden die Variablen x_k (als X-Koordinate des Mittelpunkts von k in Pixeln), x_{dz} (als X-Koordinate des Mittelpunkts des Drehzentrums in Pixeln), y_k (als Y-Koordinate des Mittelpunkts von k in Pixeln) und y_{dz} (als Y-Koordinate des Mittelpunkts des Drehzentrums in Pixeln) verwendet:

$$k_x = x_k - x_{dz}$$

$$k_y = y_k - y_{dz}$$

$$\vec{k} = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \end{pmatrix}$$

Der Vektor \vec{u} verband - ebenfalls anhand der X- und Y- Koordinaten - den Mittelpunkt der ulnaren Referenzkugel mit dem Mittelpunkt des Drehzentrums. Zur Berechnung dessen wurden die Variablen x_u (als X-Koordinate des Mittelpunkts der ulnaren Referenzkugel in Pixeln), x_{dz} (als X-Koordinate des Mittelpunkts des Drehzentrums in Pixeln), y_u (als Y-Koordinate des Mittelpunkts der ulnaren Referenzkugel in Pixeln) und y_{dz} (als Y-Koordinate des Mittelpunkts des Drehzentrums in Pixeln) verwendet:

$$u_x = x_u - x_{dz}$$

$$u_y = y_u - y_{dz}$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}$$

Anschließend wurde das Skalarprodukt (S) der Vektoren gebildet und die Länge der Vektoren ($|\vec{k}|$ bzw. $|\vec{u}|$) errechnet:

$$S = \vec{k} \cdot \vec{u}$$

$$|\vec{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

$$|\vec{u}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$$

In einem nächsten Schritt erfolgte die Berechnung der Kosinusfunktion:

$$\cos_{ulna} = \frac{S}{|\vec{k}| |\vec{u}|}$$

²¹Die Bestimmung der Winkelposition eines Pins erfolgte nach dem selben Schema. Es mussten lediglich die Koordination des Mittelpunkts eines Pins - anstatt der Daten für die ulnare Referenzkugel - für die Berechnungen verwendet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit soll jedoch an dieser Stelle lediglich die Ermittlung der Winkelposition der ulnaren Referenzkugel beschrieben werden.

Schließlich konnte das gesuchte Bogenmaß über die Arkosinusfunktion bestimmt werden und über den Excelbefehl der Winkel γ $\text{GRAD}(\text{ARCCOS}(\cos(\text{ulna})))$ zwischen den beiden Vektoren \vec{k} und \vec{u} berechnet werden.

$$\text{Bogenmaß} = \arccos \frac{\vec{k} \cdot \vec{u}}{|\vec{k}| |\vec{u}|}$$

Die Berechnung des Winkels γ erfolgte für alle erstellten Kosinusdaten der Ulna sowie der Pins. Da der Wertebereich in Winkelgrad der Arkuskosinus-Funktion auf das stetige Intervall von $[0, 180^\circ]$ eingeschränkt ist, jedoch Drehwinkel bei einzelnen Messungen über 180° möglich waren, wurden diese manuell nachkontrolliert und über die folgende Funktion korrigiert:

$$\gamma' = 360 - \gamma$$

Die Auswertungen der Daten erfolgten anhand von Graphiken, die mithilfe von Excel erstellt wurden.

Bestimmung der Abstände

Die Ermittlung der Abstände zwischen verschiedenen Strukturen erfolgte anhand der bereits für die Bestimmung der Winkelposition erstellten Rohdaten, die sich aus den X- und Y-Koordinaten der Pin-Mittelpunkte sowie des Drehzentrummittelpunkts ergaben.

Berechnet wurde sowohl der direkte Abstand zwischen einzelnen Pins als auch der direkte Abstand einzelner Pins zum Drehzentrum. Aufgrund des Vorliegens der Daten in Pixeln wurde zusätzlich eine Transformation in metrische Maße (Millimeter) vorgenommen. Die entsprechende Transformation ist bereits in die unten angegebenen Formeln für die Pin- und Drehzentrumsabstände eingearbeitet. Grundlage der Transformation waren die - während der Bildbearbeitung ermittelten - Durchmesser der großen, humeralen Kugel, die anhand der vorbekannten, realen Größe (10 mm) transformiert werden konnten. Die Berechnung der Abstände zwischen zwei Pins (Ergebnis a in Millimetern) erfolgte anhand der Variablen x_1 (als X-Koordinate des Mittelpunkts von Pin 1 in Pixeln), x_2 (als X-Koordinate des Mittelpunkts von Pin 2 in Pixeln), y_1 (als Y-Koordinate des Mittelpunkts von Pin 1 in Pixeln), y_2 (als Y-Koordinate des Mittelpunkts von Pin 2 in Pixeln) und z (als bekannter Durchmesser der großen, humeralen Kugel in der jeweiligen Röntgenserie in Pixeln):

$$a = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \cdot 10}{z} \text{ mm}$$

Für die Bestimmung der Abstände zwischen einem Pin und dem Drehzentrum (Ergebnis b) erfolgte die Berechnung mit den Variablen x_{pin} (als X-Koordinate des Mittelpunkts des Pins in Pixeln), x_{dz} (als X-Koordinate des Mittelpunkts des Drehzentrums in Pixeln), y_{pin} (als Y-Koordinate des Mittelpunkts des Pins in Pixeln), y_{dz} (als Y-Koordinate des Mittelpunkts des Drehzentrums in Pixeln) und z (als bekannter Durchmesser der großen, humeralen Kugel in der jeweiligen Röntgenserie in Pixeln):

$$b = \frac{\sqrt{(x_{\text{pin}} - x_{\text{dz}})^2 + (y_{\text{pin}} - y_{\text{dz}})^2} \cdot 10}{z} \text{ mm}$$

Ausgewertet wurden die Abstände des proximalen Pins zum mittleren Pin und des mittleren Pins zum distalen Pin sowie die Abstände aller Pins zum Drehzentrum. Die Ergebnisse wurden anschließend erneut in einer Excel-Tabelle zusammengefasst und mithilfe von Graphiken aufgearbeitet und ausgewertet.

KAPITEL 3

Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der histologischen Untersuchung

3.1.1 Querschnittpräparate

Proximale Schnittpräparate

Die proximalen Anschnitte zeigen den N. ulnaris als peripheren Nerven mit epi- und perineuralen Bindegewebshüllen. An der Außenseite des Epineuriums befindet sich zumeist eine Schicht univakuolären Fettgewebes. Hierin verlaufen neben einigen bindegewebigen Strängen auch arterielle und venöse Gefäße mit Durchmessern von bis zu einem Millimeter (arteriell) beziehungsweise über zwei Millimeter (venös). Am äußeren Rand der Fettgewebsschicht schließt sich in einigen Präparaten eine ausgeprägte Schicht quergestreifter Muskulatur an, die in situ dem M. triceps brachii zuzuordnen ist. Desweiteren sind vermehrt intraepineural verlaufende Gefäße zu erkennen (Abb. 3.1).

Es bestehen teilweise große Unterschiede zwischen den einzelnen Präparaten: P3prox zeigt die Aufteilung des N. ulnaris in zwei Faszikel, die durch einen perineuralen Bindegewebszug voneinander getrennt sind. Im Gegensatz dazu stellt sich das Nervengewebe von P5prox stark septiert und in viele Faszikel aufgeteilt dar. Auch die Größe der Gefäße variiert in den beiden Präparaten, sodass in Präparat 5 deutlich größere Gefäße abgebildet sind als in Präparat 3 (vgl. Abb. 3.1 und 3.2).

Erst in der stärkeren Vergrößerung zeigt sich, dass in allen Präparaten eine ausgeprägte intraneurale Vaskularisierung vorhanden ist. Die Gefäße verteilen sich sowohl diffus innerhalb des Nervengewebes als auch häufig im Verlauf von Bindegewebssepten. Neben den hauptsächlich vorkommenden Queranschnitten der Gefäße finden sich auch im Längsverlauf abgebildete Gefäße (Abb. 3.3).

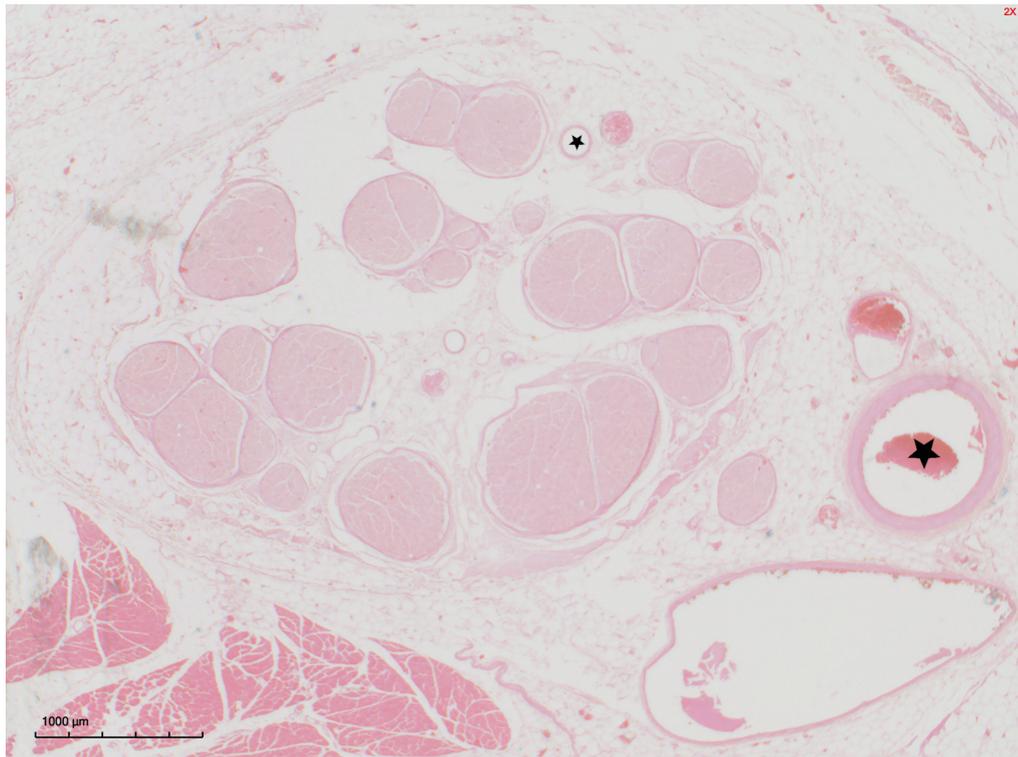


Abb. 3.1: Übersicht von P5prox. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris im Querschnitt mit begleitenden Gefäßen. Die arteriellen Gefäße sind mit einem Sternchen versehen (rechts extraneural, mittig-oben intraneural). 2-fache Vergrößerung. HE.



Abb. 3.2: Übersicht von P3prox. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris mit veränderter struktureller Darstellung des Nervs in Bezug auf die Anzahl der Faszikel und die Größe der Gefäße. Die arteriellen Gefäße sind mit einem Sternchen versehen. 2-fache Vergrößerung. HE.



Abb. 3.3: Vergrößerte Aufnahme von P5prox. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris mit Markierung (Kreis) der zahlreichen, mit Erythrozyten-gefüllten Kapillaren in mehreren Faszikeln des Nerven. 10-fache Vergrößerung. HE.

Schnittpräparate des Kubitaltunnels

Die Schnittpräparate des Kubitaltunnels zeigen den N. ulnaris umgeben von einer epineuralen Bindegewebshülle. Dieser liegt äußerlich eine ausgeprägte Schicht univakuolären Fettgewebes an. Hierin verlaufen einige großlumige Gefäße mit einem Durchmesser von bis zu einem Millimeter. Diese finden sich in allen Präparaten auf der olekranonahen und somit lateralen Seite des Präparats. Eine muskuläre Schicht wie in den proximalen Schnittpräparaten stellt sich nicht dar. Einige Anschnitte weisen eine ausgeprägte Aufteilung in einzelne Faszikel auf (Abb. 3.4) wohingegen andere Präparate den N. ulnaris hauptsächlich als singulären Faszikel abbilden (Abb. 3.5).

Die intraneurale Vaskularisierung ähnelt jener der proximalen Schnittpräparate. Obwohl sich insgesamt viele Gefäße diffus zwischen den Neuronen eingebettet finden, liegt der größere Anteil an Gefäßen im Verlauf der bindegewebigen Septen. Generell wirken die Anschnitte des Kubitaltunnels unruhiger, da die Neuronen im Vergleich zu den proximalen Anschnitten häufiger tangential angeschnitten sind (Abb. 3.6).

Eine Gefäßformation in Präparat 3 soll hier gesondert erwähnt werden, da sich in einem der abgebildeten Faszikel eine Ansammlung von kleinen Gefäßen - im Sinne eines Gefäßplexus - auf engem Raum darstellt (Abb. 3.7).



Abb. 3.4: Übersicht von P4kub. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris im Bereich des Kubitaltunnels mit einer großlumigen Arterie (Sternchen). 2-fache Vergrößerung. HE.

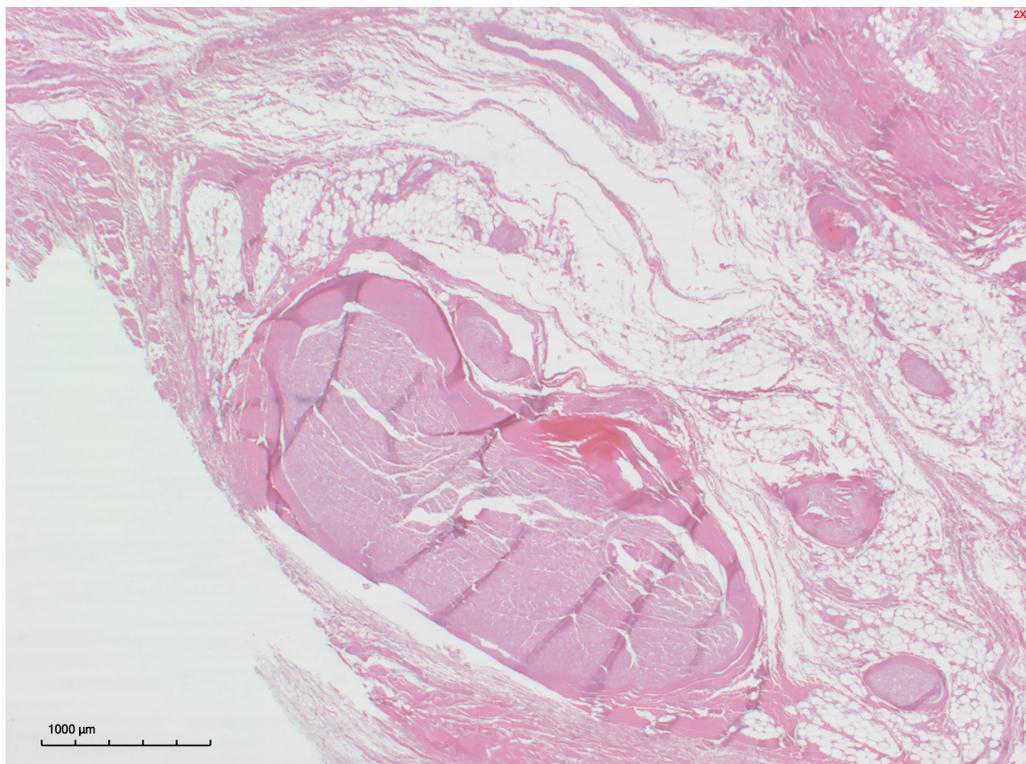


Abb. 3.5: Übersicht von P2kub. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris im Kubitaltunnel mit kompakt abgebildeten Neuronen. Es zeigen sich nur wenige arterielle Begleitgefäße. 2-fache Vergrößerung. HE.

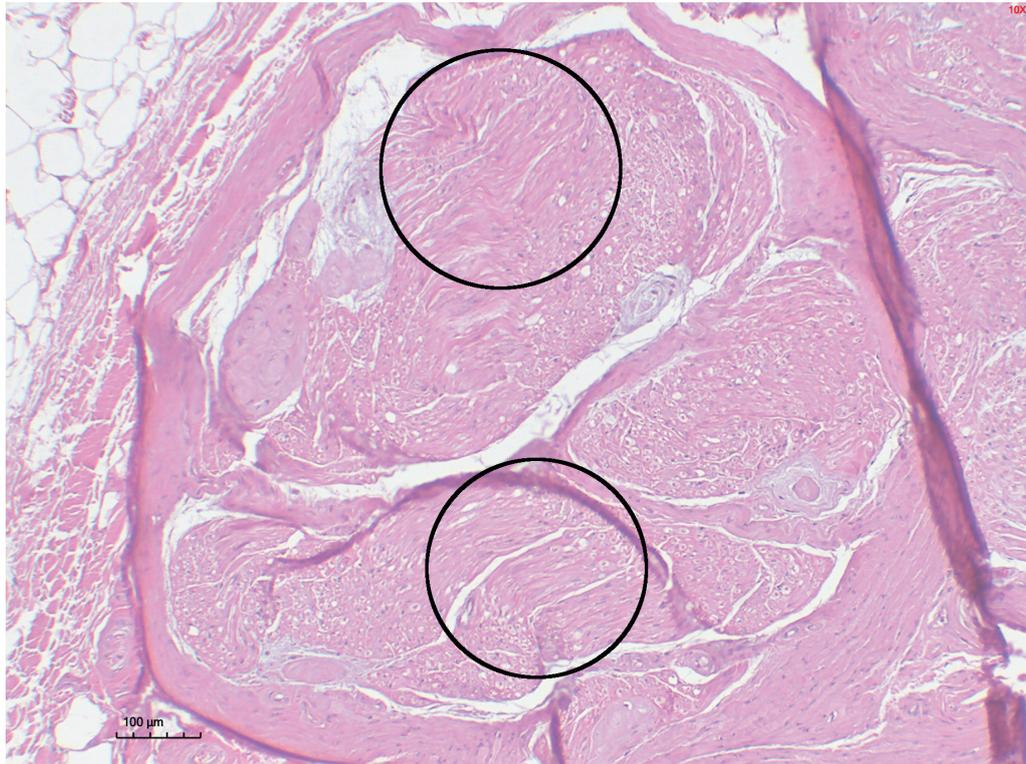


Abb. 3.6: Vergrößerte Aufnahme von P4kub. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris mit Längsanschnitten der Neuronen (Kreis). 10-fache Vergrößerung. HE.

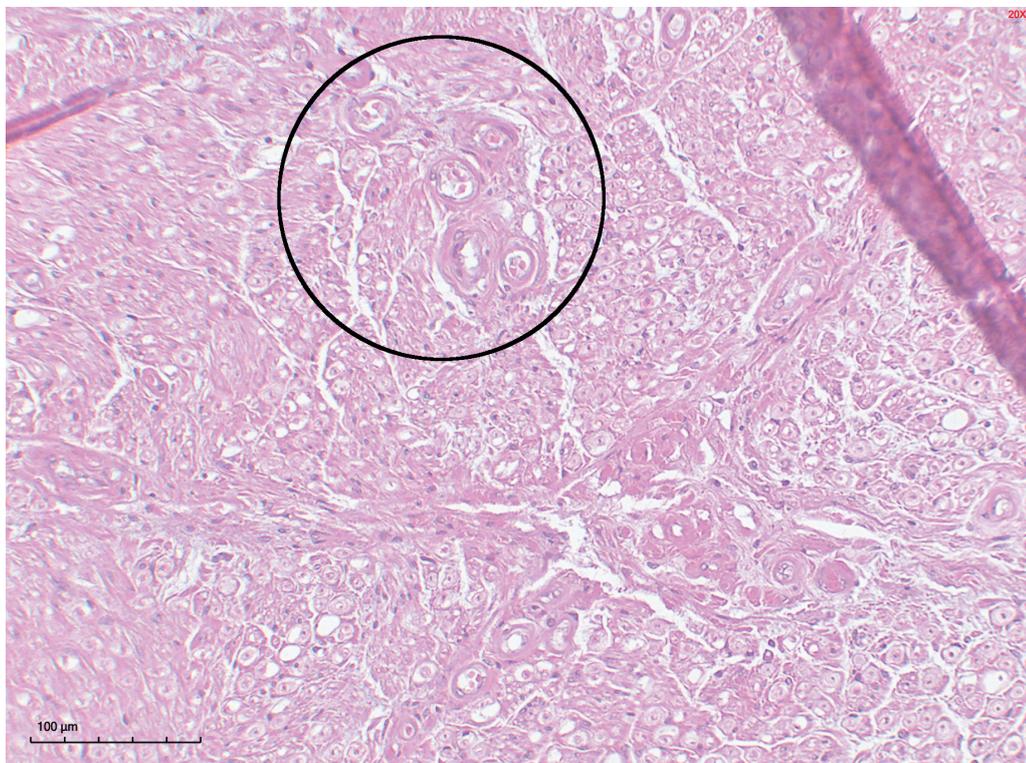


Abb. 3.7: Vergrößerte Aufnahme von P3kub. Mikroskopische Aufnahme eines Gefäßplexus (Kreis) im N. ulnaris. 20-fache Vergrößerung. HE.

Distale Schnittpräparate

Die Ansicht der distalen Schnittpräparate des N. ulnaris weist ebenfalls das Nervengewebe mit umgebenden Bindegewebsstrukturen und einer umliegenden Fettschicht auf. Das univakuoläre Fettgewebe liegt in diesen Schnitten jedoch großteilig innerhalb des Epineuriums und umgibt somit unmittelbar das Perineurium der einzelnen Faszikel. Die abgebildete quergestreifte Muskulatur ist in situ der Beugemuskulatur des Unterarms zuzuordnen. Von den bisher betrachteten Schnittebenen stellt sich der N. ulnaris in den distalen Schnittpräparaten am weitesten in Faszikel verzweigt dar. Es finden sich bis zu 20 einzelne Faszikel, die sich durch ihr Perineurium voneinander abgrenzen (Abb. 3.8).

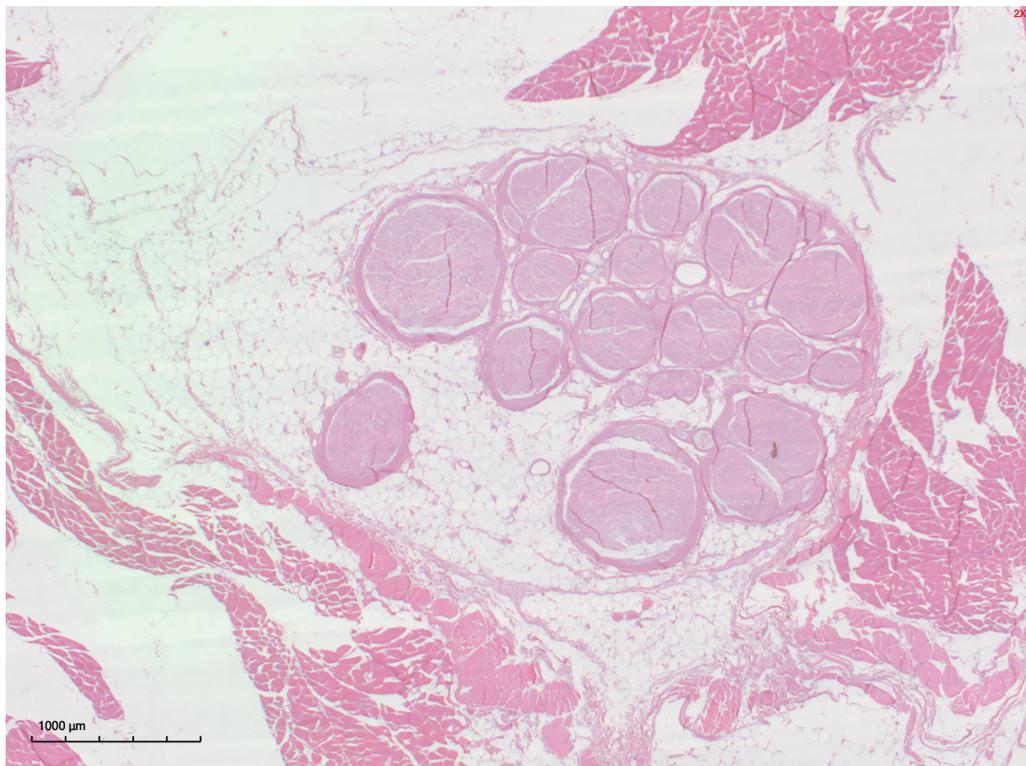


Abb. 3.8: Übersicht von P4dist. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris mit ausgeprägter Aufteilung des Nervs in Faszikel, intraepineuralem Fettgewebe und umliegender Beugemuskulatur des Unterarms. 2-fache Vergrößerung. HE.

Die Vaskularisierung des N. ulnaris erfolgt wie in den vorherigen Schnittebenen über multiple Gefäße, die großteilig innerhalb des Epineuriums dargestellt verlaufen. In zwei von vier Schnittpräparaten finden sich zudem größere, extraepineurale Begleitgefäße.

3.1.2 Längsschnittpräparate

Zur Betrachtung des N. ulnaris im Längsschnitt waren 30 Objektträger mit jeweils zwei Schnittpräparaten des Nervs angefertigt worden. Der N. ulnaris war bei 24 der 30 Objektträger mikroskopisch darstellbar.

An das prominent abgebildet Epineurium schließt von außen eine Schicht univakuolären Fettgewebes mit einigen Bindegewebszügen an. Diese wird äußerlich von der quergestreiften Muskulatur des M. triceps brachii umschlossen. Der N. ulnaris ist in den meisten Schnittebenen homogen im Längsverlauf angeschnitten. Demgegenüber stellen sich die intra- und extraneuralen Gefäße sowohl im Längsverlauf als auch im Querschnitt dar (Abb. 3.9).

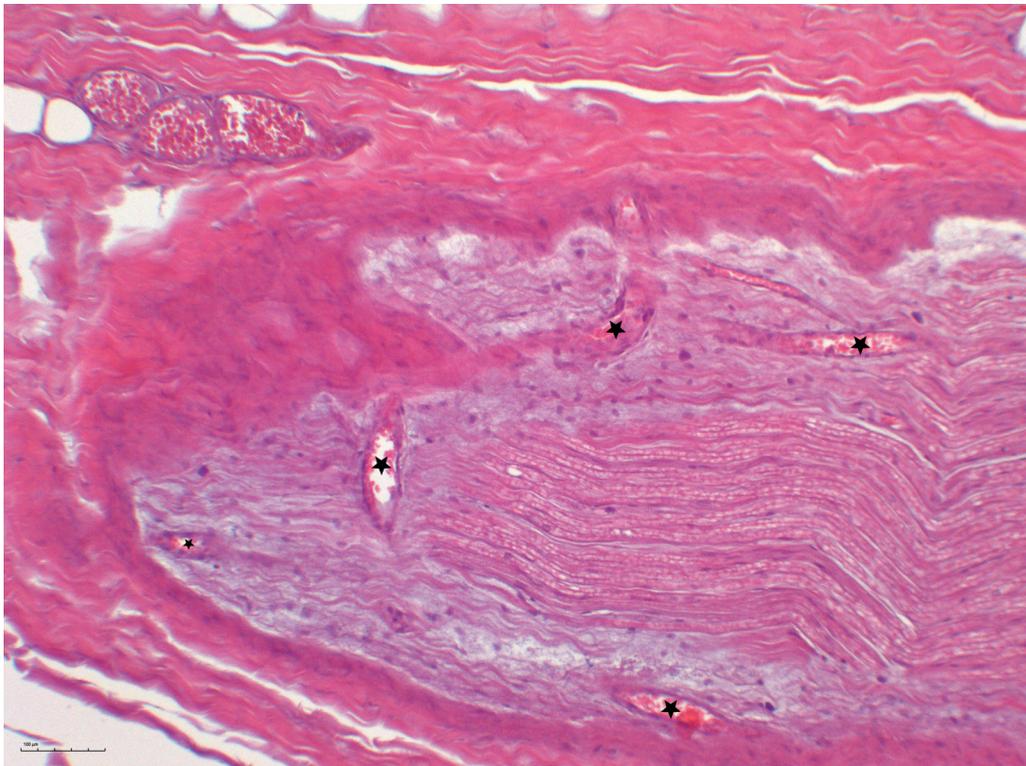


Abb. 3.9: Vergrößerte Aufnahme von P1horiz. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris mit zahlreichen Anschnitten der intraneuralen Gefäße (Sternchen). 10-fache Vergrößerung. HE.

Obwohl sich unmittelbar am Epineurium größere und kleinere Gefäße finden konnte in den vorliegenden Schnittpräparaten keine direkte Anastomose zwischen extra- und intraneuralen Gefäßen nachgewiesen werden (Abb. 3.10).

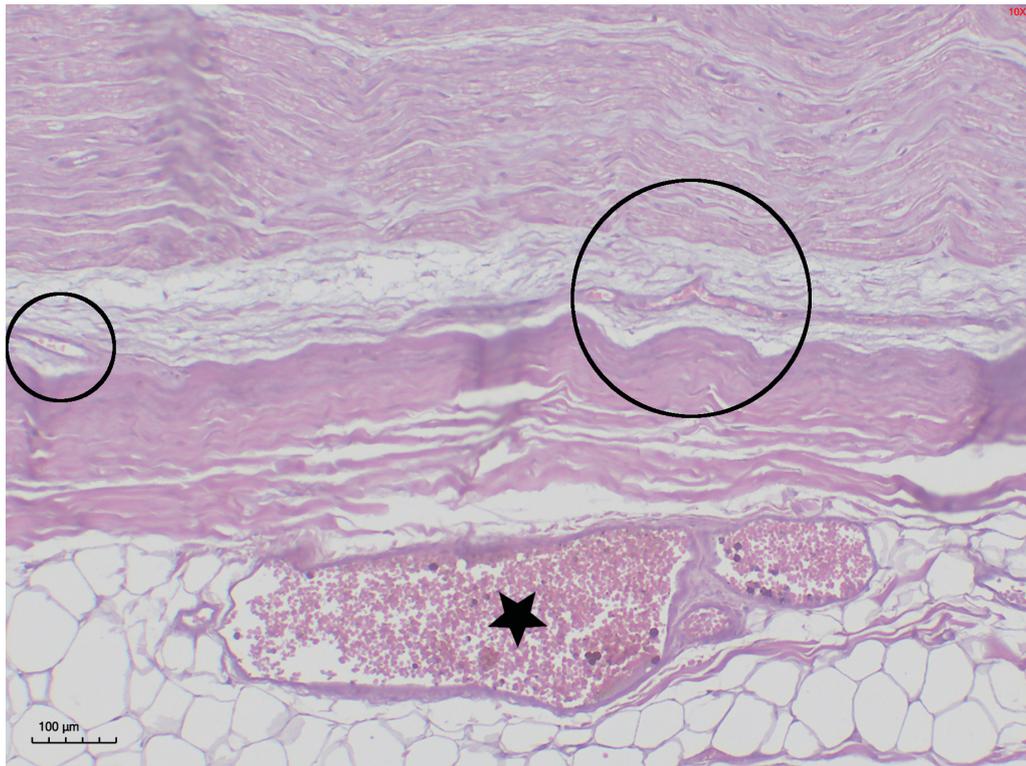


Abb. 3.10: Vergrößerte Aufnahme von P1horiz. Mikroskopische Aufnahme des N. ulnaris im Längsschnitt mit extra- (Sternchen) und intraneurale (Kreise), longitudinal angeschnittenen Gefäßen ohne erkennbare Anastomosierung. 10-fache Vergrößerung. HE.

3.1.3 Zusammenfassung der histologischen Ergebnisse

In der Zusammenschau lassen sich anhand der betrachteten Schnittpräparate die folgenden Aussagen festhalten:

1. In allen Schnittebenen findet sich eine ausgeprägte extra- und intraneurale Vaskularisierung des N. ulnaris. Sowohl die Größe als auch der Verlauf einzelner Gefäße variieren interindividuell stark. Im Bereich des Kubitaltunnels befinden sich die großlumigen extraepineuralen Gefäße in allen Präparaten regelhaft auf der olekranonahen und somit lateralen Seite des abgebildeten N. ulnaris. Direkte Verbindungen zwischen extra- und intraneuralen Gefäßen konnten in den Längsschnitten nicht nachgewiesen werden.
2. Im Verlauf des N. ulnaris von proximal nach distal findet sich eine zunehmende Aufteilung des Nervs in einzelne Faszikel, die von einer gemeinsamen Bindegewebshülle umschlossen werden.
3. Anstatt der quergestreiften Muskulatur von Ober- und Unterarm in den proximalen und distalen Schnitten findet sich im Bereich des Kubitaltunnels eine ausgeprägte Schicht univakuolären Fettgewebes um den N. ulnaris herum.

3.2 Radiologisch-anatomische Untersuchungen

Im Rahmen der radiologisch-anatomischen Untersuchungen wurden zwölf Röntgenserien mit insgesamt 120 Röntgenbildern von vier Untersuchungsobjekten erhoben. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Röntgenserien finden sich in Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Überblick über die prä- und postoperativen Röntgenserien in Neutral- (N), Supinations- (S) und Pronationsstellung (P). Die Pinanzahl entspricht der Anzahl an ausgewerteten Pins in dem jeweiligen UO.

Studie	Extremität	Pinanzahl	Serientypus	Serienanzahl
UO 1	links	3	N	2
UO 2	rechts	3	N	2
UO 3	links	3	N, S und P	6
UO 4	rechts	3	N	2

Die Erhebung der Daten erfolgt anhand des im Kapitel 2.2.5 beschriebenen Protokolls und wird für jede Röntgenserie hinsichtlich der folgenden Faktoren ausgewertet: Lage der Pins in Start- und Endposition (Grad), Bewegungsausmaß der Pins sowie der ulnaren Referenzkugel (Grad), lineare Abstände der einzelnen Pins zueinander (mm) und lineare Abstände der einzelnen Pins zum Drehzentrum (mm).

Sofern sich keine näheren Informationen finden handelt es sich im Folgenden um die Ergebnisse der Röntgenserien in Neutralstellung des Unterarms. Die für die Auswertungen verwendete Terminologie ist in der Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2: Terminologie der Auswertungen

Begriff	Bedeutung
Bewegungsausmaß	Betrag der Differenz der Winkelpositionswerte eines Pins oder einer Referenzkugel zwischen Start- und Endposition einer Röntgenserie
distal	„körperferne“ Lage oder Bewegung als Zunahme der Winkelposition im Sinne einer kreisähnlichen Bewegung eines Pins oder einer Referenzkugel um den distalen Humerus herum
Endposition	Winkelposition eines Pins in Endstellung
Endstellung	Position des Unterarms in endgradiger Beugung von 135°
Initialbewegung	Bewegung des Unterarms zwischen den Zielwinkeln 0° und 15°
Nullstellung	Stellung des Ellenbogengelenks eines Untersuchungsobjekts in 0° Beugung des Unterarms
Nulllage	Lage eines Pins in Nullstellung des Unterarms
Neutralstellung	neutrale Fixierung des Unterarms in Bezug auf Pronation oder Supination eines Untersuchungsobjekts
postoperativ	Zustand eines Untersuchungsobjekts nach Implantation der distalen Humerusplatte

präoperativ	Zustand eines Untersuchungsobjekts vor Implantation der distalen Humerusplatte
Pronationsstellung	Fixierung des Unterarms in Pronation für die Anfertigung einer prä- und postoperativen Röntgenserie
proximal	„körpernahe“ Lage oder Bewegung als Abnahme der Winkelposition im Sinne einer kreisähnlichen Bewegung eines Pins oder einer Referenzkugel um den distalen Humerus herum
Schlussbewegung	Bewegung des Unterarms zwischen den Zielwinkeln 120° und 135°
Startposition	Winkelposition eines Pins in Nulllage
Supinationsstellung	Fixierung des Unterarms in Supination für die Anfertigung einer prä- und postoperativen Röntgenserie
ulnarer Referenzwinkel	Winkelposition der ulnaren Referenzkugel in einer bestimmten Beugstellung des Ellenbogengelenks
Untersuchungsreihe	Gesamtheit aller Röntgenserien eines Untersuchungsobjekts
Untersuchungsserie	Gesamtheit von 10 Röntgenbildern eines Untersuchungsobjekts in prä- oder postoperativer Neutral-, Pronations- oder Supinationsstellung des Unterarms zwischen 0° und 135° Beugung des Ellenbogengelenks
Winkelbewegung	Änderung der Winkelposition eines Pins oder einer Referenzkugel zwischen zwei definierten Zielwinkeleinstellungen einer Röntgenserie
Winkelposition	Lage eines Pin oder der ulnaren Referenzkugel im Vergleich zur Referenzgeraden durch die große, humerale Referenzkugel und das Drehzentrum; Angabe in Grad
Winkelgeschwindigkeit	Geschwindigkeit der Winkelbewegung als Ausmaß der Änderung einer Winkelposition zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zielwinkeleinstellungen; Angabe in Grad
Zielwinkel	angestrebte Einstellung der Winkelposition der ulnaren Referenzkugel für die Röntgenbilder einer einzelnen Serie; Angabe in Graden zwischen 0° und 135° in Schritten von 15°

3.2.1 Untersuchungsobjekt 1

Für das erste Untersuchungsobjekt können alle drei eingebrachten Pins ausgewertet werden. Die Bezeichnung der Pins erfolgt in dieser Untersuchungsreihe in Abweichung von dem üblichen Protokoll indem der am weitesten proximal befindliche Pin in Nulllage nicht wie üblich als Pin 1, sondern als Pin 2 definiert ist. Grund für diese Abweichung ist die postoperativ umgekehrte Lage der Pins 1 und 2 zueinander, die in einer unterschiedlichen Definition der Pins im prä- und postoperativen Zustand führen würde und am ehesten aus einem postoperativ veränderten Nervenverlauf resultiert. Um dies zu vermeiden wurden die auszuwertenden Pins wie folgt für die prä- und postoperative Serie definiert:

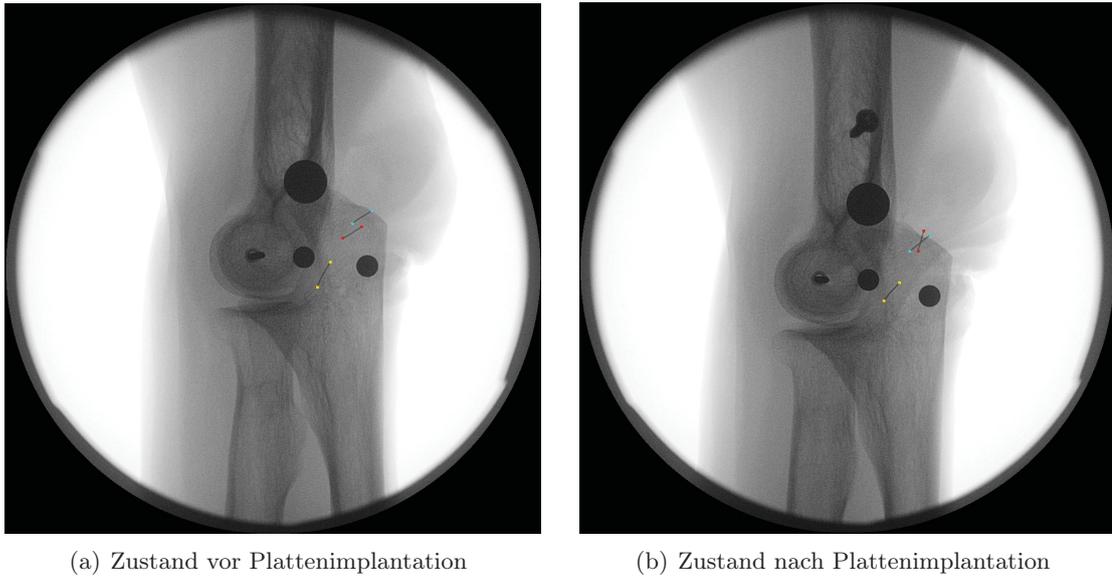


Abb. 3.11: Prä- und postoperative Definierung der Pins von UO 1. Vergleich der Röntgenbilder des prä- und postoperativen Zustands mit Markierung des proximalen und distalen Endes des jeweiligen Pins; Pin 1 (rot), Pin 2 (hellblau) und Pin 3 (gelb).

Das Bewegungsausmaß der ulnaren Referenzkugel beträgt präoperativ $142,8^\circ$ und postoperativ $139,1^\circ$. Es bestehen lediglich geringe Abweichungen zwischen den ulnaren Referenzwinkeln der prä- und postoperativen Röntgenserie. Dies trifft auch auf den Vergleich der ulnaren Referenzwinkel mit den definierten Zielwinkeln zu.

Ergebnisse vor Plattenimplantation

Die Pins 1 und 2 befinden sich in Nullstellung des Ellenbogengelenks proximal des Kubitaltunnels und liegen in dieser Position in relativer Nähe zueinander ($41,8^\circ$ für Pin 1 und $35,3^\circ$ für Pin 2). Der dritte Pin stellt sich in der Nähe des Kubitaltunnels dar ($69,9^\circ$).²² Ab einer Beugung von 30° befindet sich der zweite Pin in einer distalere Lage als Pin 1. Alle drei Pins distalisieren sich mit zunehmender Flexion, wobei der dritte Pin das größte Bewegungsausmaß aufweist ($50,1^\circ$). Vor allem für Pin 2 wird ein deutlich geringeres Bewegungsausmaß beobachtet (Pin 2: $39,9^\circ$; Pin 1: $14,6^\circ$) (Abb. 3.12).

Darüber hinaus tritt bei Pin 3 eine Verminderung des Winkels von $19,4^\circ$ in der Schlussbewegung auf, die in den Röntgenbildern durch eine ausgeprägte Annäherung des Pins an das Drehzentrum bedingt ist (Abb. 3.13).

Die hohe Winkelgeschwindigkeit des zweiten Pins resultiert in einer Abnahme der Distanz zwischen Pin 1 und 2 bis zu einer Beugung von ungefähr 35° . Nachdem Pin 2 eine distalere Lage als Pin 1 einnimmt kommt es zu einer Zunahme der Distanz zwischen diesen beiden Pins, die in Endstellung $7,1$ mm beträgt. Gleichzeitig ergibt sich bis zur Endposition eine Annäherung des zweiten und dritten Pins von insgesamt $4,7$ mm (Abb. 3.14).

²²Eine exakte Bestimmung der Lage des Kubitaltunnels kann in den Röntgenaufnahmen nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund erfolgt lediglich eine grobe Einschätzung der Pinposition in Bezug auf den Kubitaltunnel in den Röntgenaufnahmen mit Nullstellung des Ellenbogengelenks.

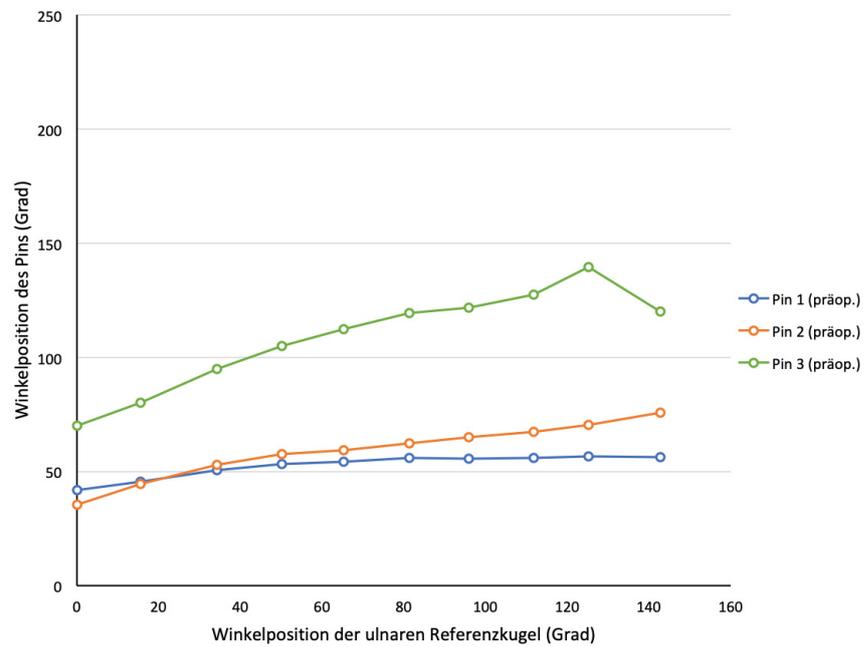


Abb. 3.12: Präoperative Pinbewegungen von UO 1. Graphische Darstellung der Winkelbewegungen aller Pins in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

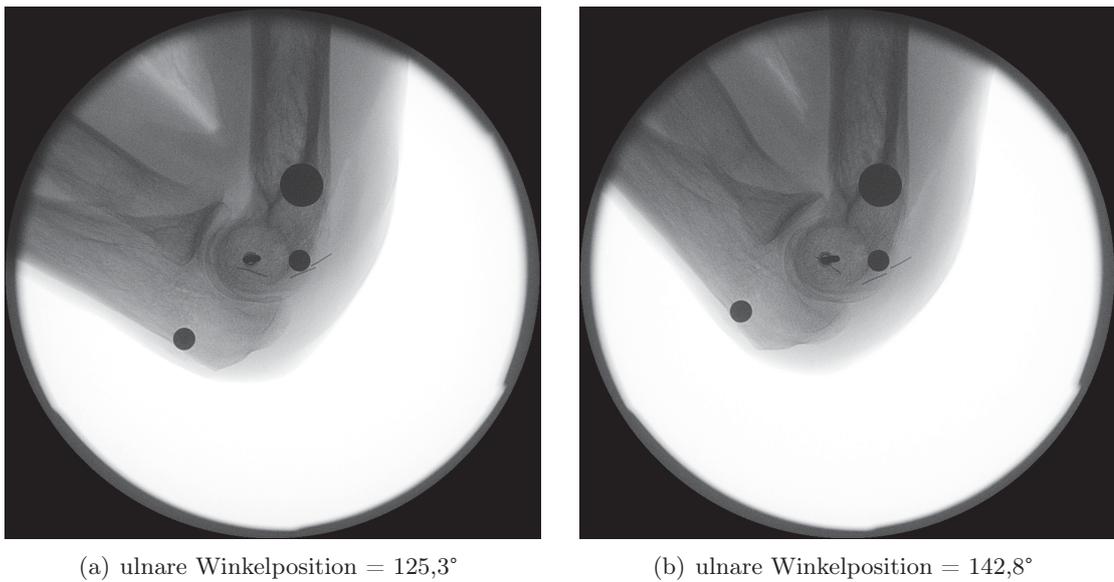


Abb. 3.13: Präoperative Einzelbeobachtung des UO 1. Starke Annäherung der Pins an das Drehzentrum während der Schlussbewegung.

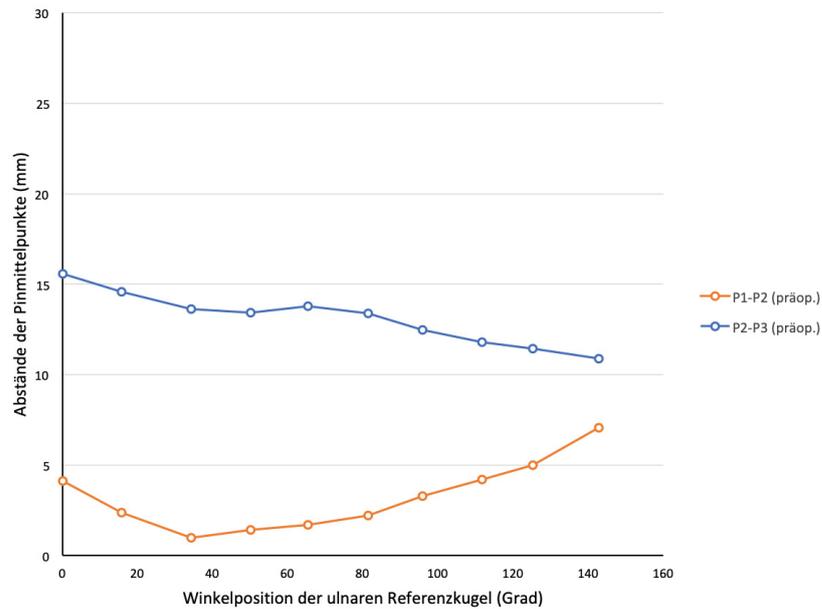


Abb. 3.14: Präoperative Pinabstände von UO 1. Graphische Darstellung der Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Alle drei Pins weisen eine kontinuierliche Annäherung an das Drehzentrum auf, die zwischen Nullstellung und Endstellung 6 mm (Pin 1), 14,3 mm (Pin 2) bzw. 15,2 mm (Pin 3) beträgt. Der erste Pin entfernt sich in der Schlussbewegung geringfügig vom Drehzentrum (Abb. 3.15).

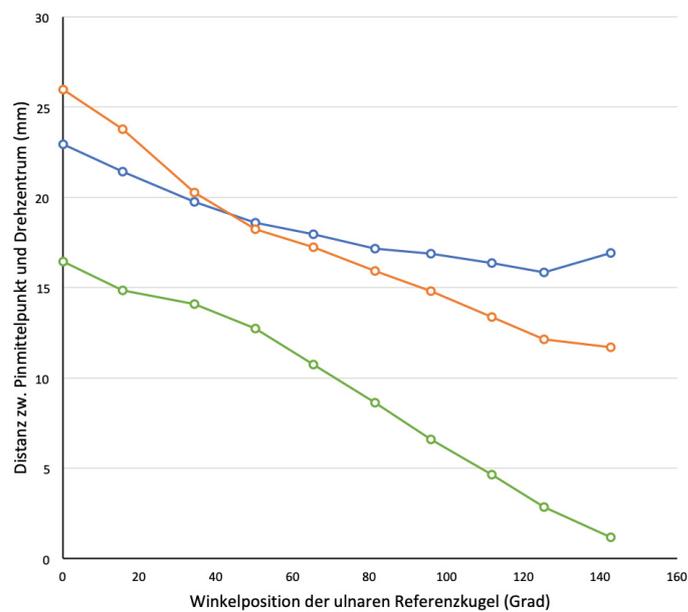


Abb. 3.15: Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 1. Graphische Darstellung der Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Ergebnisse nach Plattenimplantation

Die Start- und Endposition weicht bei keinem der Pins um mehr als 6° von den präoperativen Werten ab. In Nullstellung projizieren sich die ersten beiden Pins in der dargestellten Ebene teilweise übereinander, wobei die Startposition von Pin 1 ($36,4^\circ$) geringfügig proximal von der des zweiten Pins ($37,2^\circ$) verzeichnet wird. Analog zur präoperativen Serie vollzieht Pin 2 (44°) eine deutlich größere Winkelbewegung als Pin 1 ($24,5^\circ$). Der dritte Pin, welcher sich in Neutralstellung weiter distal befindet als die anderen beiden Pins erreicht mit 55° das größte Bewegungsausmaß der postoperativen Serie (Abb. 3.16).

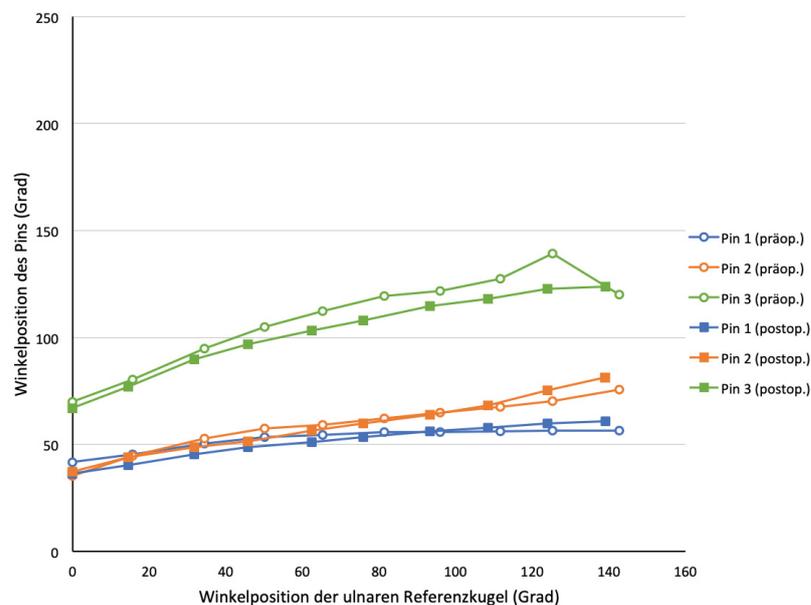


Abb. 3.16: Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 1. Vergleich der Winkelbewegung aller Pins der prä- und postoperativen Röntgenserie in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Die Pinabstände zeigen nach der Plattenimplantation einige Abweichungen. Einerseits nimmt die Distanz zwischen Pin 1 und Pin 2 von Beginn an kontinuierlich zu. Dies ist auf die veränderte Anordnung der Pins mit einer proximaleren Startposition von Pin 1 im Vergleich zu Pin 2 zurückzuführen. Die größte Distanz zwischen Pin 1 und Pin 2 ergibt sich in endgradiger Beugung und beträgt 7,5 mm. Andererseits findet eine Annäherung des zweiten und dritten Pins statt, die bis zur endgradigen Beugung insgesamt 4,3 mm beträgt und somit geringer ist als im präoperativen Zustand (Abb. 3.17).

Im Vergleich zum präoperativen Zustand verringert sich die Annäherung an das Drehzentrum von Pin 2 und 3 deutlich (1 mm bzw. 2,4 mm). Der erste Pin nähert sich dahingegen postoperativ um 1,9 mm mehr an das Drehzentrum an. Insgesamt vollziehen alle drei Pins wie auch schon präoperativ eine kontinuierliche Bewegung in Richtung des Drehzentrums, die vor allem bei Pin 2 und 3 eine starke Ausprägung zeigt. Die präoperativ beobachtete Distanzierung des zweiten Pins vom Drehzentrum in der Schlussbewegung zeigt keine Wiederholung in der postoperativen Serie (Abb. 3.18).

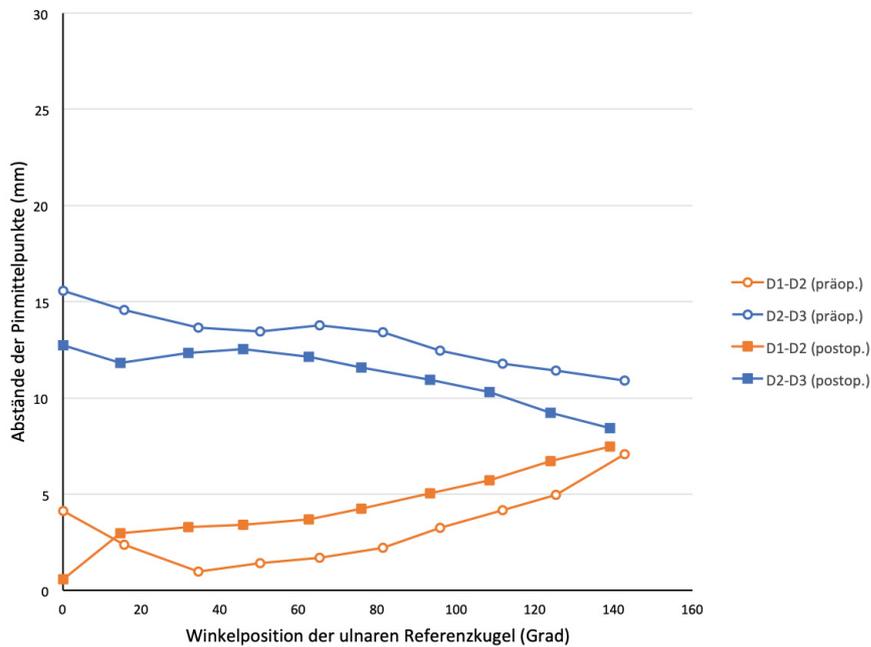


Abb. 3.17: Prä- und postoperative Pinabstände von UO 1. Vergleich der prä- und postoperativen Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

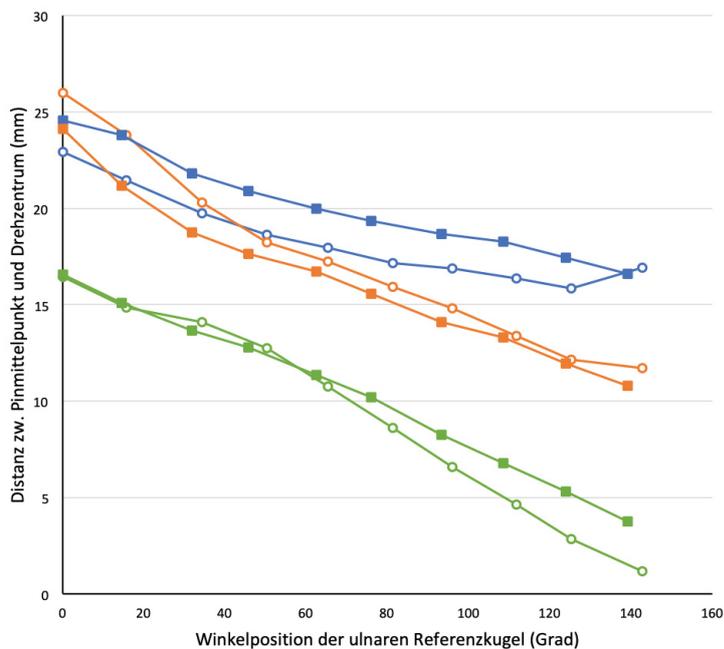


Abb. 3.18: Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 1. Vergleich der prä- und postoperativen Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

3.2.2 Untersuchungsobjekt 2

In den prä- und postoperativen Röntgenserien des Untersuchungsobjekts 2 sind fünf Pins abgebildet von denen nur drei Pins ausgewertet werden. Exkludiert werden die beiden gelenkfernen Pins für die sich während der Präparation des N. ulnaris eine extraneurale Lage bestätigte. In der folgenden Abbildung sind die endgültig ausgewerteten Pins markiert (Abb. 3.19).

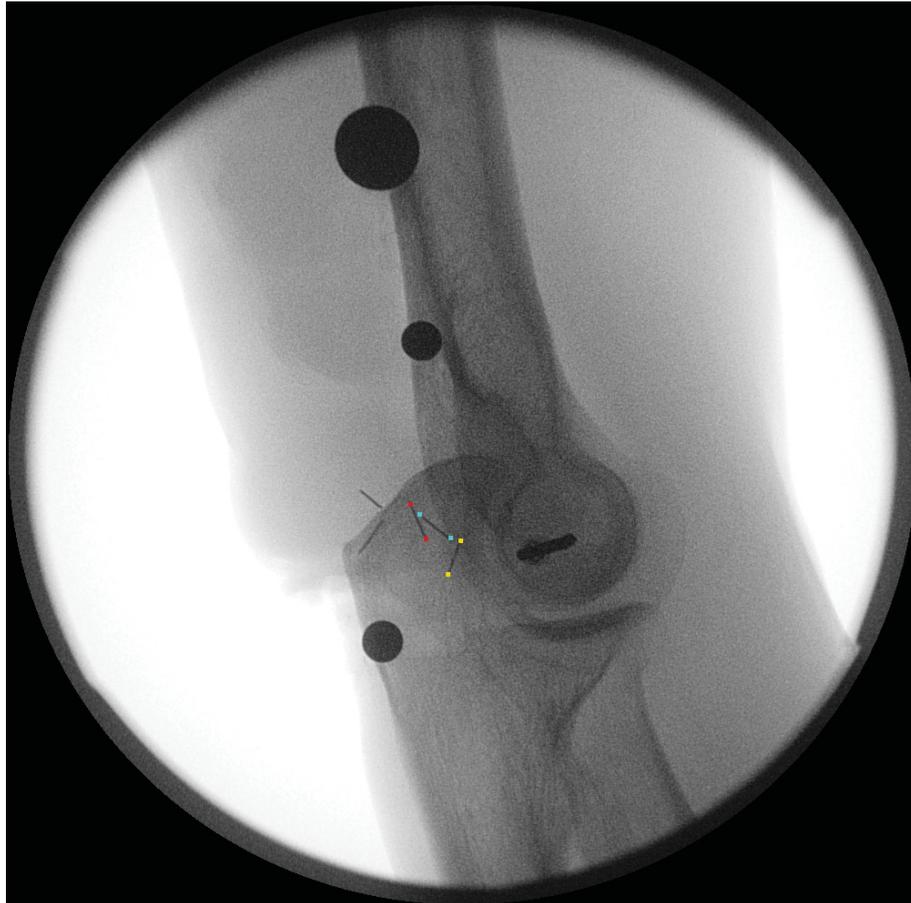


Abb. 3.19: Definierung der Pins von UO 2. Markierung des proximalen und distalen Endes von den zur Auswertung herangezogenen Pins 1 (rot), 2 (hellblau) und 3 (gelb).

Die ulnare Referenzkugel weist ein maximales Bewegungsausmaß von 130° (präoperativ) bzw. $130,1^\circ$ (postoperativ) auf. Es bestehen lediglich geringe Abweichungen zwischen den ulnaren Zielwinkeln und den tatsächlichen Drehwinkeln der ulnaren Referenzkugel sowie zwischen den ulnaren Referenzwinkeln in den prä- und postoperativen Röntgenserien.

Ergebnisse vor Plattenimplantation

In Nullstellung des Ellenbogengelenks befinden sich alle Pins in relativer Nähe zueinander sowie in proximaler Lage zum Kubitaltunnel. Hierbei nimmt der dritte Pin mit $72,3^\circ$ eine distale Position im Vergleich zu den Pins 1 und 2 ($53,8^\circ$ bzw. $54,4^\circ$) ein. Alle Pins vollziehen bis zum Erreichen der Endstellung eine kontinuierliche Winkelbewegung nach distal.

Die Winkelgeschwindigkeit - vor allem der Pins 1 und 2 - ist nach einer ausgeprägten Initialbewegung für einen Großteil des Beugungsverlaufs reduziert und nimmt mit stärkerer Beugung wieder zu. Unter Einbeziehung der Röntgenbilder stellt sich in der Endstellung jedoch eine zusätzliche Bewegung des fixierten Humerus dar, die als mögliche Erklärung für die ausgeprägte Schlussbewegung aller drei Pins herangezogen werden kann und vermutlich durch eine unnatürlich starke und untersucherbedingte Beugung hervorgerufen wurde (Abb. 3.20).

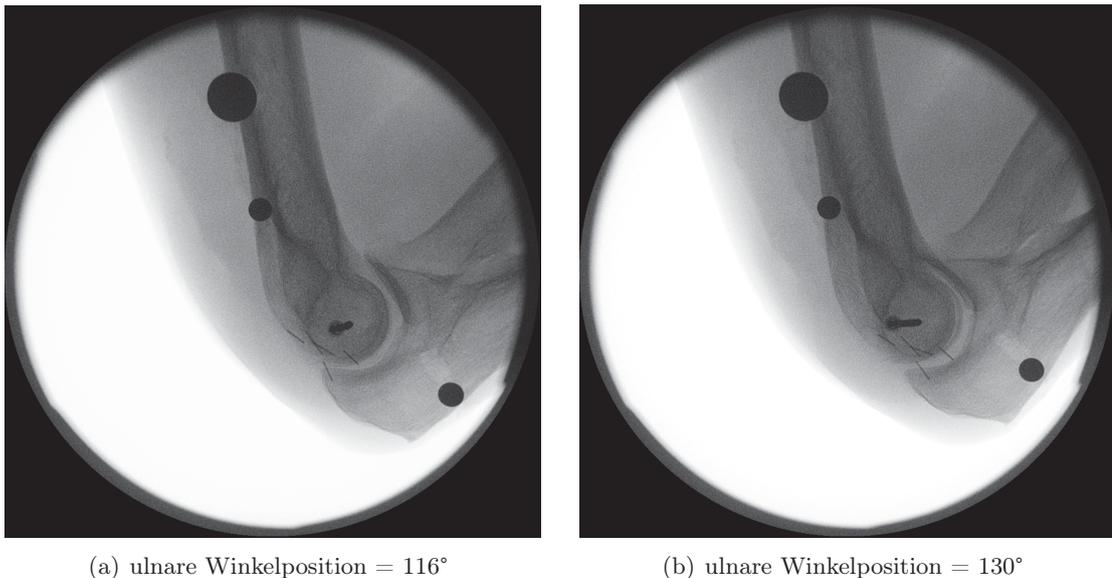


Abb. 3.20: Präoperative Humerusbewegung von UO 2. Präoperative Röntgenbilder mit Abbildung der zusätzlichen Bewegung des fixierten Humerus in endgradiger Beugung; erkennbar an der streckseitig verbreiterten Humerusfacette sowie an der abweichenden Darstellung des K-Drahtes im Drehzentrum.

Eine Auswertung der Daten in endgradiger Beugung des Ellenbogengelenks ist somit nur eingeschränkt möglich. Dennoch ergibt sich allein bis zu einem ulnaren Referenzwinkel von ungefähr 116° Beugung ein Bewegungsausmaß des dritten Pins von 104,6° beziehungsweise 44,7° (Pin 1) und 70,7° (Pin 2) (Abb. 3.21).

Die Distanz zwischen den einzelnen Pins beträgt in Nullstellung 2 mm (Pin 1 zu Pin 2) beziehungsweise 4,1 mm (Pin 2 zu Pin 3) und erreicht ein Maximum von 2,6 mm (Pin 1 zu Pin 2) beziehungsweise 5,6 mm (Pin 2 zu Pin 3). In endgradiger Beugung reduziert sich die Distanz zwischen Pin 2 und 3 um mehr als einen Millimeter (Abb. 3.22).

In der Initialbewegung von 20,1° entfernen sich alle Pins um maximal 1,3 mm vom Drehzentrum. Im weiteren Verlauf nähern sich die Pins bis zur Einstellung eines ulnaren Referenzwinkels von ca. 116° deutlich an das Drehzentrum an. Die ausgeprägte Distanzierung der Pins vom Drehzentrum (5 mm für Pin 3) während der Schlussbewegung kann ebenfalls aus dem oben genannten Grund der Humerusbewegung nicht ausgewertet werden. Demnach sollte erwähnt werden, dass eine derartige Distanzierung vom Drehzentrum - mit Beschränkung auf die endgradige Beugung - in keinem anderen Untersuchungsobjekt

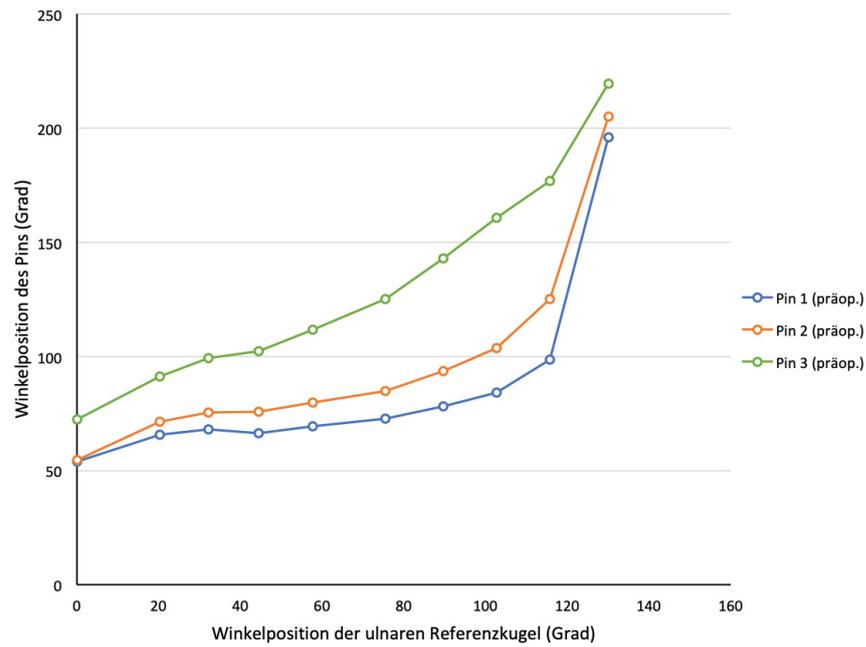


Abb. 3.21: Präoperative Pinbewegungen von UO 2. Graphische Darstellung der Winkelbewegungen aller Pins in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

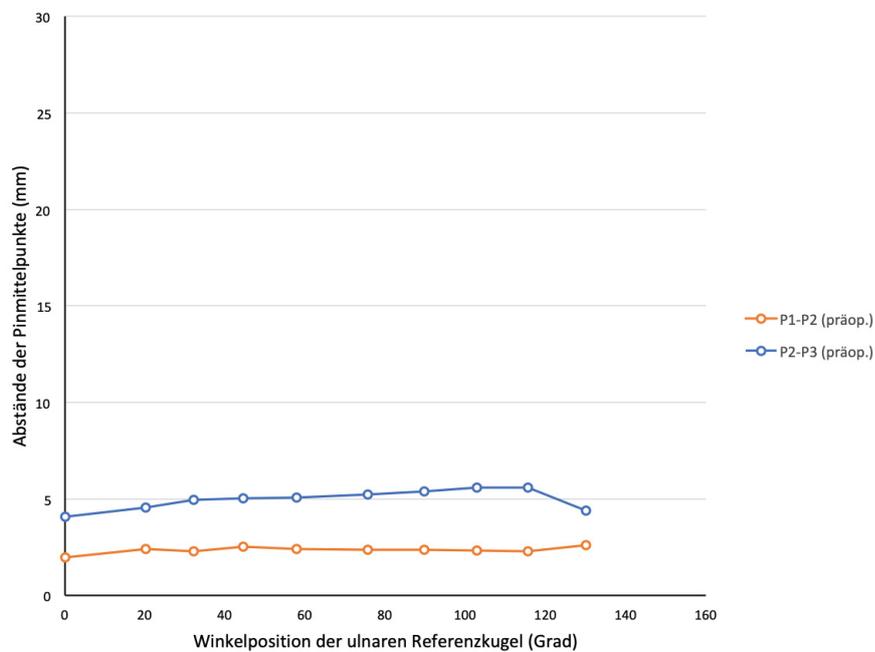


Abb. 3.22: Präoperative Pinabstände von UO 2. Graphische Darstellung der Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

wiederzufinden ist und vor allem in dieser Ausprägung als Artefakt einer übermäßig forcieren Beugung des Ellenbogengelenks mit Veränderung des fixierten Untersuchungsaufbaus interpretiert werden sollte (Abb. 3.23).

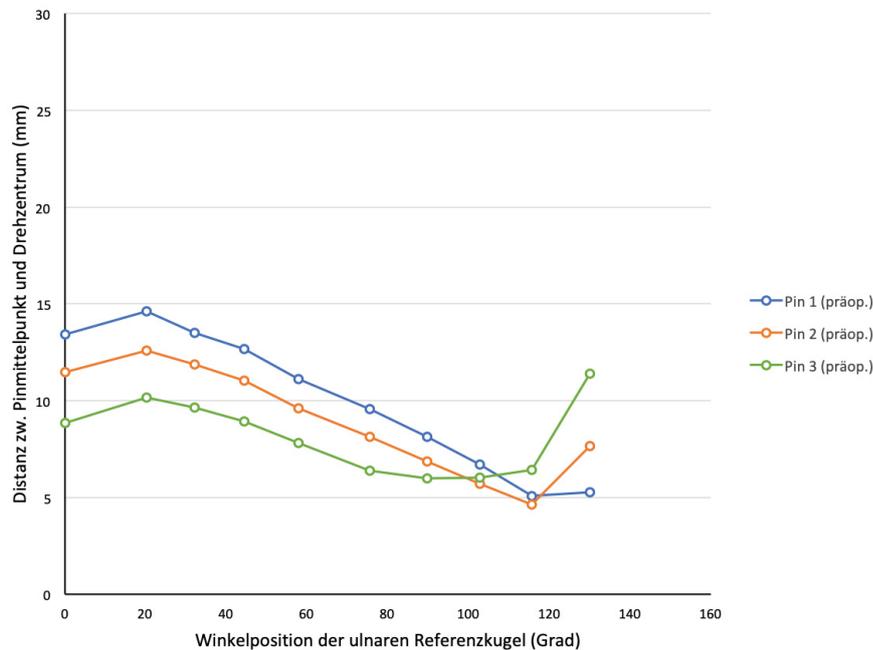


Abb. 3.23: Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 2. Graphische Darstellung der Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Ergebnisse nach Plattenimplantation

Im postoperativen Zustand ergibt sich im Vergleich zu den präoperativen Daten nur eine geringfügige Veränderung der Start- und Endposition aller drei Pins von maximal $9,5^\circ$. Da auch im postoperativen Zustand eine Mitbewegung des fixierten Humerus in der Schlussbewegung zu verzeichnen ist erfolgt an dieser Stelle kein direkter Vergleich der Ergebnisse des Untersuchungsobjekts 2 mit den Endpositionen anderer Untersuchungsobjekte. Der Vergleich des prä- und postoperativen Zustands von Untersuchungsobjekt 2 erscheint jedoch tolerabel. Demnach ergibt sich im Vergleich mit den präoperativen Ergebnissen eine Reduktion des Bewegungsausmaßes von $6,3^\circ$ für Pin 1, $9,6^\circ$ für Pin 2 und $11,4^\circ$ für Pin 3 (Abb. 3.24).

Der Abstand zwischen Pin 1 und 2 ist im Vergleich zum präoperativen Zustand über nahezu den gesamten Beugungsverlauf leicht vergrößert. Die Differenz zur präoperativen Serie beträgt temporär ungefähr einen Millimeter. In Endstellung ist der prä- und postoperative Abstand zwischen Pin 1 und 2 nahezu identisch. Der postoperative Abstand zwischen Pin 2 und 3 entspricht in Nullstellung des Ellenbogengelenks nahezu dem präoperativen Wert. In endgradiger Beugung sind der zweite und dritte Pin postoperativ um $0,4$ mm weiter voneinander entfernt als in der präoperativen Serie. Die graphische Dar-

stellung verdeutlicht ebenfalls, dass nach Einbringung der distalen Humerusplatte nur eine geringe Änderung der Abstände von maximal 0,7 mm vorliegt (Abb. 3.25).

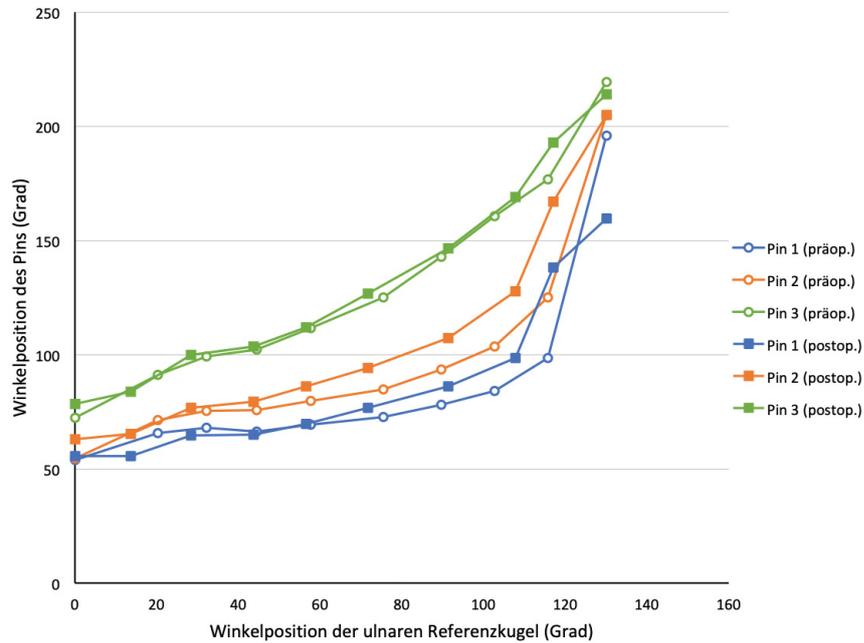


Abb. 3.24: Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 2. Vergleich der Winkelbewegung aller Pins der prä- und postoperativen Röntgenserie in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

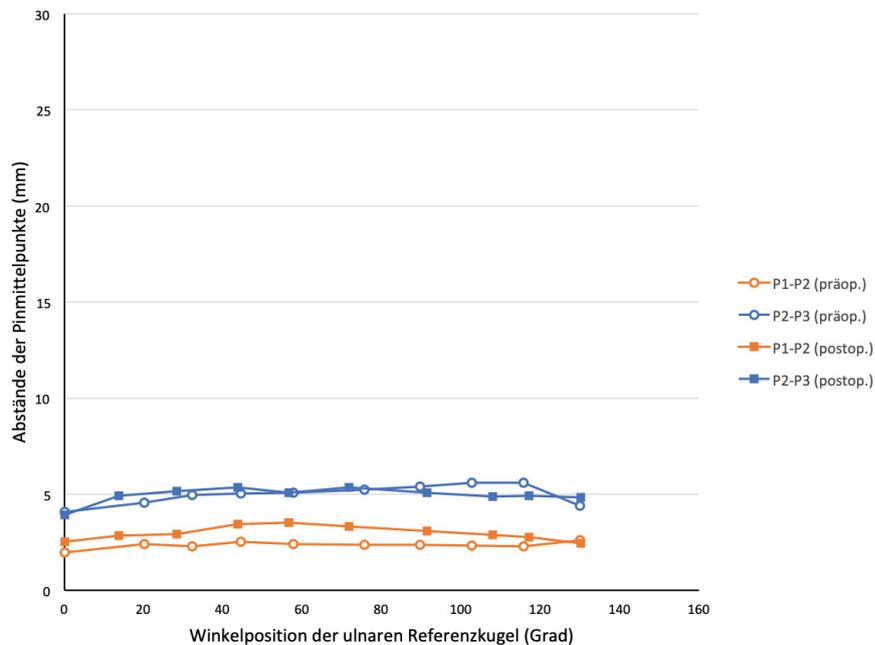


Abb. 3.25: Prä- und postoperative Pinabstände von UO 2. Vergleich der prä- und postoperativen Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Im Vergleich zum präoperativen Zustand befinden sich die Pins nach Implantation der Platte in Nullstellung um bis zu 4,1 mm (Pin 3) weiter vom Drehzentrum entfernt. (Pin 1: 2,5 mm; Pin 2: 2,8 mm) Die ausgeprägte Differenz zur präoperativen Röntgenserie vermindert sich jedoch zunehmend, sodass die Lage der Pins in Endposition nahezu dem präoperativen Zustand entspricht. Die präoperativ aufgetretene, initiale Distanzierung vom Drehzentrum lässt sich ebenfalls in der postoperativen Serie erkennen, jedoch zeigt sich hier eine geringere Ausprägung. Gleichzeitig ist auch die erneute Entfernung der Pins vom Drehzentrum in der Schlussbewegung der postoperativen Serie zu beobachten. Dies sollte jedoch wie in der präoperativen Serie weiterhin als Artefakt interpretiert werden (Abb. 3.26).

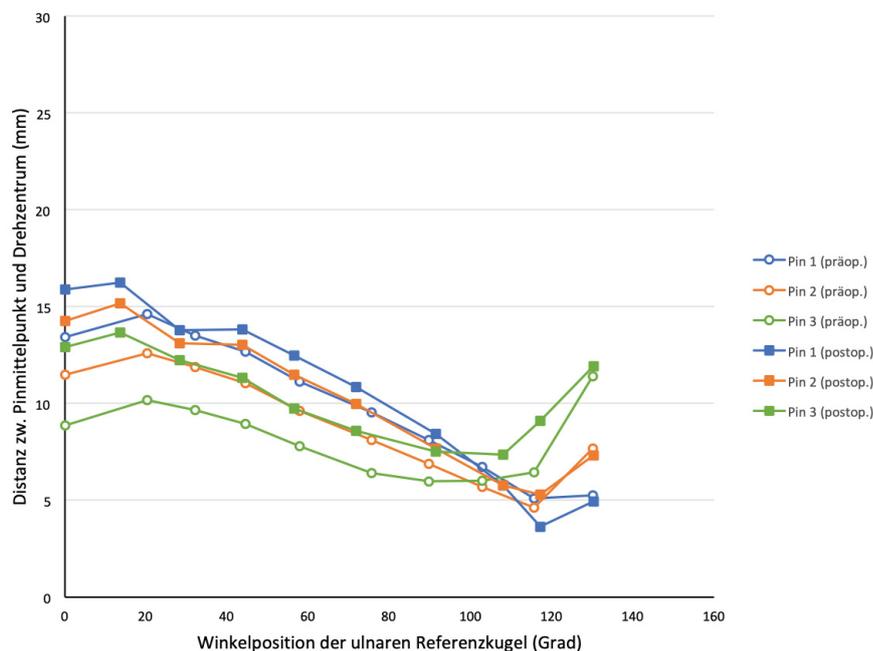


Abb. 3.26: Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 2. Vergleich der prä- und postoperativen Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

3.2.3 Untersuchungsobjekt 3

Für das Untersuchungsobjekt 3 konnten drei von vier eingebrachten Pins ausgewertet werden. Exkludiert wurde der proximale Pin (Pin 1), dessen intraneurale Lage während der Präparation des N. ulnaris nicht bestätigt werden konnte. Dementsprechend werden nur die Pins 2, 3 und 4 ausgewertet (Abb. 3.27).

Die Auswertung der ulnaren Referenzbewegung ergibt ein Bewegungsausmaß von $130,8^\circ$ (präoperativ) bzw. $122,9^\circ$ (postoperativ). In der präoperativen Röntgenserie zeigen sich keine ausgeprägten Abweichungen von den Zielwinkeln, wohingegen im postoperativen Zustand eine Abweichung von bis zu $12,1^\circ$ in der Endposition verzeichnet werden muss. Die Differenz der ulnaren Winkelbewegung zwischen der prä- und postoperativen Röntgenserie beträgt im Maximum $7,9^\circ$.

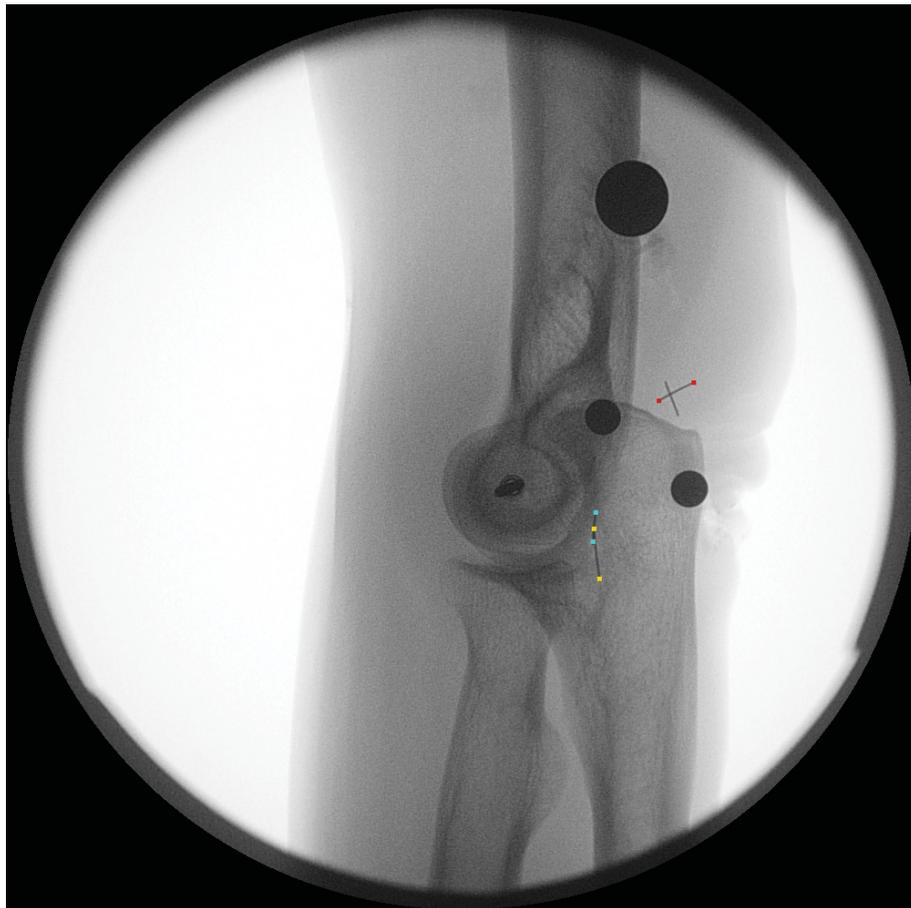


Abb. 3.27: Definierung der Pins von UO 3. Markierung des proximalen und distalen Endes von den zur Auswertung herangezogenen Pins 2 (rot), 3 (hellblau) und 4 (gelb).

Ergebnisse vor Plattenimplantation

In Nullstellung des Ellenbogengelenks liegt der zweite Pin proximal des Kubitaltunnels und in relativer Distanz ($57,2^\circ$) zu Pin 3, welcher zusammen mit Pin 4 im Bereich des Kubitaltunnels bzw. distal davon abgebildet ist (s. Abb. 3.27). Alle drei Pins vollziehen mit zunehmender Beugung eine ausgeprägte Winkelbewegung, die sich im Bewegungsausmaß widerspiegelt: für Pin 2 beträgt das Bewegungsausmaß $92,5^\circ$, für Pin 3 beträgt es 103° und für Pin 4 ergeben sich $127,7^\circ$. Analog zu den Ergebnissen von Untersuchungsobjekt 1 und 2 ergibt sich für den distalen Pin (Pin 4) das größte Bewegungsausmaß. Dabei erreicht der vierte Pin zeitweise nahezu die Winkelgeschwindigkeit der ulnaren Referenzkugel (Abb. 3.28).

Eine ausgeprägte Änderung der Pin-Abstände findet sich zwischen Pin 2 und Pin 3. Hier verringert sich der Abstand um 7,54 mm zwischen Null- und Endstellung. Die Pins 3 und 4 zeigen nahezu keine Änderung der Distanz zueinander (Abb. 3.29).

Die Distanz zum Drehzentrum nimmt bei allen Pins kontinuierlich ab. Diesbezüglich ergibt sich die größte Annäherung an das Drehzentrum für Pin 2 (10,4 mm). Die entsprechende Annäherung der anderen Pins beträgt 7,5 mm (Pin 3) und 7 mm (Pin 4) (Abb. 3.30).

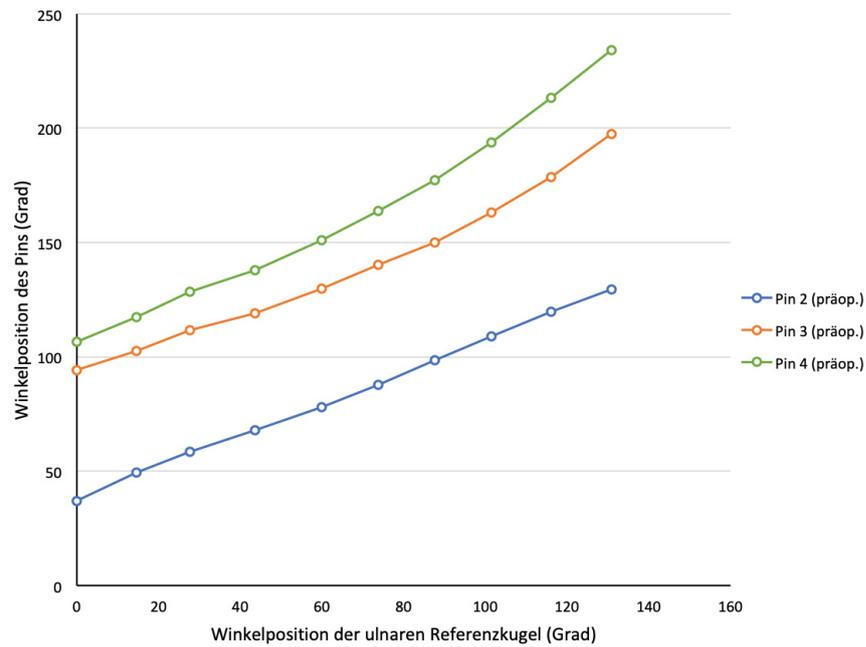


Abb. 3.28: Präoperative Pinbewegungen von UO 3. Graphische Darstellung der Winkelbewegungen aller Pins in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

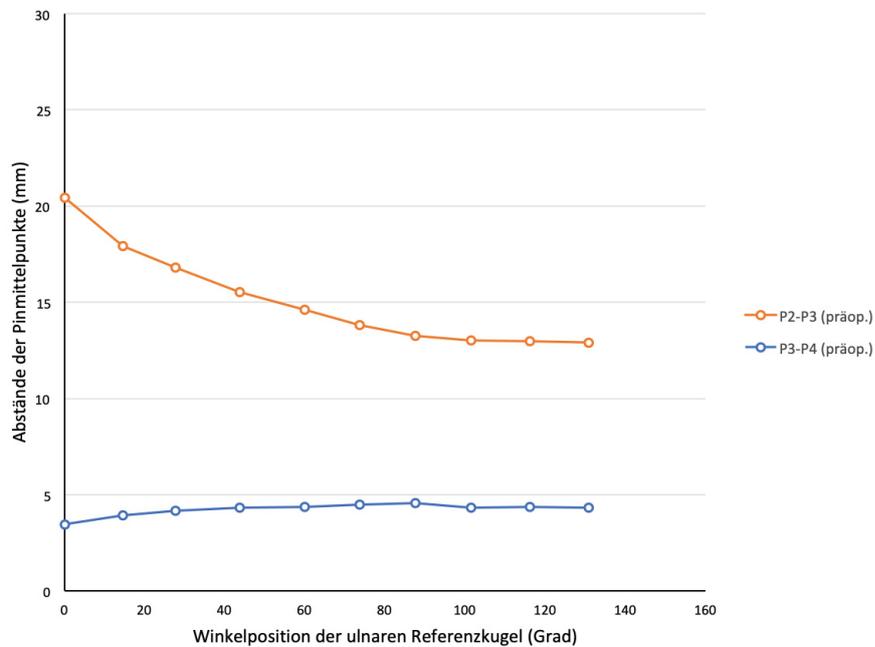


Abb. 3.29: Präoperative Pinabstände von UO 3. Graphische Darstellung der Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

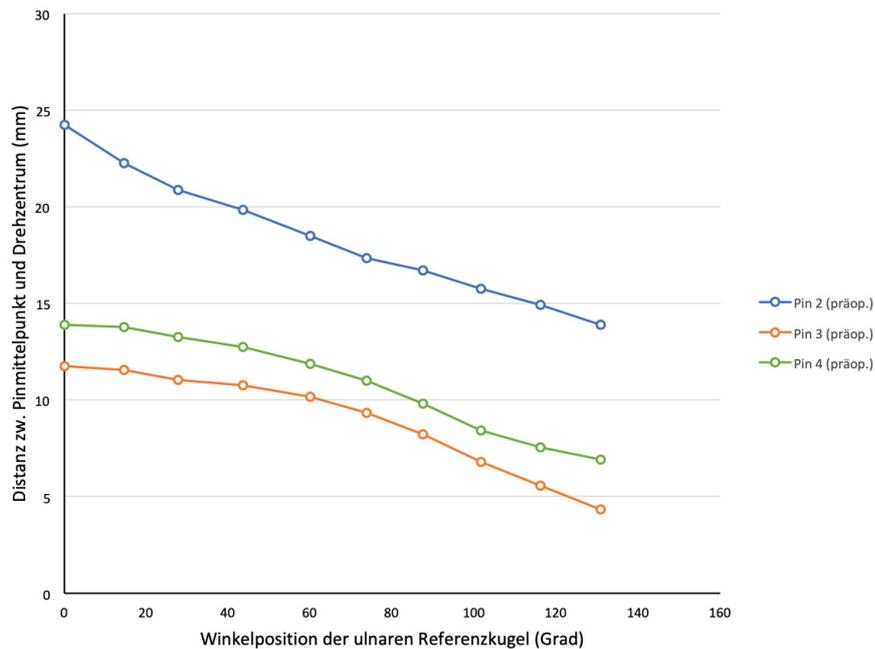


Abb. 3.30: Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3. Graphische Darstellung der Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Ergebnisse nach Plattenimplantation

Die Startposition der Pins ist im Vergleich zu den präoperativen Röntgenserien um $8,8^\circ$ (Pin 2), 6° (Pin 3) und $4,3^\circ$ (Pin 4) nach distal verschoben. Die Endposition zeigt unter anderem deutliche Abweichungen vom präoperativen Zustand: der zweite Pin erreicht eine distalere Position mit einer Differenz von $6,5^\circ$ zur präoperativen Lage. Im Gegensatz dazu wird die Endlage von Pin 3 und Pin 4 postoperativ bis zu $28,1^\circ$ weiter proximal beobachtet. Insgesamt ist das Bewegungsausmaß bei allen Pins nach Implantation der Platte um bis zu $32,4^\circ$ (Pin 4) vermindert (Abb. 3.31).

Der zweite und dritte Pin sind in Nullstellung der postoperativen Röntgenserie um 1,4 mm weiter voneinander entfernt als im präoperativen Zustand. Mit zunehmender Beugung nähert sich dieser Distanzunterschied jedoch an die präoperativen Werte an, sodass die Pins 2 und Pin 3 in der postoperativen Endstellung 1,8 mm näher aneinander liegen als präoperativ. Die Distanz zwischen Pin 3 und Pin 4 orientiert sich an dem präoperativen Zustand und bleibt demnach über den Verlauf der Beugung nahezu konstant (Abb. 3.32).

Bei allen Pins lässt sich auch nach der Plattenimplantation eine Annäherung an das Drehzentrum beobachten. In Nullstellung befindet sich der zweite Pin um 2,2 mm weiter vom Drehzentrum entfernt als präoperativ. Für Pin 3 und 4 ergibt sich eine geringe Änderung der Nulllage von maximal 0,2 mm. In Endstellung ist die postoperative Distanz zum Drehzentrum für alle Pins um bis zu 3,1 mm (Pin 3) vergrößert (Pin 4: 2,2 mm; Pin 2: 1,6 mm) (Abb. 3.33).

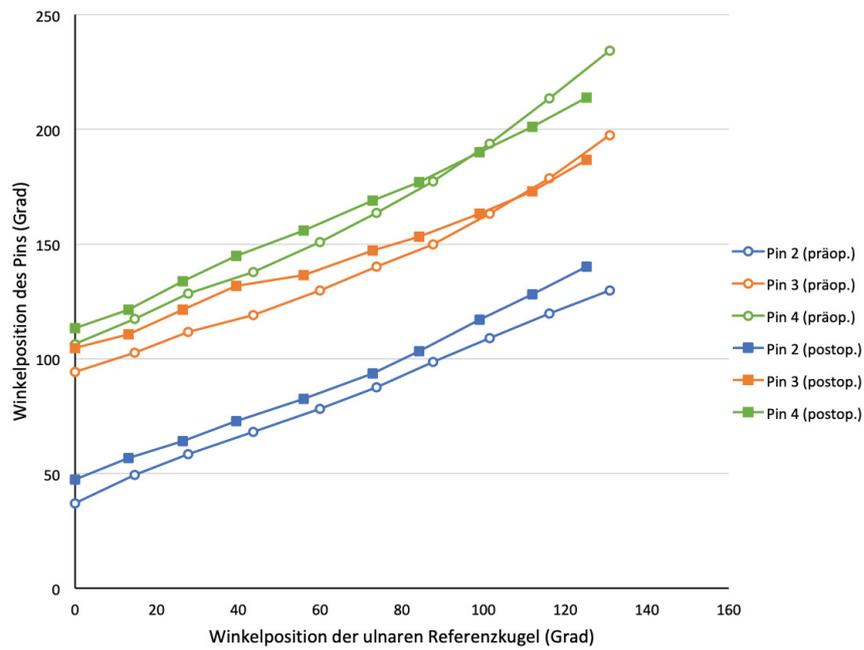


Abb. 3.31: Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 3. Vergleich der Winkelbewegung aller Pins der prä- und postoperativen Röntgenserie in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

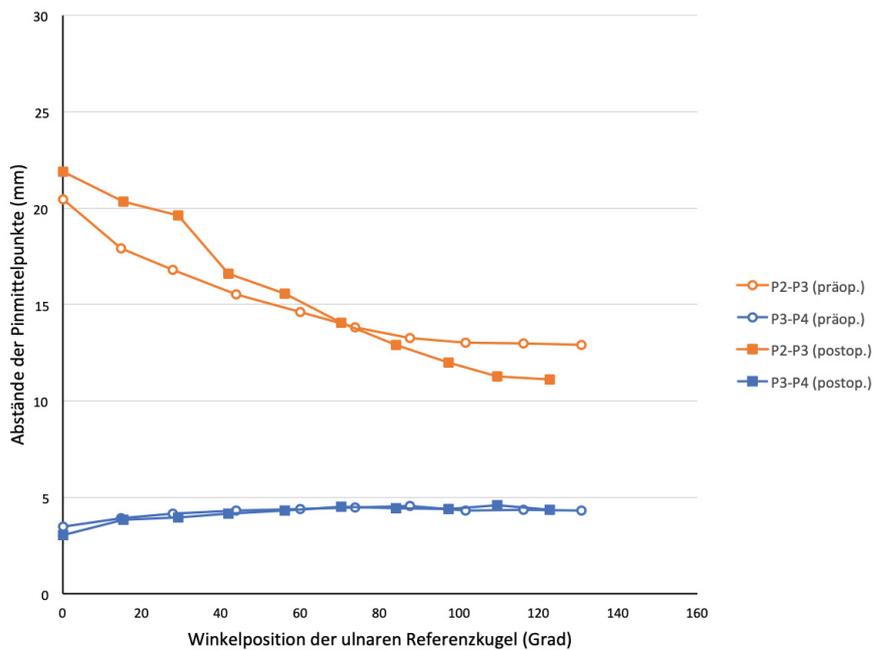


Abb. 3.32: Prä- und postoperative Pinabstände von UO 3. Vergleich der prä- und postoperativen Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

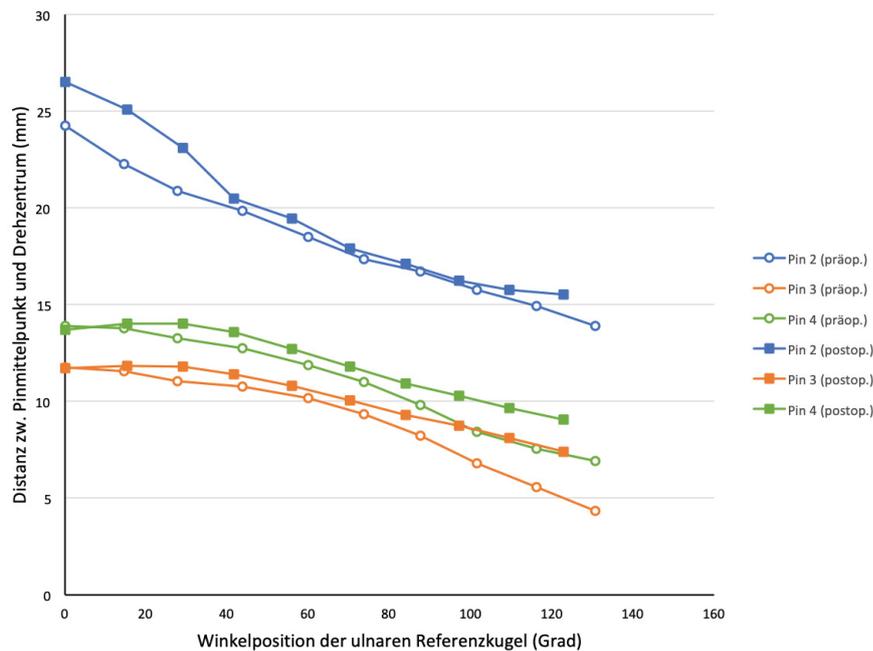


Abb. 3.33: Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3. Vergleich der prä- und postoperativen Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

3.2.4 Untersuchungsobjekt 4

Für die Röntgenserien des Untersuchungsobjekts 4 können drei von vier eingebrachten Pins ausgewertet werden. Der dritte Pin von proximal wird aufgrund seiner extraneuralen Lage nicht in die Auswertungen eingeschlossen (Abb. 3.34).

In der präoperativen Serie liegt ein Bewegungsausmaß der ulnaren Referenzkugel von $134,6^\circ$ (präoperativ) bzw. $128,8^\circ$ (postoperativ) vor. Die Abweichung der ulnaren Winkelposition von den Zielwinkeln beträgt maximal $7,6^\circ$ (präoperativ) beziehungsweise $6,7^\circ$ (postoperativ). Die Differenz zwischen den jeweiligen ulnaren Referenzwinkeln des prä- und postoperativen Zustands beträgt im Maximum $8,6^\circ$ und weicht nur bei zwei Zielwinkeln (15° und 135°) über fünf Grad voneinander ab.

Ergebnisse vor Plattenimplantation

In den präoperativen Röntgenbildern von Untersuchungsobjekt 4 überlagern sich Pin 1 ($49,4^\circ$) und Pin 2 ($58,4^\circ$) im Bereich vor dem Kubitaltunnel in Nullstellung. Der dritte Pin liegt deutlich weiter distal (125°) und nimmt dementsprechend eine Lage distal des Kubitaltunnels ein, die in dieser Ausprägung in keinem anderen Untersuchungsobjekt beobachtet nachzuweisen ist. Der Verlauf der Pins zeigt eine kontinuierliche Winkelbewegung nach distal, die im Fall des dritten Pins sehr konstant verläuft. Pin 1 und 2 sind zwischen 25° und 55° ulnaren Referenzwinkels leicht in ihrer Winkelgeschwindigkeit gemindert. Diese nimmt jedoch ab einer Beugung von 55° wieder zu und ähnelt der des dritten Pins. Das größte Bewegungsausmaß ergibt sich für den distalsten Pin (Pin 3) mit $115,1^\circ$ (Abb. 3.35).



Abb. 3.34: Definierung der Pins von UO 4. Markierung des proximalen und distalen Endes von den zur Auswertung herangezogenen Pins 1 (rot), 2 (hellblau) und 3 (gelb).

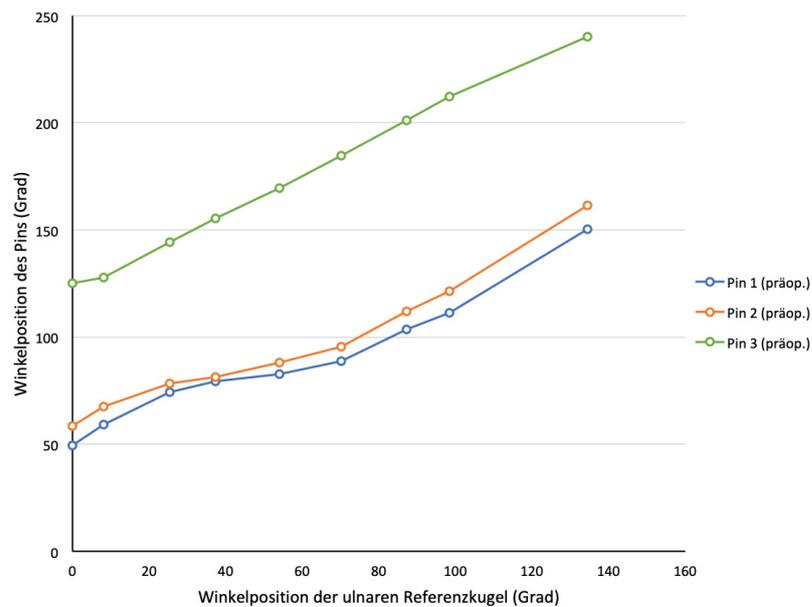


Abb. 3.35: Präoperative Pinbewegungen von UO 4. Graphische Darstellung der Winkelbewegungen aller Pins in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Aufgrund der einheitlichen Lage der Pins 1 und 2 in Nullstellung ergibt sich lediglich eine geringe Änderung der Distanz zwischen diesen beiden Pins (1,3 mm). Dahingegen entfernen sich Pin 2 und Pin 3 bis zur Endstellung um 4,9 mm voneinander nachdem initial eine geringe Annäherung von 0,6 mm statt zwischen diesen beiden Pins erfolgt (Abb. 3.36).

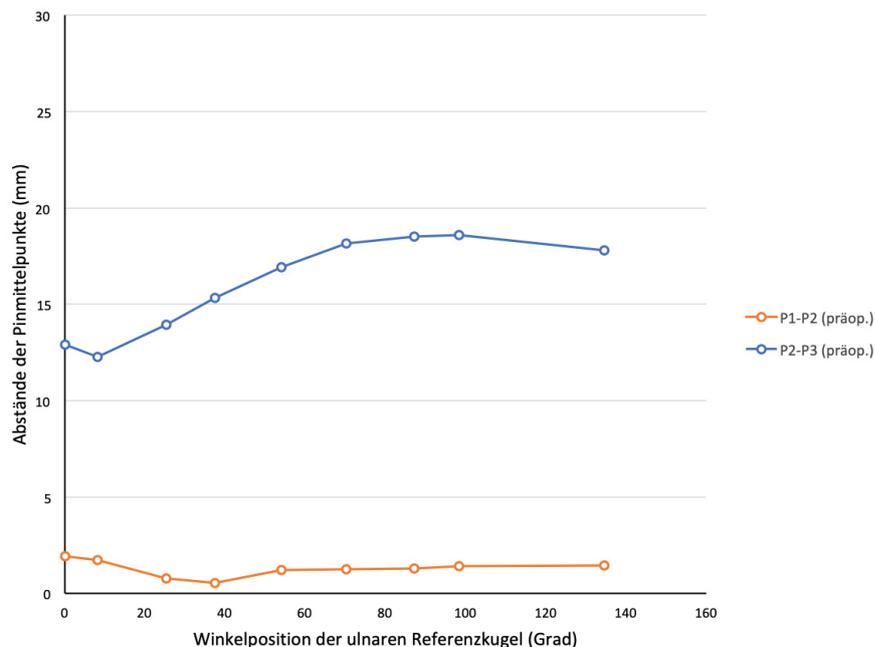


Abb. 3.36: Präoperative Pinabstände von UO 4. Graphische Darstellung der Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Pin 1 und 2 zeigen wie in den anderen Untersuchungsreihen eine Annäherung an das Drehzentrum und beträgt 3 mm (Pin 1) bzw. 1,9 mm (Pin 2). Der dritte Pin distanziert sich hingegen bis zur Endstellung konstant um insgesamt 4,3 mm vom Drehzentrum. Dies konnte bei keinem anderen Untersuchungsobjekt beobachtet werden. Insgesamt zeigt sich bei Untersuchungsobjekt 4 eine geringere Annäherung an das Drehzentrum als bei den anderen Untersuchungsobjekten. (Abb. 3.37).

Ergebnisse nach Plattenimplantation

Die Nulllage aller drei Pins ist im Vergleich zum präoperativen Zustand gering verändert. Der erste Pin befindet sich 7,1° weiter distal und der zweite Pin ist geringfügig nach proximal verlagert (1,4°). Der dritte Pin weist keine Änderung im Vergleich zur präoperativen Startposition auf. Auffallend ist hingegen, dass das Bewegungsausmaß postoperativ um bis zu 50,6° (Pin 1) verringert ist (40,7° für Pin 2; 8,5° für Pin 3) (Abb. 3.38).

Die Distanz zwischen Pin 1 und Pin 2 bleibt auch im postoperativen Zustand nahezu unverändert. Der Abstand zwischen dem zweiten und dritten Pin ist hingegen über den gesamten Verlauf um bis zu einen Millimeter vergrößert. Dies verdeutlicht sich vor allem in Abbildung 3.39.

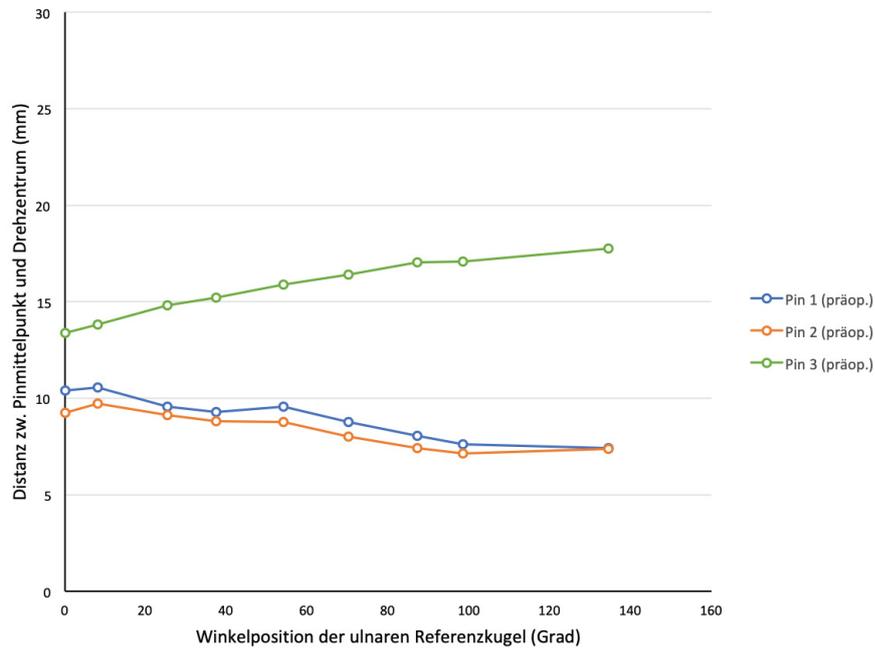


Abb. 3.37: Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 4. Graphische Darstellung der Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

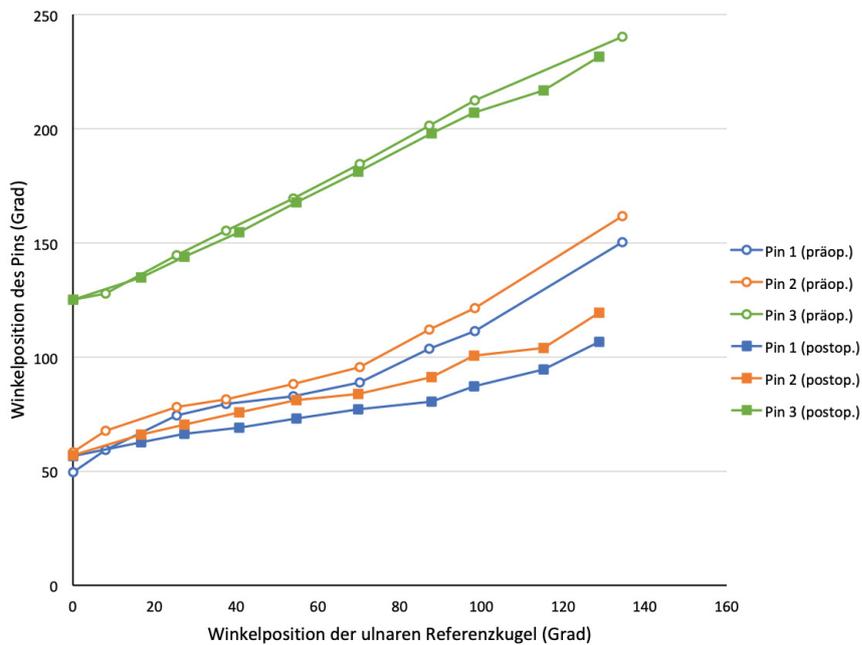


Abb. 3.38: Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 4. Vergleich der Winkelbewegung aller Pins der prä- und postoperativen Röntgenserie in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

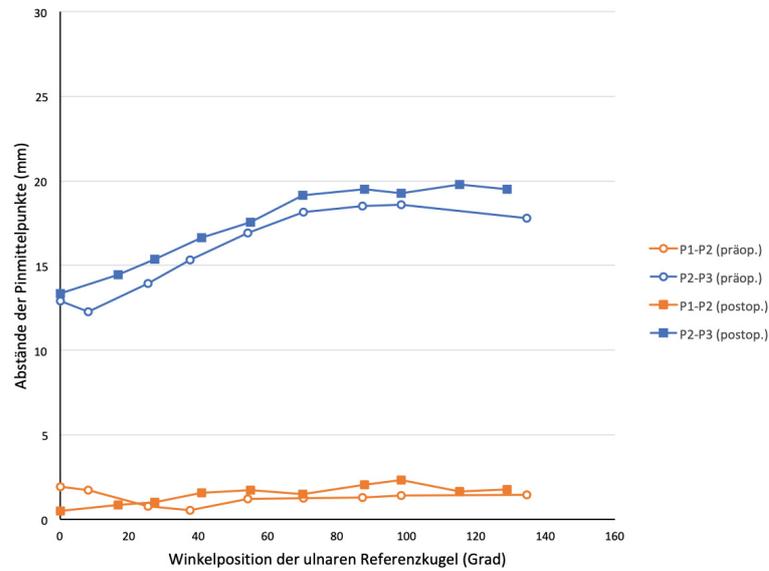


Abb. 3.39: Prä- und postoperative Pinabstände von UO 4. Vergleich der prä- und postoperativen Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Die Distanz zum Drehzentrum ist für alle Pins in postoperativer Nullstellung um maximal 0,4 mm verändert. Im Verlauf der Beugung entfernt sich der dritte Pin insgesamt um 2,4 mm weniger vom Drehzentrum als im präoperativen Zustand. Der zweite Pin nähert sich bis zur Endstellung um 0,3 mm mehr an das Drehzentrum an als präoperativ, wohingegen sich der erste Pin postoperativ um 0,8 mm mehr an das Drehzentrum annähert (Abb. 3.40).

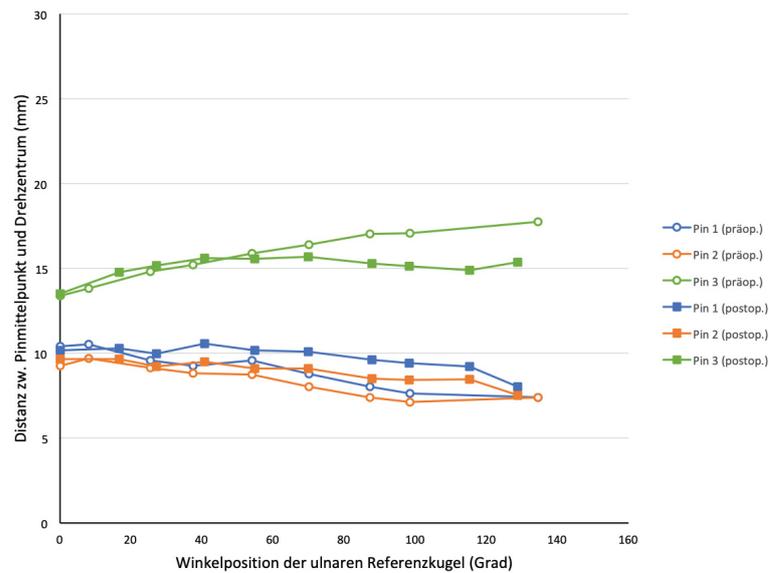


Abb. 3.40: Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 4. Vergleich der prä- und postoperativen Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

3.2.5 Einzeluntersuchungen zu Pronation und Supination

In einem Einzelversuch sollte der Einfluss der Rotationsbewegung des Unterarms auf den Verlauf des N. ulnaris vor und nach Implantation einer distalen Humerusplatte beurteilt werden. Hierfür war der Unterarm des Untersuchungsobjekts 3 im prä- und postoperativen Zustand jeweils in Pronation und Supination fixiert worden. Die Auswertungen erfolgen anhand der oben genannten Pins 2, 3 und 4 des vierten Untersuchungsobjekts.

Das Bewegungsausmaß der ulnaren Referenzkugel beträgt für die Röntgenserien zwischen $120,3^\circ$ (postoperativ in Supination) und $132,4^\circ$ (präoperativ in Pronation). Die maximale Abweichung des ulnaren Bewegungsausmaßes der Röntgenserien in Neutral-, Pronations- und Supinationsstellung beträgt $6,9^\circ$ (präoperativ) bzw. $4,9^\circ$ (postoperativ).

Pronation - Ergebnisse vor Plattenimplantation

Die Startposition von Pin 2 ist im Vergleich zur Neutralstellung um 4° nach distal verändert. Die Abweichung der Startposition von Pin 3 und Pin 4 bemisst sich auf weniger als 1° . Sowohl die Nulllage als auch der Verlauf von Pin 2 zeigen in Pronation nahezu keine Änderungen im Vergleich zur Neutralstellung. Dahingegen weisen der dritte und vierte Pin in Pronation eine leicht erhöhte Winkelgeschwindigkeit auf, sodass sich für beide Pins in Endstellung eine Erhöhung des Bewegungsausmaßes von $7,7^\circ$ (Pin 4) bzw. $14,26^\circ$ (Pin 3) beobachten lässt (Abb. 3.41).

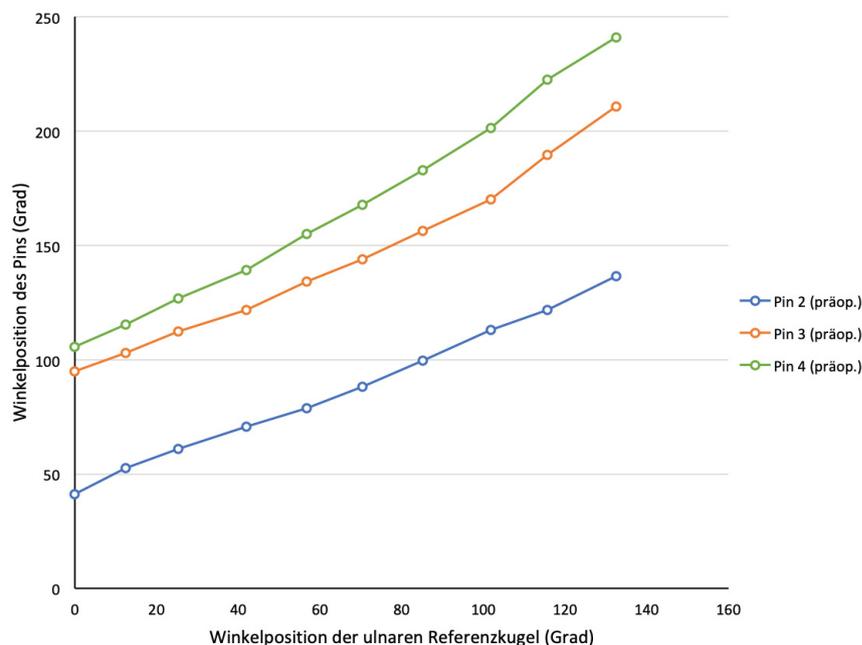


Abb. 3.41: Präoperative Pinbewegungen von UO 3 in Pronation. Graphische Darstellung der Winkelbewegungen aller Pins in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Der Abstand zwischen den Pins ist in Pronations- und Neutralstellung nahezu identisch und weicht um maximal 1,2 mm voneinander ab (Abb. 3.42).

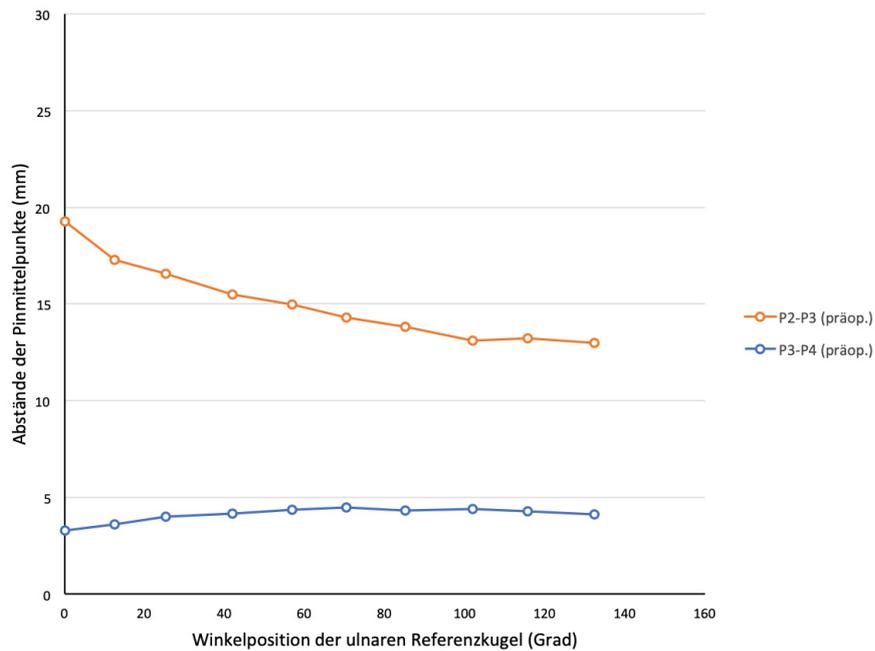


Abb. 3.42: Präoperative Pinabstände von UO 3 in Pronation. Graphische Darstellung der Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Die Distanz aller Pins zum Drehzentrum zeigt präoperativ in allen Stellungen des Unterarms einen ähnlichen Verlauf (Abb. 3.43).

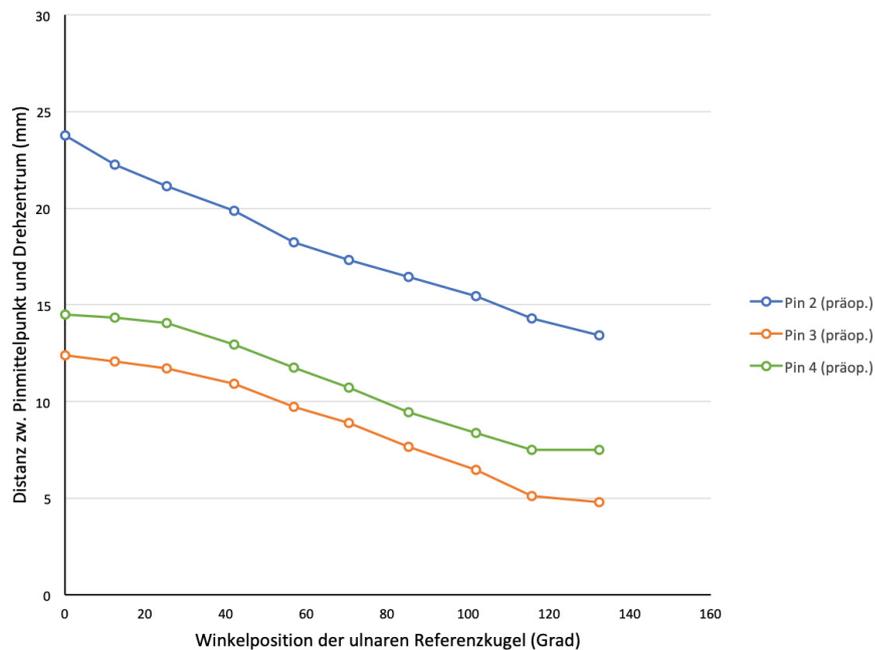


Abb. 3.43: Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Pronation. Graphische Darstellung der Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Pronation - Ergebnisse nach Plattenimplantation

Die Startposition ist im Vergleich zur präoperativen Serie in Pronation leicht nach distal verändert. Die Abweichung beträgt: $6,2^\circ$ für Pin 2, $10,4^\circ$ für Pin 3 und $6,7^\circ$ für Pin 4. Die Daten in Endstellung sind aufgrund des uneinheitlichen Bewegungsausmaßes der ulnaren Referenzkugel zwischen prä- und postoperativem Zustand nicht eindeutig zu erheben. Für Pin 3 und Pin 4 scheint sich jedoch postoperativ ein reduziertes Bewegungsausmaß zu ergeben, dessen Ursache in einer verminderten postoperativen Winkelgeschwindigkeit liegt (Abb. 3.44).

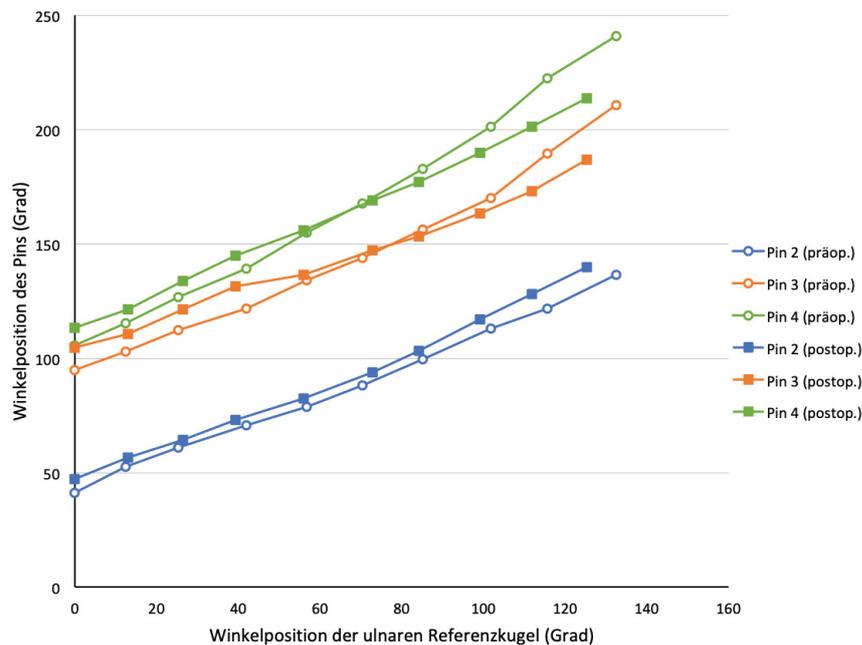


Abb. 3.44: Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 3 in Pronation. Vergleich der Winkelbewegung aller Pins der prä- und postoperativen Röntgenserie in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Die Distanz zwischen Pin 2 und 3 ist postoperativ in Nullstellung um 3,3 mm vergrößert während der Abstand zwischen Pin 3 und 4 nahezu unverändert ist. Dahingehen sind Pin 2 und Pin 3 postoperativ in Endstellung um mehr als 1 mm näher aneinander als in präoperativ. Pin 3 und Pin 4 zeigen auch hier keine ausgeprägten Abweichungen von der präoperativen Serie (Abb. 3.45).

Der Abstand ist im Vergleich zur präoperativen Röntgenserie für alle Pins um maximal 2,9 mm (Pin 4) vergrößert. Diese Abweichung bleibt in ähnlicher Ausprägung für alle Pins über den gesamten Verlauf der Beugung bestehen, sodass auch in Endstellung eine größere Distanz zum Drehzentrum verzeichnet werden kann als präoperativ (Abb. 3.46).

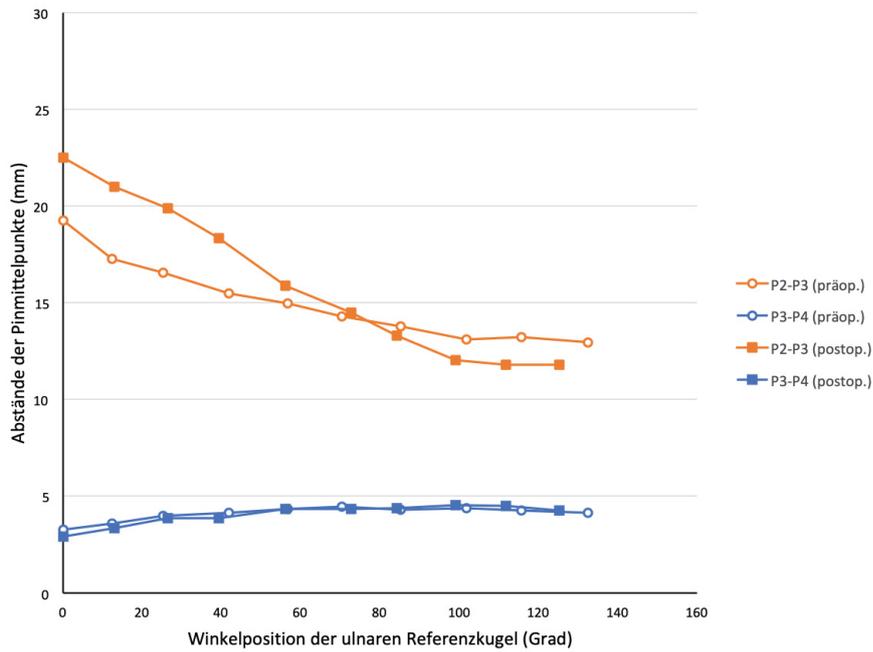


Abb. 3.45: Prä- und postoperative Pinabstände von UO 3 in Pronation. Vergleich der prä- und postoperativen Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

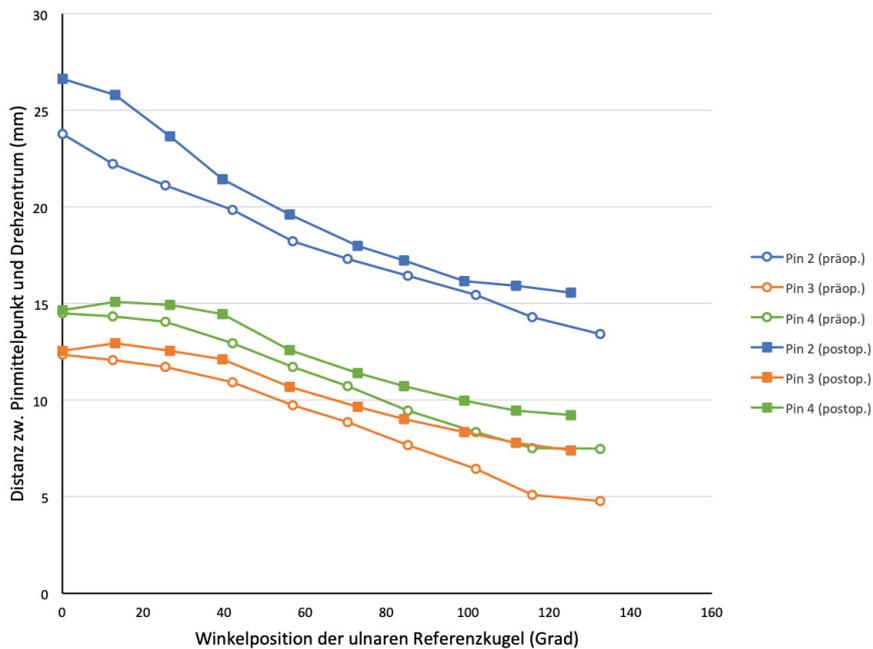


Abb. 3.46: Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Pronation. Vergleich der prä- und postoperativen Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Supination - Ergebnisse vor Plattenimplantation

Die Lage der Pins weicht in Nullstellung um maximal $6,1^\circ$ von den postoperativen Werten der Neutralstellung ab. Im Verlauf der Beugung zeigen Pin 3 und Pin 4 darüber hinaus ein verändertes Bewegungsmuster, das sich auch für Pin 2 dezent abbildet: nach einer starken, initialen Distalisierung nimmt die Winkelgeschwindigkeit vor allem bei Pin 3 stark ab, sodass bei diesem Pin die Bewegung nach distal zwischen $42,7^\circ$ und $56,7^\circ$ Beugung stagniert. Im weiteren Verlauf der Beugung nimmt die Winkelgeschwindigkeit erneut stark zu. Das Bewegungsausmaß der ulnaren Referenzkugel ist im Vergleich zur Röntgenserie in präoperativer Neutralstellung deutlich verringert, sodass auf einen direkten Vergleich des Bewegungsausmaßes der Pins verzichtet werden muss. Die graphische Darstellung lässt jedoch vermuten, dass das Bewegungsausmaß der Pins diesbezüglich in Pronation erhöht ist (Abb. 3.47).

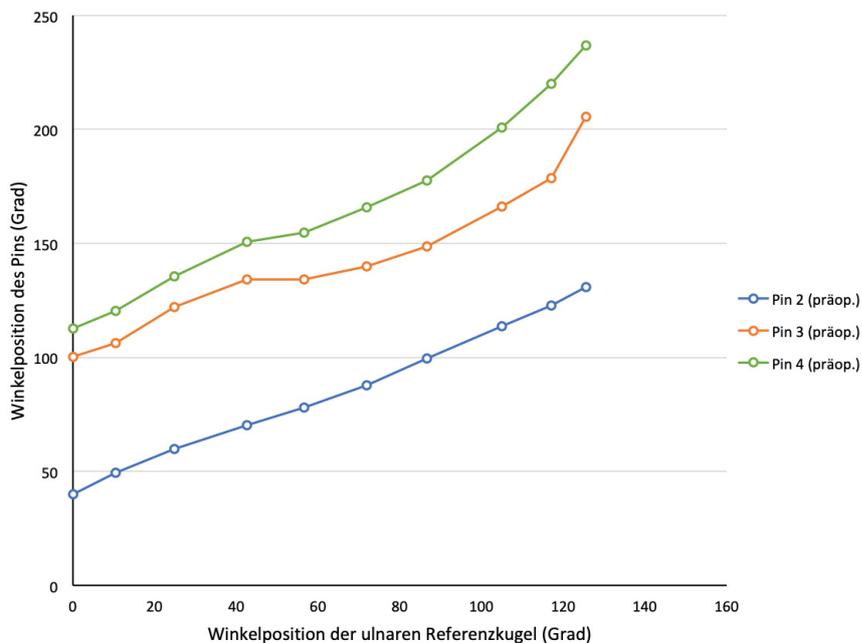


Abb. 3.47: Präoperative Pinbewegungen von UO 3 in Supination. Graphische Darstellung der Winkelbewegungen aller Pins in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Der Abstand zwischen Pin 2 und Pin 3 ist in präoperativer Supination zeitweise um bis zu 1,8 mm im Vergleich zur Neutralstellung erhöht. In Endstellung ist diese Abweichung nahezu aufgehoben (Abb. 3.48).

Der Abstand zum Drehzentrum ist im Vergleich zu Neutralstellung nahezu unverändert (Abb. 3.49).

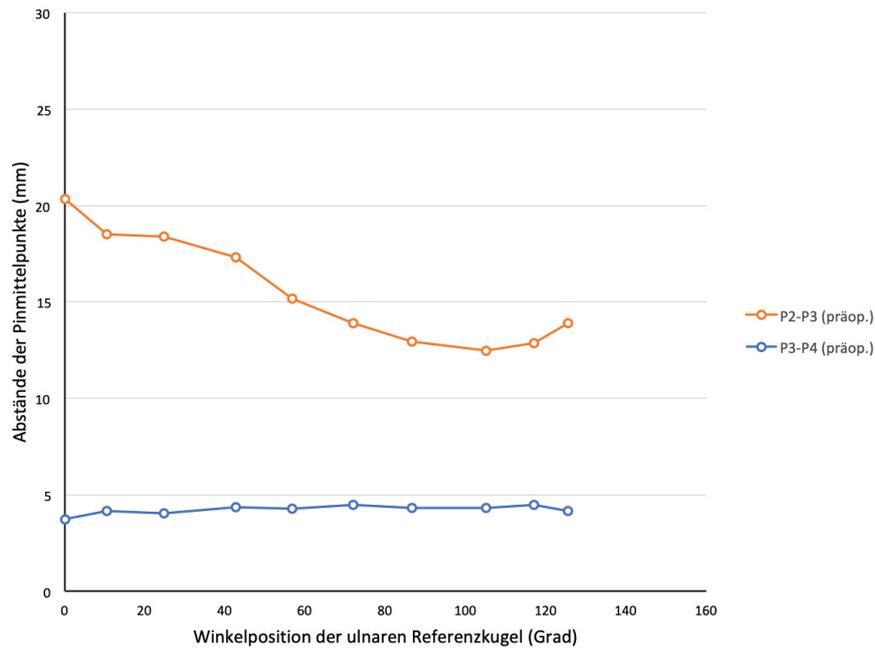


Abb. 3.48: Präoperative Pinabstände von UO 3 in Supination. Graphische Darstellung der Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

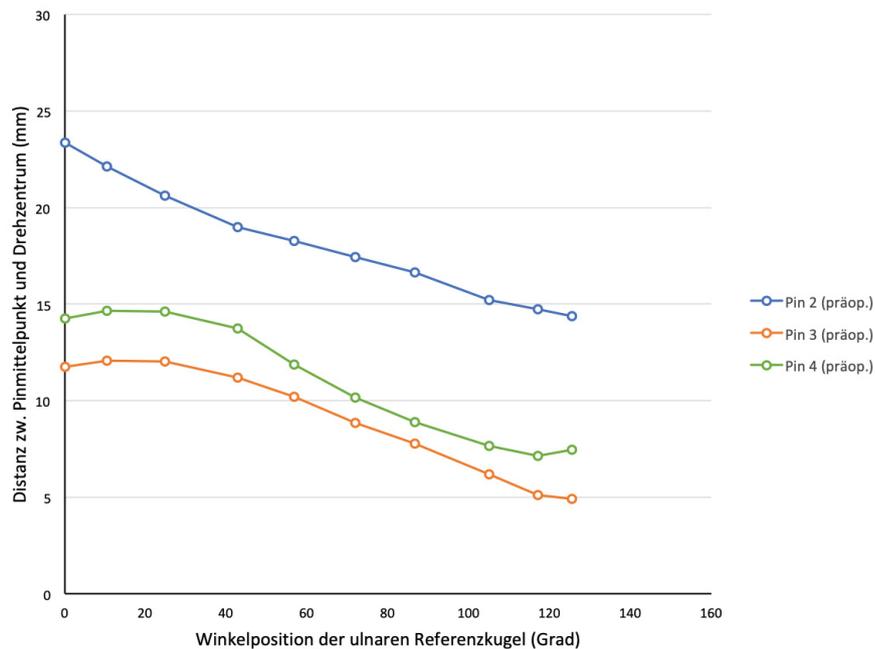


Abb. 3.49: Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Supination. Graphische Darstellung der Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Supination - Ergebnisse nach Plattenimplantation

Die Startposition der Pins ist im Vergleich zum präoperativen Zustand in Supination nahezu identisch. Aufgrund einer geringeren Winkelgeschwindigkeit ergibt sich für Pin 3 und 4 postoperativ vermutlich eine proximalere Endposition, die in einer Reduktion des Bewegungsausmaßes resultieren könnte.²³ Der zweite Pin liegt sowohl in postoperativer Null- und Endstellung geringfügig weiter distal als in der präoperativen Serie. Die ausgeprägten Schwankungen des Kurvenverlaufs, die in der präoperativen Serie zu beobachten sind, finden sich nicht im postoperativen Zustand wieder (Abb. 3.50).

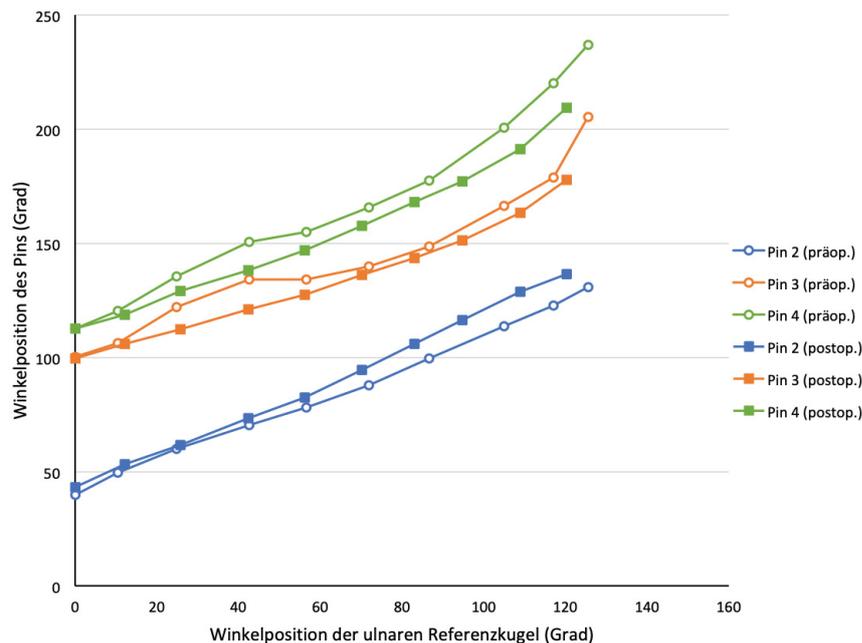


Abb. 3.50: Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 3 in Supination. Vergleich der Winkelbewegung aller Pins der prä- und postoperativen Röntgenserie in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

Bis zu einer Beugung von 108,9° ist in postoperativer Supination zwischen Pin 2 und 3 eine Verringerung des Abstands von bis zu 3,3 mm im Vergleich zur postoperativen Neutralstellung zu verzeichnen. Im Vergleich zur präoperativen Serie in Supination ergibt sich ebenfalls eine Verringerung des Abstand zwischen Pin 2 und 3, der bis zu 2,2 mm beträgt (Abb. 3.51).

Im Vergleich zum präoperativen Zustand variieren die Abstände der Pins zum Drehzentrum diffus. Es ergeben sich Abweichungen von bis zu 2,5 mm. Eine Beurteilung der Endposition ist aus dem oben genannten Grund nicht sinnvoll. In Bezug auf die postoperative Röntgenserie in Neutralstellung zeigt sich für alle drei Pins in Supinationsstellung eine proximalere Startposition von bis zu 2,9 mm, die sich über den Verlauf der Beugung jedoch an die Werte der postoperativen Neutralstellung annähert (Abb. 3.52).

²³Exakte Werte sollten auch in dieser Serie nicht ermittelt werden, da ebenfalls eine größere Abweichung des ulnaren Bewegungsausmaßes zur präoperativen Serie besteht.

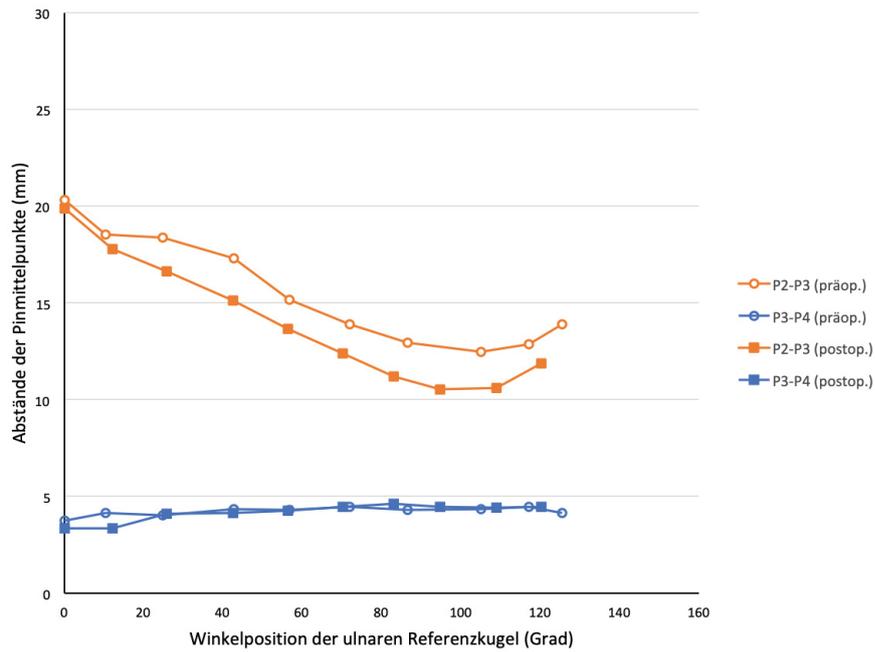


Abb. 3.51: Prä- und postoperative Pinabstände von UO 3 in Supination. Vergleich der prä- und postoperativen Abstände einzelner Pins zueinander in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

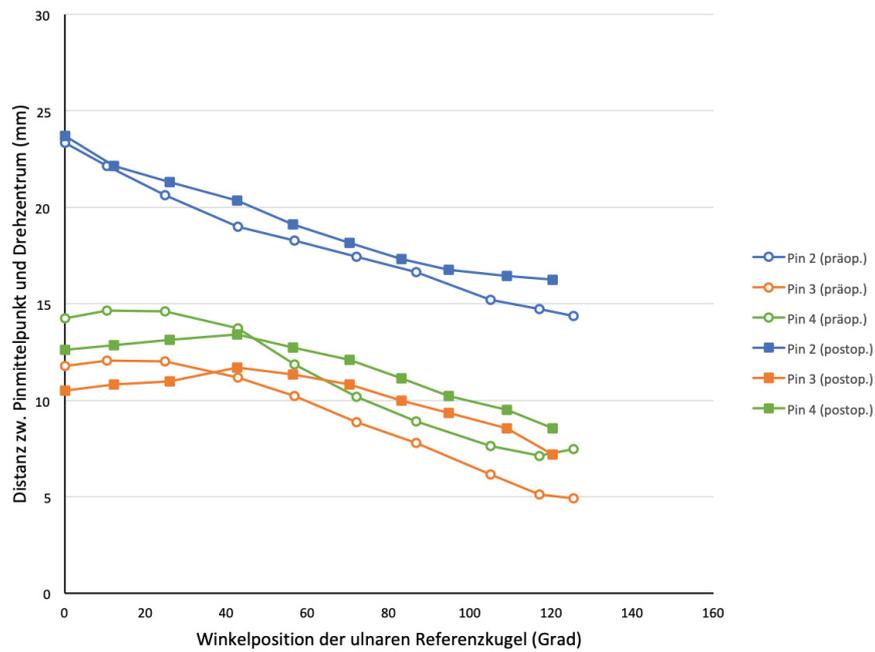


Abb. 3.52: Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Supination. Vergleich der prä- und postoperativen Distanzen aller ausgewerteten Pins zum Drehzentrum in Abhängigkeit von der ulnaren Winkelstellung.

3.2.6 Zusammenfassung

Die manuelle Winkeleinstellung mithilfe des Goniometers entspricht in den meisten Untersuchungen den festgelegten Zielwinkeln mit nur geringen Abweichungen. Die größte Differenz ist für das Untersuchungsobjekt 3 festzustellen und beträgt $12,1^\circ$. Die ausgeprägteste Abweichung der Winkeleinstellungen eines Untersuchungsobjekts zwischen prä- und postoperativem Zustand entspricht $8,6^\circ$ und ist ebenfalls dem Untersuchungsobjekt 3 zuzuordnen.

Die Auswertung der Winkelbewegung einzelner Pins ergibt für alle Untersuchungsobjekte, dass in den prä- und postoperativen Röntgenserien eine Zunahme der Winkelposition aller Pins im Sinne einer kreisähnlichen Bewegung um das Drehzentrum des Ellenbogengelenks herum erfolgt. Die folgende Bearbeitung eines Röntgenbilds verdeutlicht den Verlauf der ausgewerteten Pins im präoperativen Zustand (Abb. 3.53).

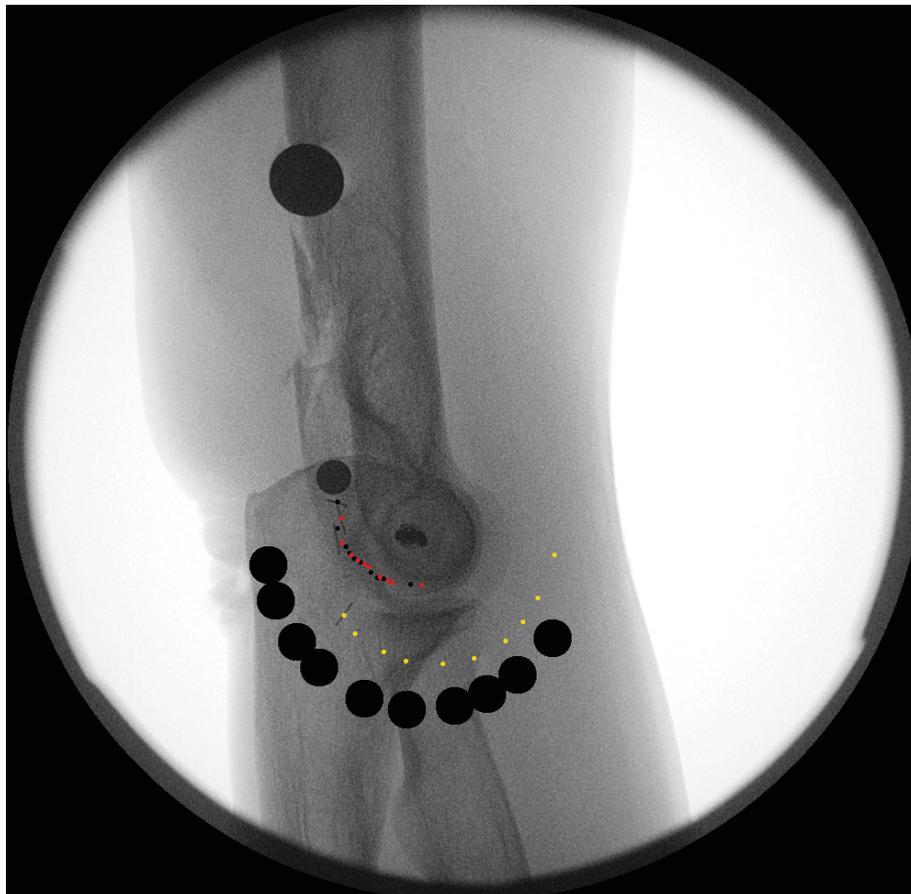


Abb. 3.53: Beispielhafter Pinverlauf. Beispielhafte Darstellung des Verlaufs der Pin-Mittelpunkte zwischen 0° und 135° Beugung anhand eines Röntgenbilds von Untersuchungsobjekt 3 im präoperativen Zustand.

Das errechnete Bewegungsausmaß ergibt für den gesamten Beugungsverlauf Werte zwischen $14,6^\circ$ und $127,7^\circ$.²⁴ Mit Ausnahme des Untersuchungsobjekts 2 findet sich dabei stets

²⁴Auf die Erwähnung des Bewegungsausmaßes von Untersuchungsobjekt 2 mit $151,6^\circ$ wird an dieser Stelle aus oben genannten Gründen verzichtet.

für die distal gelegenen Pins das größte Bewegungsausmaß, deren Lage in Nullstellung des Ellenbogengelenks entweder dem Kubitaltunnel oder aber einem Bereich distal des Kubitaltunnels zugeordnet werden kann. Für das Untersuchungsobjekt 2 ergibt sich im prä- und postoperativen Zustand ein vermehrtes Bewegungsausmaß des zweiten Pins im Vergleich zu Pin 3. In diesem Zusammenhang sollte jedoch erneut betont werden, dass die endgradige Bewegung des Untersuchungsobjekts 2 aufgrund der vermuteten Artefaktentstehung nicht eindeutig ausgewertet werden sollte.

Im Vergleich der prä- und postoperativen Röntgenserien findet sich bei drei von vier Untersuchungsobjekten unter anderem eine stark ausgeprägte Reduktion des Bewegungsausmaßes nach Implantation der distalen Humerusplatte. Diese beträgt bis zu 50,6°. Eine Ausnahme stellt das Untersuchungsobjekt 1 dar bei dem postoperativ eine Zunahme des Bewegungsausmaßes aller Pins von bis zu 9,9° nachgewiesen werden kann. Generell weist das Untersuchungsobjekt 1 das geringste Bewegungsausmaß im Vergleich aller Untersuchungsobjekte auf. Grund für die postoperative Verringerung des Bewegungsausmaßes ist in den meisten Fällen die Kombination einer distaleren Startposition und einer proximaleren Endposition der Pins als in den präoperativen Serien (Abb. 3.54).

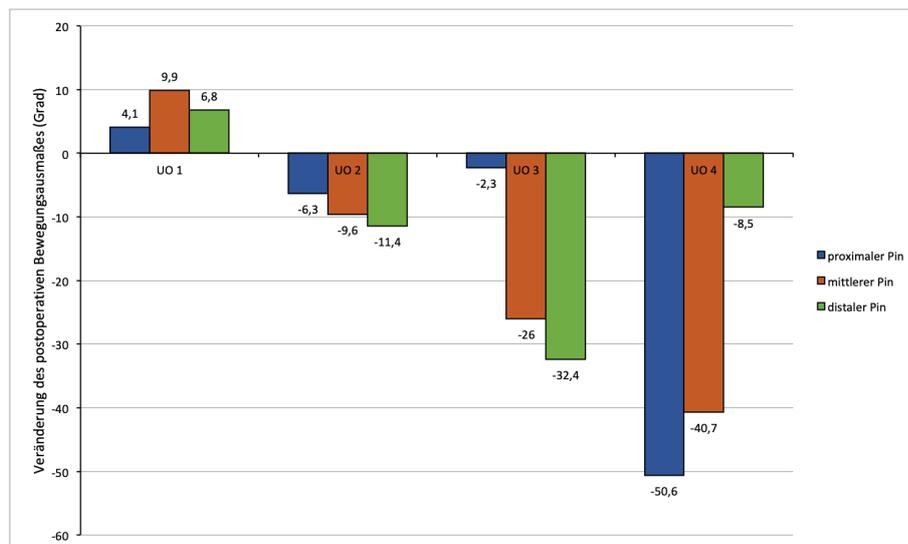


Abb. 3.54: Postoperative Veränderungen des Bewegungsausmaßes. Abweichung des Bewegungsausmaßes der einzelnen Pins im Vergleich des prä- und postoperativen Zustands; negative Werte entsprechen einer Reduktion des Bewegungsausmaßes in den postoperativen Serien.

Trotz des ausgeprägten Bewegungsausmaßes in einigen Untersuchungsobjekten übertrifft kein Pin die Winkelgeschwindigkeit der ulnaren Referenzkugel.²⁵

Die linearen Abstände zwischen den Pins zeigen ein äußerst variables Muster. Neben Annäherungen (Pin 2 und 3 von UO 1 bzw. Pin 2 und 3 von UO 3) und Distanzierungen (Pin 1 und 2 UO 1 bzw. Pin 2 und 3 UO 4) finden sich annähernd gleichbleibende Abstände

²⁵Die Auswertung des Untersuchungsobjekts 2 muss hier abermals gesondert betrachtet werden.

bei drei Untersuchungsobjekten (alle Pins von UO 2, Pin 3 und 4 von UO 3 und Pin 1 und 2 von UO 4). Bei drei von vier Untersuchungsobjekten ergibt sich im Vergleich der prä- und postoperativen Serien nach Implantation der distalen Humerusplatte ein - manchmal nur temporär - vergrößerter Abstand zwischen den einzelnen Pins (Pin 2 zu Pin 3 von UO 1, Pin 2 zu Pin 3 von UO 3 und Pin 2 zu Pin 3 von UO 4).

Für 10 von 12 ausgewerteten Pins findet sich in den prä- und postoperativen Serien eine Annäherung an das Drehzentrum, die im dreidimensionalen Raum einer Bewegung der Pins in Richtung des Kubitaltunnelbodens entspricht. Die Annäherung an das Drehzentrum beträgt dabei zwischen 1,1 mm und 15,2 mm. Für den dritten Pin des Untersuchungsobjekts 2 ergibt sich im präoperativen Zustand eine Entfernung vom Drehzentrum von 2,5 mm sowie für den dritten Pin des Untersuchungsobjekts 4 eine Distanzierung vom Drehzentrum in der prä- und postoperativen Röntgenserie von 4,3 mm bzw. 1,9 mm. In Bezug auf den dritten Pin von Untersuchungsobjekt 2 kann erneut keine Deutung dieser Merkmalsausprägung erfolgen. Die Entfernung des dritten Pins des Untersuchungsobjekts 4 vom Drehzentrum stellt jedoch eine Einzelbeobachtung dar und betrifft - bezogen auf alle prä- und postoperativ ausgewerteten Pins - den Pin mit der distalsten Startposition. Die Pins 2 und 3 des Untersuchungsobjekts 1 weisen die größte Annäherung an das Drehzentrum im Vergleich aller Untersuchungsobjekte auf.

Schlussfolgernd ergibt sich für alle ausgewerteten Pins mit einer Startposition proximal des Kubitaltunnels eine Annäherung an das Drehzentrum. Eine Startposition distal des Kubitaltunnels kann hingegen mit einer Entfernung vom Drehzentrum einhergehen (Abb. 3.53).

Die präoperativen Serien in Pronation und Supination des Untersuchungsobjekts 3 weisen vor allem in Supination temporäre Veränderungen der Pin-Position auf. Daraus ergibt sich eine ungewöhnlich schwankende Verlaufskurve aller Pins in Supination. Diese Schwankungen sind postoperativ nicht mehr nachzuweisen (Abb. 3.50).

In den postoperativen Serien zeigt sich zwar eine gewisse Varianz der Kurvenverläufe, jedoch sind keine ausgeprägten Abweichungen im Vergleich aller prä- und postoperativen Serien des Untersuchungsobjekts 3 zu beobachten. Lediglich in Pronation - jedoch nicht in Supination - findet sich postoperativ ein geringeres Bewegungsmaß, wie es auch in den Serien der Neutralstellung zu finden ist.

KAPITEL 4

Diskussion

4.1 Histologische Untersuchungen

4.1.1 Diskussion des Studiendesigns

Das grundlegende Wissen zur Vaskularisation des N. ulnaris im Bereich des Ellenbogens ist vor allem auf zahlreiche Präparationen des Nervs und dessen Gefäßversorgung zurückzuführen [33, 34]. Die Präparationen wurden im Laufe der Zeit immer mehr an den technischen Fortschritt angepasst, sodass heutzutage Studien des N. ulnaris mithilfe von Röntgen- und Ultraschalluntersuchungen problemlos möglich sind [29, 30, 35]. Diesbezüglich stellt die histologische Aufarbeitung des N. ulnaris im Bereich des Ellenbogens ein zusätzliches Verfahren dar um die Vaskularisierung des Nervs vor einem operativen Hintergrund zu betrachten und mögliche Ausblicke auf Gefahrenpunkte der intraoperativen Neurolyse zu geben.

In diesem Sinne waren für die vorliegende Arbeit die Nn. ulnares von vier oberen Körperextremitäten - inklusive eines Gewebemantels - entnommen und histologisch aufbereitet worden. Die Einteilung der Schnittpräparate in die Bereiche „präkubital“, „kubital“ und „postkubital“ stellte sich als durchaus sinnvoll heraus und ermöglichte einen Vergleich verschiedener Abschnitte des N. ulnaris in seinem Verlauf.

In den Querschnitten konnte sowohl die Lage als auch die Größe der parallel zum N. ulnaris verlaufenden arteriellen Gefäßen erhoben werden. Darüber hinaus wurde eine Beurteilung des umliegenden Gewebes - und des Kubitaltunnels im Besonderen - vorgenommen. Die Längsschnittpräparate sollten zusätzlich die Kommunikationspunkte intra- und extraneuraler Gefäße erfassen. In der vorliegenden Arbeit konnte demnach eine hohe Anzahl parallel zum N. ulnaris verlaufender Gefäße beschrieben werden, wobei der Nachweis einer direkten Anastomosierung intra- und extraneuraler Gefäße nicht möglich war. Dies könnte einerseits auf die verwendete Schnittebene zurückzuführen sein. Andererseits sollte in zukünftigen Untersuchungen eine größere Mengen an Schnittpräparaten in kleineren Abständen der Schnittebenen (bspw. Schnittpräparate alle 5-15 μm) angefertigt werden. Darüber hinaus könnte eine detaillierte Dokumentation und farbliche Markierung der extraneuralen Gefäße während der Präparation einen Vergleich mikro- und makroskopischer Ergebnisse ermöglichen. Daraus könnten mögliche Gefahrenpunkte des

intraoperativen Handlings des N. ulnaris aufgedeckt und potenzielle Lösungsansätze abgeleitet werden. Eine dringende Indikation zur weiteren Forschung besteht dabei weiterhin durch die unzufrieden stellende Rate an postoperativen Defiziten im Versorgungsgebiet des N. ulnaris, deren Genese aufgrund einer partiellen Devaskularisation des Nerven vorerst diskutiert bleiben muss [29, 64, 65].

4.1.2 Diskussion der Ergebnisse

Extraneurale Vaskularisation

In einem Bereich von bis zu zehn Zentimetern proximal und distal des Kubitaltunnels konnten extraneurale Gefäße mit einem Außendurchmesser von bis zu einem Millimeter in direkter Nähe des N. ulnaris nachgewiesen werden. Diese entsprechen am ehesten Ästen der Aa. collaterales ulnares superior et inferior sowie der A. recurrens ulnaris posterior, die in der Literatur relativ homogen als arterielle Hauptgefäße im Bereich des Ellenbogens beschrieben werden [29, 30, 32]. Eine mikroskopische Zuordnung der einzelnen Gefäße war in dieser Arbeit nicht erfolgt. Es dürfte sich jedoch in den proximalen Schnittbildern um arterielle Gefäßäste der A. collateralis ulnaris superior handeln, die im Bereich des Kubitaltunnels mit Ästen der A. collateralis ulnaris inferior anastomosieren und hierüber mit der - von distal in den Kubitaltunnel eintretenden - A. recurrens ulnaris posterior kommunizieren [30]. Demzufolge sind die Gefäße in den Anschnitten des Kubitaltunnels am ehesten der A. recurrens ulnaris posterior zuzuordnen [29]. Distal des Kubitaltunnels wird der N. ulnaris hauptsächlich durch die A. ulnaris versorgt [30], die jedoch nicht in den distalen Schnittpräparaten abgebildet ist. Vielmehr finden sich kleinere Gefäßäste, die am ehesten ihren Ursprung in der A. ulnaris haben.

Eine alternative Zuordnung der Gefäße zu den hauptversorgenden Arterien anhand der vorbeschriebenen Durchmesser ist aufgrund des ähnlichen Kalibers aller drei Hauptstämme ebenfalls nicht durchführbar. Die A. collateralis ulnaris superior wird mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 1,6 mm bis 1,8 mm angegeben, die A. collateralis ulnaris inferior mit 1,2 mm bis 1,5 mm und die A. recurrens ulnaris posterior mit 1,5 mm bis 1,6 mm [29, 32, 34]. Dementsprechend lässt sich vermuten, dass es sich bei den Gefäßen der histologischen Untersuchung um Arteriolen der hauptversorgenden Arterien handelt. Diese erreichen einen maximalen Durchmesser von ungefähr einem Millimeter und entsprechen somit nicht den in der Literatur beschriebenen Werten der Hauptgefäße.

Durch die farbige Markierung der olekranonnahen Seite konnte die Lage der begleitenden Gefäße im Kubitaltunnel mikroskopisch nachvollzogen werden. Es zeigte sich, dass sich alle arteriolen Gefäße auf der olekranonnahen Seite des Präparats befinden und somit lateral des N. ulnaris verlaufen. Dies entspricht den Ergebnissen von Yamaguchi et al. [30]. Sie beschrieben die A. recurrens ulnaris posterior als das hauptversorgende Gefäß des N. ulnaris im Kubitaltunnel und definierten dessen Verlauf zwischen N. ulnaris und Olekranon anhand von 30 präparierten, oberen Körperspenderextremitäten [30].

Die streckseitige Lage der A. collateralis ulnaris posterior ergibt sich grundlegend aus dem ebenfalls streckseitigen Verlauf des N. ulnaris, dessen Versorgung im Kubitaltunnel maßgeblich durch die A. collateralis ulnaris posterior übernommen wird. Zu diskutieren bleibt jedoch die ungewöhnliche Position des Gefäßes im Kubitaltunnel, die vor allem in Beugung des Ellenbogengelenks als potenzielle Gefahr für einen traktionsbedingten Verschluss des Gefäßes bedacht werden muss. Ein möglicher Erklärungsansatz könnte wie folgt aussehen: Die Reduktion des Kubitaltunnelvolumens in Flexion des Ellenbogengelenks durch eine Annäherung von Kubitaltunneldach und -boden [20, 22] könnte eine Kompression der A. collateralis ulnaris posterior in anteriorer (am Boden des Kubitaltunnels) oder posteriorer Lage (am Dach des Kubitaltunnels) zum N. ulnaris begünstigen. Gleichzeitig könnte ein medialer Verlauf der Arterie zwischen N. ulnaris und Epicondylus medialis humeri die Gefahr einer direkten Kompression des Gefäßes durch die flexionsbedingte Annäherung des N. ulnaris an den Epicondylus medialis humeri erhöhen [60]. Letzten Endes kann anhand dieser Überlegungen diskutiert werden, dass das Ischämierisiko des N. ulnaris - im Sinne eines temporären Verschlusses der versorgenden Gefäße in starker Beugung des Ellenbogengelenks - durch eine streckseitige und laterale Lage der Gefäßversorgung am geringsten ist.

Der direkte Nachweis extraneuraler Anastomosen der hauptversorgenden Arterien konnte aufgrund der gewählten Abstände zwischen den einzelnen Schnittpräparatebenen nicht erfolgen. Dennoch ist davon auszugehen, dass eine ausgeprägte Kommunikation zwischen den Arterien im Bereich des Kubitaltunnels besteht, die vor allem durch die A. recurrens ulnaris posterior und die A. collateralis ulnaris inferior gebildet wird.²⁶ [35] Dabei scheint die A. collateralis ulnaris inferior als Verbindungsarterie zwischen A. collateralis ulnaris superior und A. recurrens ulnaris posterior eingebunden zu sein und stellt damit einen wichtigen Faktor für die arterielle Versorgung des N. ulnaris im Bereich des Kubitaltunnels dar [29].

Intraneurale Vaskularisation

Die intraneurale, arterielle Versorgung des N. ulnaris konnte in allen Längs- und Querschnittpräparaten nachgewiesen werden. Dabei sind die Gefäße in der Vielzahl der Fälle in einem parallelen Verlauf zum Nerv abgebildet. In den kubitalen Schnittpräparaten des Präparats 3 konnte darüber hinaus eine intraneurale Ansammlung von zahlreichen kapillären Gefäßen im Sinne eines Gefäßplexus nachgewiesen werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer Studie von Yamaguchi et al. [30], die ein mikroskopisch sichtbares und segmental angelegtes Gefäßnetz beschrieben, dessen Ursprung in den hauptversorgenden Gefäßen (SUCA, IUCA und PURA) liegt. Demnach verlaufen regelhaft Arteriolen der oben genannten Gefäße entlang des N. ulnaris und teilen sich bei Durchtretung des Epineuriums

²⁶Der A. collateralis ulnaris inferior wurde erst in den vergangenen Jahren eine größere Bedeutung in der arteriellen Versorgung des N. ulnaris zugesprochen [29, 30]. Beispielsweise hatten Prevel et al. [32] einige Jahre zuvor nur in 5 von 18 präparierten Körperspenderextremitäten eine A. collateralis ulnaris inferior nachweisen können und dementsprechend eine Hauptversorgung des Nerven durch die Aa. collateralis ulnaris superior et recurrens ulnaris posterior postuliert.

in auf- und absteigenden Äste auf, deren zahlreiche Anastomosen ein ausgeprägtes intraneurales Kapillarnetz bilden. Eine besonders starke Ausprägung dieses Gefäßnetzes fanden die Autoren im Bereich des Kubitaltunnels, wo die A. collateralis ulnaris inferior kurz vor dem Epicondylus medialis humeri zur Versorgung des N. ulnaris beiträgt. [30] Zusätzliche Bestätigung finden die Ergebnisse in den Untersuchungen von Li et al. [29], die vor allem die segmentale Adressierung des N. ulnaris durch Gefäßäste aus den Hauptgefäßen betonten. Hierfür hatten die Autoren unter anderem sechs obere Körperspenderextremitäten intravasal mit einer röntgendichten Flüssigkeit gespült und anschließend die neurale Vaskularisierung in Röntgenaufnahmen der Ellenbogenregion beurteilt. [29]

Die von Yamaguchi et al. [30] beschriebene Verdichtung des Kapillarnetzes im Bereich des Kubitaltunnels konnte in dieser Arbeit nicht eindeutig nachgewiesen werden. Zwar bestätigte sich für allen Präparate eine reichhaltige, intraneurale Vaskularisierung des N. ulnaris, die jedoch nur in einem von vier Präparaten mit einer starken lokalen Ausprägung nachgewiesen werden konnte.

4.1.3 Übertragung auf die chirurgische Praxis

In der chirurgischen Praxis wird bis heute die anteriore Transposition des N. ulnaris bei der Versorgung distaler Humerusfrakturen - aber auch als Option der operativen Therapie des Kubitaltunnelsyndroms - diskutiert [26, 53]. Ogleich die Entscheidung zur Verlagerung des Nervs dem zuständigen Operateur obliegt, wird in der Literatur zunehmend der intraoperative Erhalt der A. collateralis ulnaris inferior empfohlen, deren Integration in die arterielle Versorgung des N. ulnaris auch bei einer anterioren Transposition erhalten bleiben kann [27].

Diesbezüglich simulierten Li et al. [29] an mehreren, oberen Körperspenderextremitäten eine anteriore Transposition und schlossen aus ihren Untersuchungen, dass eine Verlagerung des N. ulnaris nicht mehr als 2,5 Zentimeter von der Ursprungslage des Nervs betragen sollte um die arterielle Gefäßversorgung vor Zugkräften zu bewahren. Die Empfehlung versucht dabei eine maximal tolerable Transpositionsdistanz zu definieren, die zwar im Einzelfall erhöht sein kann, jedoch aus anatomischer Perspektive möglichst nicht überschritten werden sollte [29]. Vor dem chirurgischen Hintergrund muss eine Verlagerung von bis zu 2,5 Zentimetern jedoch zunächst infrage gestellt werden. Demnach könnte zwar die Vaskularisation des N. ulnaris durch eine Transposition erhalten bleiben, der Erhalt der motorischen Innervation zum M. flexor carpi ulnaris und dem M. flexor digitorum profundus [1, 40] ist jedoch bei einer Verlagerung von 2,5 Zentimetern möglicherweise gefährdet.

Darüber hinaus stellt die Präparation des N. ulnaris und die damit einhergehende, langstreckige Devaskularisation des Nervs selbst beim Erhalt der A. collateralis ulnaris inferior weiterhin eine potenzielle Ursache für postoperative Funktionseinschränkungen des Nervs dar [53, 54]. Diesbezüglich wurde in einer Meta-Analyse von Shearin et al. [54] beobachtet, dass die Inzidenz der ulnaren Neuropathie nach Osteosynthese des distalen Humerus bei Patienten mit anteriorer Transposition des N. ulnaris im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne anteriore Transposition deutlich angehoben war (23,5 % bzw. 15,3 %). Die Autoren diskutieren diesbezüglich die Devaskularisation des N. ulnaris sowie eine vermehrte postoperative Narbenbildung im unphysiologischen Nervenbett oder ein erhöhtes Verletzungs-

und Manipulationsrisiko des Nerven [54]. Obwohl heutzutage einige Autoren als Schlussfolgerung der vorgelegten Studien von einer langstreckigen Präparation des N. ulnaris abraten findet sich bisher - mutmaßlich aufgrund der hohen interindividuellen Variabilität des Nervenverlaufs - keine eindeutige Empfehlung für ein tolerables Dissektionsausmaß des Nerven [44, 54].

Abgesehen von einer irreversiblen Devaskularisation des N. ulnaris durch intraoperative Präparationsmaßnahmen beschreiben verschiedene Autoren eine (temporäre) Reduktion des neuralen Blutflusses in Abhängigkeit von der Stellung des Ellenbogengelenks [35], der Operationstechnik [66], dem Dehnungszustand des Nerven [67] oder der extraneuralen Kompression [58], die als potenzielle Ursache postoperativer Funktionsstörungen des Nerven herangezogen werden könnten.

Diesbezüglich konnten Moore et al. [35] in einer sonographischen Studie die temporäre Reduktion des Blutflusses zum N. ulnaris durch eine ausgeprägte Flexion von 120° im Ellenbogengelenk nachweisen.²⁷ Die Autoren schlussfolgerten demnach, dass die längere, intraoperative Flexion des Ellenbogens eine mögliche Ursache einer Ischämie des N. ulnaris darstellt. Ein Einfluss durch die Stellung des Schultergelenks konnte darüber hinaus nicht nachgewiesen werden. [35] Für eine bessere Aussagekraft der Studie sollte trotz einheitlicher Ergebnisse in zukünftigen Studien eine zusätzliche Evaluation der A. collateralis ulnaris superior erfolgen, die - wie bereits erwähnt - ebenfalls einen Beitrag zur arteriellen Versorgung des N. ulnaris im Bereich des Ellenbogens leistet.

Weiterhin wiesen Ogata et al. [66] eine temporäre Minderdurchblutung des N. ulnaris von bis zu sieben Tagen nach einer anterioren Transposition an neun Makaken-Affen nach. In den Vergleichsgruppen war eine mediale Epikondylektomie bzw. eine alleinige Spaltung des Kubitaltunnelretinakulums durchgeführt worden, die jedoch geringere Auswirkungen auf die Durchblutung des Nerven aufwies [66]. Darüber hinaus fanden die oben genannten Autoren [58] einige Jahre später - ebenfalls durch Studien an Makaken-Affen²⁸ - heraus, dass die Kompression des N. ulnaris eine stärkere Einschränkung der Nervenleitgeschwindigkeit verursacht als eine temporäre Verminderung des arteriellen Blutflusses zum Nerv. Die Kombination der Faktoren „Kompression“ und „Devaskularisation“ des Nerven bewirkte jedoch in den Untersuchungen die ausgeprägteste Minderung der Nervenleitgeschwindigkeit. [58]

Faktoren, die eine externe Kompression des N. ulnaris bedingen können, finden sich - außer im Rahmen der Genese des Kubitaltunnelsyndroms (s. Kapitel 1.1.4) - für gewöhnlich nicht in der gesunden Bevölkerung, können jedoch vor allem postoperativ nach der osteosynthetischen Versorgung distaler Humerusfrakturen auftreten und unter anderem durch

²⁷Als Messwert war hierbei der Pulsatilitätsindex von A. collateralis ulnaris inferior und A. recurrens ulnaris posterior an 38 gesunden Personen bestimmt worden, dessen Zunahme - verglichen mit den Werten in Neutralstellung des Ellenbogengelenks - einer Reduktion des Blutflusses entspricht.

²⁸Hierfür waren 14 erwachsene Makaken-Affen in drei Gruppen aufgeteilt worden. Nach operativer Freilegung des N. ulnaris wurde der Nerv durch ein Gewicht von 100g komprimiert, einer totalen Ischämie der oberen Extremität durch Aufblasen einer Blutdruckmanschette am proximalen Humerus ausgesetzt oder aber beide Untersuchungen wurden direkt nacheinander an einem Nerv durchgeführt. Als gemeinsames Merkmal war die Nervenleitgeschwindigkeit gemessen worden. [58]

die eingebrachten Implantate, Weichteilschwellung, Hämatombildung und Narbengewebe hervorgerufen werden [54].

Die weiterführenden Ergebnisse von Gelberman et al. [21] wurden bereits im Kapitel 1.3 vorgestellt und lassen vor dem geschilderten Kontext vermuten, dass die intraneurale Druckerhöhung durch Beugebewegungen des Ellenbogengelenks möglicherweise einen Verschluss der zuführenden Gefäße des N. ulnaris bedingen kann. Bestätigung findet diese Theorie in einer Arbeit von Clark et al. [67], die den Einfluss der Dehnung eines Nerven auf dessen Blutfluss anhand von Untersuchungen des N. ischiadicus von 37 Ratten erhoben. Hierbei zeigte sich, dass die Dehnung eines Nerven zu einer deutlichen Reduktion der Blutzufuhr führen kann, die bei Überschreitung einer individuellen Toleranzgrenze zwischen 8 % und 15 % Dehnung auch permanent erhalten bleiben kann [67].

Bei Betrachtung aller aufgeführten Faktoren fällt auf, dass die arterielle Versorgung durch Operationen am distalen Humerus einer besonderen Gefahr der Ischämie ausgesetzt ist. Die physiologischen Voraussetzungen des N. ulnaris bedingen für sich allein betrachtet bereits eine intraneurale Druckerhöhung mit möglicher Minderdurchblutung des Nerven in starker Flexion [21, 35]. Sowohl das eingebrachte Osteosynthesematerial als auch andere komprimierende Faktoren (s. oben) könnten gleichzeitig eine externe Kompression des N. ulnaris sowie eine Reduktion des Blutflusses auf iatrogene Weise induzieren. Im Sinne der Untersuchungen von Ogata et al. [58] lägen postoperativ somit beide Hauptfaktoren vor, die zu einer Reduktion der Nervenleitgeschwindigkeit mit möglichem Ausbleiben einer Regeneration führen können. Darüber hinaus könnte die entsprechende Beeinträchtigung des N. ulnaris nicht nur durch die Flexion des Ellenbogengelenks bedingt sein, sondern bereits in Neutralstellung des Arms - durch eine plattenbedingte Verlängerung des Nervenverlaufs mit Dehnung und Kompression des Nerven - vorliegen.

In der Zusammenschau konnte in den histologischen Schnitten eine reichhaltige extra- und intraneurale Gefäßversorgung nachgewiesen werden, die entsprechend der Literatur durch segmentale Äste der Aa. collaterales ulnares superior et inferior und der A. recurrens ulnaris posterior gespeist wird. Die physiologisch auftretende, intraneurale Druckerhöhung in Flexion des Ellenbogengelenks sowie eine äußere Kompression des Nerven durch Fremdmaterial etc. können einen Einfluss auf die Gefäßversorgung und nachfolgend auf die Nervenleitgeschwindigkeit des N. ulnaris haben, die selbst durch das ausgeprägte, interindividuell angelegte Gefäßsystem nicht kompensiert werden kann. Als Folge kann eine temporäre Ischämie des Nerven mit verzögerter oder ausbleibender Regeneration entstehen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit konnten nachweisen, dass die Anastomosierung der intra- und extraneuralen Gefäße im Bereich des Kubitaltunnels eine geringere Ausprägung zeigte als vermutet und demnach langstreckige Präparationen möglicherweise nicht durch das reichhaltige intraneurale Gefäßnetz kompensiert werden können. Zusammen mit den zitierten Studien legen die Auswertungen somit nahe, dass der N. ulnaris intraoperativ äußerst umsichtig behandelt werden sollte. Sowohl eine verstärkte Dehnung

des Nervs - beispielsweise durch das Einsetzen von Haken oder Ähnlichem - als auch eine langstreckige Devaskularisation können postoperative Funktionsstörungen des N. ulnaris begünstigen. Eine kurzstreckige Freilegung des N. ulnaris kann vermutlich durch die ausgeprägte intraneurale Vaskularisierung kompensiert werden. Ausgiebige Devaskularisationen und Verlagerungen des N. ulnaris sollten selbst bei Unterschreitung der 2,5 Zentimeter-Angabe nach Li et. al [29] bestmöglich vermieden werden. Hierbei besteht die Gefahr einer (temporären) Reduktion der Blutzufuhr sowie eine mögliche Verletzung motorischer Nervenäste.

Gleichzeitig sollte eine Kompression des N. ulnaris durch eine prominente Implantatlage intraoperativ unbedingt ausgeschlossen werden. Vor diesem Hintergrund könnte eine intraoperative, nichtinvasive Messung der Nervenleitgeschwindigkeit sowohl zur Vermeidung von Schäden des N. ulnaris als auch zur Evaluation von intraoperativen Risikofaktoren hilfreich sein. Die postoperative Anlage einer dorsalen Oberarmgipsschiene in 90° Flexion des Ellenbogengelenks sollte mithilfe von Studien näher evaluiert werden, da der Blutfluss in den Blutgefäßen des N. ulnaris durch eine höhergradige Beugung reduziert werden könnte und somit ebenfalls einen Einfluss auf die Regeneration des Nervs haben könnte. Letzten Endes ist eine direkte Kompression des N. ulnaris und seiner Blutgefäße durch den Gips unter allen Umständen zu vermeiden.

4.2 Radiologisch-anatomische Untersuchungen

4.2.1 Diskussion des Versuchsdesigns

Seit der Mitte des 20. Jahrhunderts findet sich eine zunehmende Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten zum anatomischen Verlauf des N. ulnaris und den daraus ableitbaren Erklärungsansätzen ulnarer Neuropathien [8, 25, 68, 69]. Der technische Fortschritt ermöglichte dabei die Erweiterung der durch Präparationen erlangten Erkenntnisse um sonographische und MRT-gestützte Untersuchungsmethoden, die bis heute ein immer detaillierteres Bild des N. ulnaris und seiner verlaufscharakteristischen Umgebungsstrukturen entstehen ließen [7, 20, 62]. Gleichzeitig entwickelte sich ein zunehmendes Interesse am dynamischen Verlauf des Nervs bei Bewegungen des Ellenbogengelenks, dessen Kenntnis zu einer Reduktion iatrogener Störungen des N. ulnaris und zur Aufklärung der Pathogenese des Kubitaltunnelsyndroms beitragen sollte [7, 25, 68]. Obwohl die multifaktorielle Genese des Kubitaltunnelsyndroms mittlerweile weitgehend bekannt ist (s. Kapitel 1.1.4), besteht trotz zahlreicher Studien weiterhin eine unzufrieden stellende Fallzahl an Funktionsstörungen des N. ulnaris nach der operativen Versorgung distaler Humerusfrakturen beim Erwachsenen, die im Durchschnitt mit 13 % angegeben wird [54, 59].

In diesem Sinne sollte die vorliegende Arbeit mit einer neu entwickelten, Röntgenbasierten Untersuchungsmethode weitere Informationen zum dynamischen Verlauf des N. ulnaris erbringen und potenzielle Gefahrenpunkte operativer Techniken im Bereich des Ellenbogengelenks aufzeigen. Das Studiendesign sollte dabei sowohl den physiologischen Zustand als auch die Verhältnisse nach der Implantation einer medialen Humerusplatte abbilden. Diesbezüglich sollte die Lage des N. ulnaris zum Ellenbogengelenk sowie die Bewegung des Nervs in seinem Verlauf zwischen Flexion und Extension des Ellenbogengelenks beurteilt werden. Die entsprechend Entwicklung des fokussierten Untersuchungsverfahrens erforderte zahlreiche Testreihen und regelmäßige Anpassungen, die schließlich ein standardisiertes Untersuchungsverfahren entstehen ließen, dessen Vor- und Nachteile im Folgenden näher diskutiert werden sollen.

Ein großer zeitlicher und personeller Aufwand ergab sich durch die Vorbereitungen zu den nachfolgenden Röntgenuntersuchungen. Die gewählte Fixierung der Körperspender nach Thiel ermöglichte zwar ein wünschenswertes Bewegungsausmaß der Gelenke, erbachte gleichzeitig jedoch deutlich schlechtere Ultraschallbedingungen im Vergleich zur Sonographie am lebenden Objekt. Eine bestmögliche Auflösung des sonographischen Bildes konnte schließlich durch die Verwendung einer Voreinstellung des Ultraschallgeräts erreicht werden. Darüber hinaus erschwerte die häufig vorliegende Atrophie der Nn. ulnares eine sichere Injektion der Pins, sodass eine Vorauswahl der zur Verfügung stehenden Körperspender erfolgen musste. Dabei ist der prä mortal bettlägerige Zustand vieler Körperspender mit nachfolgender Involution der Skelettmuskulatur am ehesten als Ursache der Atrophie der Nn. ulnares zu vermuten.

Für die anschließenden Röntgenuntersuchungen wurde mit Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Thomas Gausepohl ein erfahrener Unfallchirurg hinzugezogen, der sowohl die Einbringung des Fremdmaterials (externes Fixationssystem, Referenzkugeln, K-Draht und Osteosyntheseplatte) als auch die Einstellung der Bildebene des C-Bogens durchführte. Hierdurch konnte ein standardisiertes Vorgehen sichergestellt werden, das eine reproduzierbare Erstellung von Datenmaterial ermöglichte.

Die manuelle Winkeleinstellung der ulnaren Referenzkugel zeigte sich weitestgehend konstant und wich nur für das Untersuchungsobjekt 3 deutlich von den Zielwinkeln ab ($12,1^\circ$). Die maximale Abweichung der ulnaren Winkeleinstellung von zwei verschiedenen Untersuchungsreihen eines Untersuchungsobjekts betrug $8,6^\circ$. Insgesamt ergab sich dadurch eine gute Vergleichbarkeit der prä- und postoperativen Röntgenserien sowie der verschiedenen Untersuchungsreihen eines Untersuchungsobjekts. Um größere Abweichungen - wie die des Untersuchungsobjekts 3 - zu vermeiden sollte in zukünftigen Untersuchungen während der Erstellung des Bildmaterials eine orientierende Kontrolle der ulnaren Winkelbewegung mithilfe einer Winkelmessung am mobilen Bildschirm der Röntgeneinheit vorgenommen werden.

Die abschließende Erstellung des Datenmaterials anhand computerbasierter Bearbeitungen und Auswertungen (Markierungen des eingebrachten Fremdmaterials, automatisierte Auswertungen) erfolgte problemlos und sollte für zukünftige Untersuchungsreihen übernommen werden.

Auswertungen

Unter der Annahme, dass die sonographisch eingebrachten Pins eine festgelegte Position innerhalb des Nervengewebes besitzen und durch Zug oder Druck auf den Nerv nur geringfügig oder überhaupt nicht innerhalb des Gewebes beweglich sind, entspricht die Bewegung eines Pins der Bewegung eines durch den Pin markierten Anteils des N. ulnaris.

Die Markierung mehrerer Bereiche des N. ulnaris stellt dabei kein neuheitliches Verfahren dar, sondern eine bereits 1995 in einer Arbeit von Schuind et al. [22] beschriebene Technik zur dynamischen Beurteilung des N. ulnaris. Hierbei kennzeichneten die Autoren - nach präparatorischer Darstellung und Erhaltung der Strutherschen Arkade und des Kubitaltunnelretinakulums - den N. ulnaris sowie das Kubitaltunnelretinakulum in definierten Abständen mithilfe von äußerlich aufgebrachten, farblichen Markierungen. Anschließend wurden im Verlauf der Beugung des Ellenbogengelenks die Distanzänderungen der Markierungen gemessen und prozentual in Bezug auf die Ausgangsabstände ausgewertet. [22] Der diskutabile Nachteil einer invasiven Präparation des N. ulnaris konnte in dem nun vorgelegten Studiendesign durch die röntgenologische Darstellung minimalinvasiv injizierter Pins vermieden werden und entspricht somit am ehesten den physiologischen Gegebenheiten. Darüber hinaus ermöglichte die zusätzliche Einbringung der Referenzkugeln die Bestimmung der kreisähnlichen Bewegungsausmaße sowie der Distanzänderungen zwischen einzelnen Strukturen.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Beurteilung der dynamischen Bewegung des N. ulnaris anhand des Bewegungsausmaßes der einzelnen Pins sowie durch die Ermittlung der Distanz einzelner Pins zum Drehzentrum. Bis auf wenige Ausnahmen zeigten die Ergebnisse für die Pins aller Untersuchungsobjekte eine homogene Bewegungstendenz, die jedoch häufig eine interindividuelle Ausprägung aufwies. Dabei konnte die Annäherung an das Drehzentrum anhand der festgelegten Ebene der Röntgenaufnahmen als Bewegung des N. ulnaris nach anterior - und somit in Richtung des Kubitaltunnelbodens - ausgewertet werden. Eine Medialisierung des N. ulnaris konnte durch die zweidimensionale Abbildung des Nervs nicht ermittelt werden und sollte in zukünftigen Untersuchungen durch eine Bildgebung im anterior-posterioren Strahlengang zusätzlich ermittelt werden. Außerdem sollte die Distanz der einzelnen Pins zum Drehzentrum in weiteren Untersuchungsreihen nicht in Bezug auf das Drehzentrum sondern in Bezug auf eine festgelegte, beugeseitige Ebene ermittelt werden, sodass hierdurch eine Bewegung der Pins nach ventral ausgewertet werden könnte. Dies könnte die aufwendigen Auswertungen vermeiden, die bei Überschreitungen der Drehachse im zweidimensionalen Bild entstanden.

Die Daten zum Bewegungsausmaß einzelner Pins konnten vor allem als Vergleich der Bewegungsdynamik im prä- und postoperativen Zustand sowie der prä- und postkubitalen Anteile des N. ulnaris interpretiert werden.

Die Erhebung der Abstände zwischen den einzelnen Pins eines Untersuchungsobjekts erfolgte durch die Messung des direkten, linearen Abstands in Pixeln und eine anschließende Transformation in metrische Maße.²⁹ Vor dem Hintergrund der nachfolgend diskutierten Theorien zur Bewegungsdynamik des N. ulnaris sollten die linearen Pin-Abstände einen Hinweis auf das Dehnungsverhalten des Nervs geben, indem eine Zunahme der Distanz als Dehnung und eine Abnahme der Distanz als Stauchung des Nervs interpretiert werden sollte. Die Daten der linearen Abstände zeigten jedoch eine hochvariable Ausprägung, die trotz der standardisierten Versuchsdurchführung und den detaillierten Auswertungen keine Interpretation zuließen. Beispielfhaft fanden sich für die präoperativen Untersuchungen Distanzänderungen von -7,54 mm (entsprechend einer Annäherung von Pin 2 und Pin 3 im UO 3) bis zu +4,93 mm (entsprechend einer Distanzierung von Pin 2 und 3 im UO 4), bzw. -7,54 mm (entsprechend einer Annäherung von Pin 2 und 3 im UO 3) bis zu +6,93 mm (entsprechend einer Distanzierung von Pin 1 und 2 im UO 1) postoperativ.

Für weitere Versuche nach dem Prinzip des vorgelegten Studiendesigns sollte versuchsweise eine deutlich größere Anzahl an kürzeren Pins (Länge ca. 25 mm) in den N. ulnaris eingebracht werden, sodass die linearen Abstände in kleineren Intervallen gemessen werden können. Hierdurch könnte eine genauere Bestimmung des Dehnungsverhaltens erfolgen und durch eine sorgfältige Dokumentation der Pin-Lage in Bezug auf den Kubitaltunnel mögliche Unterschiede im Dehnungsverhalten des N. ulnaris (s. Diskussion unten) nachweisen. Darüber hinaus würde eine höhere Anzahl injizierter Pins ein detaillierteres Bild der Lage des N. ulnaris in den einzelnen Röntgenbildern ermöglichen.

²⁹Eine alternative Messung des Pin-Abstands in Winkelgraden konnte nicht erfolgen, da die multidirektionale Bewegung der verschiedenen Pins nicht mithilfe einer gleichförmigen Kreisbahn beschrieben werden konnte und eine Berechnung demnach unzulässig gewesen wäre.

Der Vergleich der Rotationsstellungen des Unterarms (Pronation, Supination und Neutralstellung) erbrachte bei den Auswertungen der vorgelegten Studie in Bezug auf das Bewegungsausmaß und die Annäherung an das Drehzentrum nur geringe Unterschiede. Vor dem Hintergrund nachgewiesener Einflüsse der Armhaltung auf die Leitfähigkeit des N. ulnaris [70] und aufgrund der geringen Datenlage sollten zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden um einen dennoch vorhandenen Einfluss der Rotationsbewegung des Unterarms auf den N. ulnaris zu evaluieren.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das vorgelegte Untersuchungsverfahren - vor allem nach sorgfältigen Vorbereitungen und in Kombination mit einer detailreichen Dokumentation der einzelnen Versuchsschritte - eine gute qualitative Aussage über das Bewegungsverhalten des N. ulnaris und die operativ bedingten Veränderungen dessen ermöglicht. Um eine zusätzliche Aussage über das Dehnungsverhalten des N. ulnaris treffen zu können, müsste eine Anpassung der Untersuchungsvorbereitungen nach dem oben beschriebenen Beispiel erfolgen. Die Interpretation der Ergebnisse ist somit als erster Versuch einer innovativen und minimalinvasiven Untersuchungstechnik zu verstehen, deren erste Durchführung bereits weiterführende Erkenntnisse zum Verständnis der Bewegungsdynamik des N. ulnaris liefern konnte. Zukünftige Untersuchungen im Sinne des vorgelegten Studiendesigns sollten eine größere Anzahl an Untersuchungsobjekten verwenden um die vorliegenden Ergebnisse zu quantifizieren.

4.2.2 Das physiologische Bewegungsverhalten des N. ulnaris

In den vorliegenden Untersuchungen konnte in Bezug auf die humeralen Referenzkugeln für die Pins aller Untersuchungsobjekte eine kontinuierliche Veränderung der Pinlage nachgewiesen werden, die sich in einer kreisähnlichen Bewegung um das Ellenbogengelenk abbildet und bei 10 von 12 ausgewerteten Pins mit einer Annäherung des N. ulnaris an das Drehzentrum einhergeht. Der als Bewegungsausmaß definierte Betrag der Differenz der Winkelpositionen einzelner Pins zwischen Start- und Endstellung variierte in den präoperativen Serien zwischen $14,6^\circ$ und $127,7^\circ$ (UO 2 ausgenommen, s. Ergebnisteil). Die Annäherung an das Drehzentrum ergab präoperative Werte zwischen 1,9 mm und 15,2 mm.³⁰

Für den N. ulnaris ergibt sich aufgrund des streckseitigen Verlaufs in der Flexionsbewegung physiologischerweise eine größere Strecke zwischen seinem Ursprung aus dem Plexus brachialis und der endgültigen Innervation der Hohlhandmuskulatur. Vor diesem Hintergrund lassen die oben genannten Veränderungen der Pinposition - und somit des N. ulnaris - darauf schließen, dass der Nerv mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks eine Anpassung an den verlängerten Verlauf erfährt. Die entsprechenden Anpassungsmechanismen wurden bereits im Kapitel 1.3 aufgeführt und sollen im Folgenden anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und vor dem angenommenen Hintergrund einer Längenreserve, einer Dehnung sowie einer anterioren bzw. medialen Bewegung des Nervs durch Beugung des Ellenbogengelenks diskutiert werden.

³⁰Ausgenommen sind an dieser Stelle die Daten des dritten Pins von UO 2 und des dritten Pins von UO 4. Diese werden im Verlauf dieses Kapitels näher diskutiert.

Längenreserve

Die Auswertungen der Winkelbewegung ergaben für alle Pins zwischen 0° und 135° Beugung eine kontinuierliche Zunahme der Winkelposition von bis zu 127,7° (UO 2 ausgenommen). Es lässt sich somit schlussfolgern, dass durch die Flexion des Ellenbogengelenks eine relative Änderung der Lage zwischen Nerv und Humerus entsteht, die aufgrund der starren Fixierung des Humerus im externen Fixateur auf eine Bewegung des N. ulnaris zurückzuführen ist. Diese Relativbewegung orientiert sich an der kreisähnlichen Bewegung der Ulna um den distalen Humerus und verläuft von der Streckseite in Richtung der Beugeseite des Humerus. Besonders ausgeprägt zeigt sich die Relativbewegung in den präoperativen Röntgenserien des Untersuchungsobjekts 4 (Abb. 4.1).

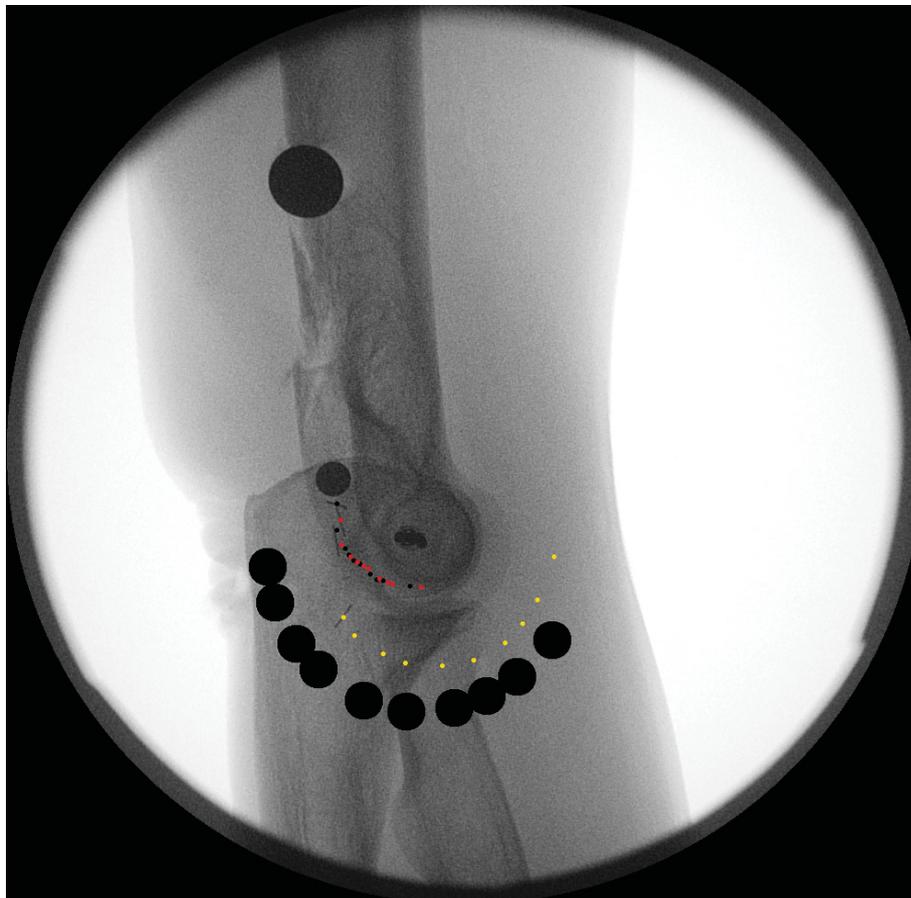


Abb. 4.1: Relativbewegung des N. ulnaris. Darstellung des Verlaufs der Pin-Mittelpunkte des Untersuchungsobjekts 4 zwischen 0° und 135° Beugung anhand eines Röntgenbilds im präoperativen Zustand. Vor allem der dritte Pin orientiert sich stark am Verlauf der ulnaren Referenzkugel.

Gleichzeitig verdeutlicht die Abbildung 4.1 in Zusammenschau mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, dass das Bewegungsverhalten der Pins in Abhängigkeit von ihrer Startposition eine unterschiedliche Ausprägung zeigt, die vor allem zwischen den proximal und distal des Kubitaltunnels eingebrachten Pins große Unterschiede aufweist. Beispielsweise ist das präoperative Winkelbewegungsausmaß des distalen Pins von Untersuchungsobjekt 1 im Vergleich zum proximalen Pin desselben Untersuchungsobjekts um einen Faktor

von 3,43 erhöht. Für die anderen präoperativen Untersuchungsserien ergeben sich Erhöhungen des Bewegungsausmaßes um den Faktor 1,14 (Pin 1 und 3 von UO 2), 1,33 (Pin 2 und 4 von UO 3) bzw. 1,38 (Pin 1 und 3 von UO 4). Auf den Verlauf des N. ulnaris übertragen ergibt sich hieraus eine größere Relativbewegung distal des Kubitaltunnels gelegener Anteile des Nervs im Vergleich zu proximalen Anteilen.

Diese Auswertung deckt sich mit den im Kapitel 1.3 vorgestellten Ergebnissen von Schuind et al. [22] und Patel et al. [24], die nachwiesen, dass der N. ulnaris in Streckung des Ellenbogengelenks proximal des Kubitaltunnels aufgelockert vorliegt und in Beugung zunehmend gestreckt wird.

In gemeinsamer Betrachtung dieser Ergebnisse ergibt sich die Hypothese, dass die postkubitalen - und ggf. auch im Kubitaltunnel gelegenen - Anteile des N. ulnaris bereits in geringer Flexion mit einer Relativbewegung um den Humerus beginnen während die präkubitalen Anteile des N. ulnaris zunächst eine mehrdimensionale - und dadurch vor allem initial langsamere - Bewegung um den Humerus vollziehen.

Weitere Bestätigung findet diese Hypothese bei der näheren Betrachtung des dritten Untersuchungsobjekts der vorliegenden Studie: die in endgradiger Beugung und mit einigem Abstand zueinander eingebrachten, proximalen Pins 2 und 3 stellen sich auf den Röntgenbildern in Streckung mit nahezu gleicher Lokalisation zueinander dar. Dabei ist diese Beobachtung am ehesten durch ein „Zusammenschieben“ oder „Auflockern“ der proximalen Anteile des N. ulnaris in Extension des Ellenbogengelenks zurückzuführen. Eine mögliche Darstellung einer solchen proximalen Längenreserve zeigt die Abbildung 4.2.

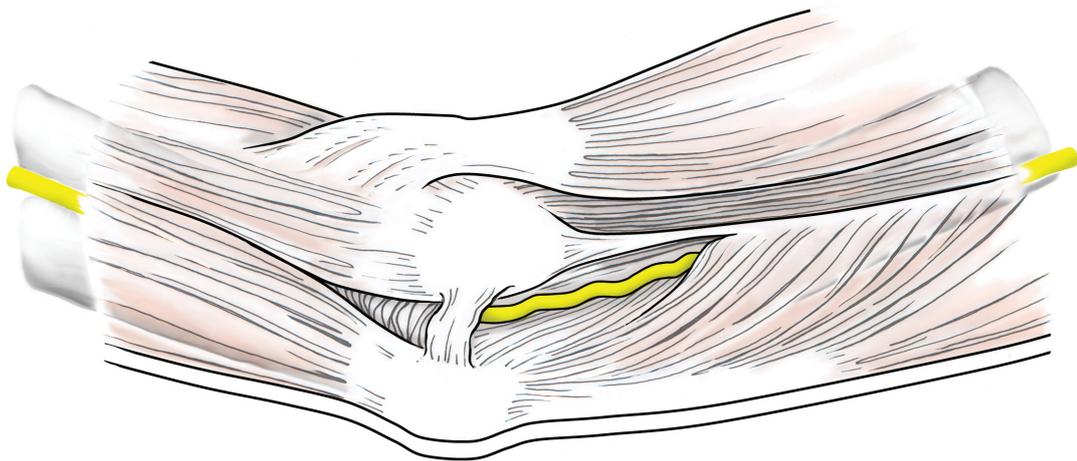


Abb. 4.2: Längenreserve des N. ulnaris. Mögliche Darstellung einer Längenreserve des N. ulnaris proximal des Kubitaltunnels. Zeichnung: Frau Christine Opfermann der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Erklärend führen einige Autoren die zugrundeliegende Anatomie des N. ulnaris an, der im Bereich des Kubitaltunnels drei bis vier Äste zur motorischen Innervation des M. flexor carpi ulnaris sowie des ulnaren Anteils des M. flexor digitorum profundus abgibt [1].

Dementsprechend ist zu vermuten, dass die motorischen Äste - im Gegensatz zur fehlenden Innervation am Oberarm [7] - eine Relativbewegung des N. ulnaris gegen das von ihm innervierte Muskelgewebe im Unterarms größtenteils limitieren [22].

Eine Bestätigung dieser Theorie liefern die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit anhand der Abbildung 4.1 des Untersuchungsobjekts 4: der dritte Pin (hier mit extrem distaler, intraneuraler Lage im Bereich des Unterarms) erfährt durch die Beugung im Ellenbogengelenk nur eine geringe Lageänderung in Bezug auf die ulnare Referenzkugel. Schlussfolgernd scheint eine relative Bewegung des N. ulnaris gegen sein umgebendes Gewebe im Unterarm - zumindest in dem vorgelegten Beispiel - nur in geringem Ausmaß möglich zu sein.

Zusammenfassend ergibt sich für den N. ulnaris in Bezug auf den Humerus eine Relativbewegung, die proximal des Kubitaltunnels eine geringere Ausprägung aufweist. Eine diesbezügliche Erklärung könnte eine proximale Längenreserve des N. ulnaris liefern, die in Streckstellung des Ellenbogengelenks als aufgelockerter Nervenverlauf erkennbar ist und unter Beugung des Gelenks zunehmend aufgehoben wird um eine Anpassung an den verlängerten Nervenverlauf zu ermöglichen. Grundsätzlich ist zu vermuten, dass physiologische Anpassungsmechanismen im Bereich des Unterarms aufgrund der zahlreichen, lokalen Innervationen begrenzt sind.

Dehnung

Als weiterer Anpassungsmechanismus des N. ulnaris an die Flexionsbewegung des Ellenbogengelenks muss neben einer Längenreserve des Nerven auch eine Dehnung des Nervengewebes diskutiert werden. Diesbezügliche Hinweise erbrachte die bereits im Kapitel 1.3 vorgestellte Arbeit von Gelberman et al. [21]. Darüber hinaus wiesen die präparatorischen Arbeiten von Schuind et al. [22] und Apfelberg et al. [7] ebenfalls eine Dehnung des N. ulnaris nach. In Bezug auf beide Arbeiten muss jedoch angemerkt werden, dass die Autoren keine Differenzierung zwischen einer Längenreserve und einer Dehnung vornahmen. Weiterhin wurde die von Apfelberg et al. [7] nachgewiesene Dehnung ohne eine Angabe des entsprechenden Beugewinkels im Ellenbogengelenk ausgewertet und ist somit nur eingeschränkt zu interpretieren.

Die aktuellsten Ergebnisse zum Dehnungsverhalten des N. ulnaris liefern die Autoren James et al. [71]. Sie fanden in einer präparatorischen Arbeit an zehn oberen Körperspenderextremitäten eine Dehnung des N. ulnaris, die sich erst ab einer Beugung des Ellenbogengelenks von 90° ausbildete. Signifikante Unterschiede zwischen Anteilen des N. ulnaris mit proximaler oder distaler Lage zum Kubitaltunnel - wie sie durch Schuind et al. [22] beschrieben wurden - konnten nicht nachgewiesen werden. [71]

Obwohl in der vorliegenden Arbeit von einer Interpretation der linearen Abstände abgesehen wurde, bestätigen die Ergebnisse des Bewegungsausmaßes, dass eine unterschiedliche Ausprägung der Relativbewegung proximaler und distaler Anteile des N. ulnaris vorliegt. Diese Unterschiede könnten sowohl durch eine Dehnung des Nervengewebes als auch durch eine proximale Längenreserve des N. ulnaris hervorgerufen werden.

Vor diesem Hintergrund vermuteten Schuind et al. [22], dass die verkürzten Nervenfasern in Streckung des Ellenbogengelenks nachgewiesen werden könnten. Diesbezügliche Ergebnisse liegen zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor. Demnach könnte eine detaillierte, histologische Studie zur geweblichen Zusammensetzung verschiedener Anteile des N. ulnaris an Ober- und Unterarm nicht nur den indirekten Nachweis einer Dehnungsfähigkeit erbringen sondern gleichzeitig einen Vergleich der einzelnen Anteile des Nervs im Hinblick auf seine Dehnungsfähigkeit vornehmen.

Zusammenfassend konnte die vorliegende Arbeit aufgrund der reduzierten Interpretierbarkeit der entsprechenden Teilergebnisse keinen direkten Nachweis einer Dehnung des N. ulnaris erbringen. Die soeben diskutierten Arbeiten weisen jedoch nach, dass die Beugung des Ellenbogengelenks eine Längenänderung im Sinne einer Dehnung des N. ulnaris induziert. Dieser Prozess ist als Anpassungsmechanismus des Nervs an den verlängerten, streckseitigen Verlauf in Beugung zu verstehen und wurde in zwei verschiedenen Arbeiten ab einer Beugung von 90° beschrieben [22, 71]. Diesbezüglich bleibt zu diskutieren, ob das Dehnungsverhalten auf einen Bereich proximal des Kubitaltunnels fokussiert ist oder ob es gleichmäßig über den Nerv verteilt ist. Die vorliegende Arbeit deutet schließlich darauf hin, dass Unterschiede in der Bewegungsdynamik proximaler und distaler Anteile des N. ulnaris bestehen, die jedoch sowohl auf eine proximale Längenreserve als auch auf eine Dehnung des Nervs zurückzuführen sein könnten. Die Abbildung 4.3 soll die Dehnungsfähigkeit des N. ulnaris beispielhaft darstellen.

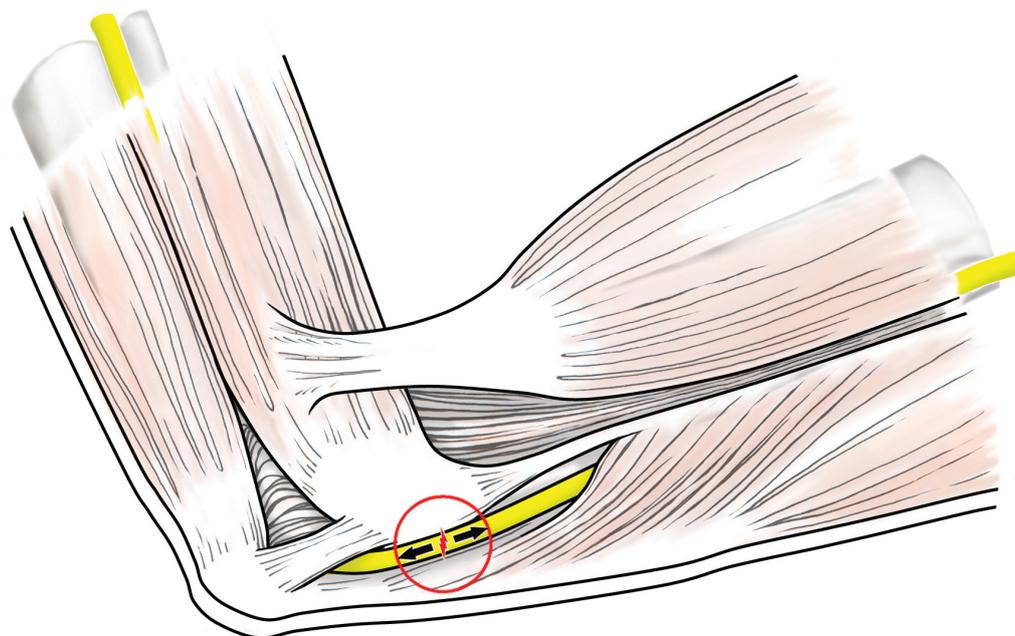


Abb. 4.3: Dehnungsfähigkeit des N. ulnaris. Mögliche Darstellung einer Dehnungsfähigkeit des N. ulnaris im Bereich proximal des Kubitaltunnels. Zeichnung: Frau Christine Opfermann der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Ventralbewegung

Eine Bewegung des N. ulnaris nach anterior stellt im Sinne einer Verkürzung des Bewegungsradius um das Ellenbogengelenk einen nachvollziehbaren Anpassungsmechanismus des Nervs dar. Zahlreiche Studien zur Dynamik des N. ulnaris beschreiben eine Bewegung des Nervs nach anterior [24], anteromedial [20, 61, 63] oder medial [60]. Obwohl alle genannten Arbeiten nachvollziehbare Ergebnisse vorlegen ist die große Varianz selbst unter der Annahme einer interindividuellen Variabilität unzufrieden stellend. Unklar ist weiterhin, ob der N. ulnaris mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks eine Ventralisierung erfährt oder im Sinne einer (Sub-)Luxation entlang des Epicondylus medialis humeri nach medial bewegt wird [60, 61].

Vor diesem Hintergrund wurde für die vorliegende Arbeit die Annäherung der Pins an das Drehzentrum - und somit die anteriore Bewegung des N. ulnaris (oder auch *anteriores Shifting*) - bei allen Untersuchungsobjekten nachgewiesen. Die Ausprägung der anterioren Bewegung schien dabei interindividuell variabel zu sein und wies Werte zwischen 1,9 mm und 15,2 mm auf. Lediglich der dritte Pin des Untersuchungsobjekts 2 und Untersuchungsobjekts 3 befanden sich in 135° Beugung weiter vom Drehzentrum entfernt als in Nullstellung des Ellenbogengelenks

Die ausgeprägte Distanzierung des dritten Pins von Untersuchungsobjekt 2 vom Drehzentrum in endgradiger Beugung ist aufgrund der unerwünschten Mitbewegung des Humerus zu vernachlässigen. Dahingegen kommt es beim dritten Pin des Untersuchungsobjekts 4 zu einem ausgeprägten Bewegungsausmaß mit einer Distanzierung vom Drehzentrum von 4,3 mm. Diese Einzelbeobachtung betrifft den am weitesten distal eingebrachten Pin aller Untersuchungsreihen. Dessen Bewegung orientiert sich stark an der ulnaren Referenzkugel und somit an der ulnaren Bewegung um das humeroulnare Gelenk herum. Bei näherer Betrachtung ergibt sich auch für die ulnare Referenzkugel eine Distanzierung vom Drehzentrum, die am ehesten auf eine ungleichförmige Bewegung im humeroulnaren Gelenk zurückzuführen ist und somit auch den ungewöhnlichen Verlauf des N. ulnaris bedingen könnte. Welchen Einfluss die ungleichförmige Bewegung des humeroulnaren Gelenks auf den N. ulnaris hat, bleibt zunächst unklar.

Die in der Literatur erwähnte Medialisierung des N. ulnaris entlang des Epicondylus medialis humeri [60] wurde wie oben erwähnt in der vorliegenden Arbeit nicht ermittelt. Grundsätzlich wäre jedoch eine Kombination der beiden Bewegungsrichtungen als anteromediale Bewegung [20, 61, 63] denkbar, die vor allem durch einen flachen Kubitaltunnel bedingt sein könnte [71]. Ausgeprägte Bewegungen des Nervs könnten schließlich zu einer (Sub-)Luxation über den Epicondylus medialis humeri hinaus führen [61] und durch eine regelhaft in Beugung stattfindende Friktion an der Entstehung ulnarer Neuropathien beteiligt sein [7, 60–62].³¹ Auf der anderen Seite wird ein tief ausgebildeter Kubitaltunnel

³¹Es sollte bedacht werden, dass der N. ulnaris physiologischerweise durch das Kubitaltunnelretinakulum vor einer Luxation geschützt wird. Anatomische Varianten und davon unabhängige Luxationen des Nervs sind jedoch in der Literatur beschrieben [60].

als prädisponierender Faktor für eine Kompression des N. ulnaris in starker Beugung diskutiert [60].

Im Zusammenhang mit der anteromedialen Bewegungen sowie der Dehnung des N. ulnaris wird in der Literatur eine physiologische Abflachung des Nervs im Zuge der Beugung beschrieben, die entweder auf eine Kompression des N. ulnaris gegen den Kubitaltunnelboden/Epicondylus medialis humeri oder eine zugkraftbedingte Verformung des Nervs zurückgeführt werden kann [20, 21, 24, 60, 63]. Die vorliegende Studie kann diesbezüglich keine Aussage treffen, da hierfür entweder weichteilabbildende Verfahren oder präparatorische Untersuchungen durchgeführt werden müssen. Somit kann die Abflachung des N. ulnaris an dieser Stelle nur als häufig beschriebene, morphologische Veränderung erwähnt werden, die jedoch nicht mit dem vorliegenden Untersuchungsverfahren erhoben wurde.

Schlussfolgernd ergibt sich im Zuge der Flexion des Ellenbogengelenks eine Ventralbewegung des N. ulnaris in Richtung des Kubitaltunnelbodens, die sowohl in der Literatur als auch durch die vorliegende Arbeit bestätigt werden konnte (Abb. 4.4). Eine Medialisierung des Nervenverlaufs sowie eine Abflachung des N. ulnaris mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks stellen zusätzlich vorliegende Anpassungsmechanismen des Nervs dar, die jedoch mithilfe des vorgelegten Studiendesigns nicht untersucht werden konnten. Darüber hinaus besitzen die Unterschiede in der Morphologie des Kubitaltunnels sowie des Kubitaltunnelretinakulums vermutlich einen individuell ausgeprägten Einfluss auf die Anpassungsmechanismen des N. ulnaris [20, 60, 71].

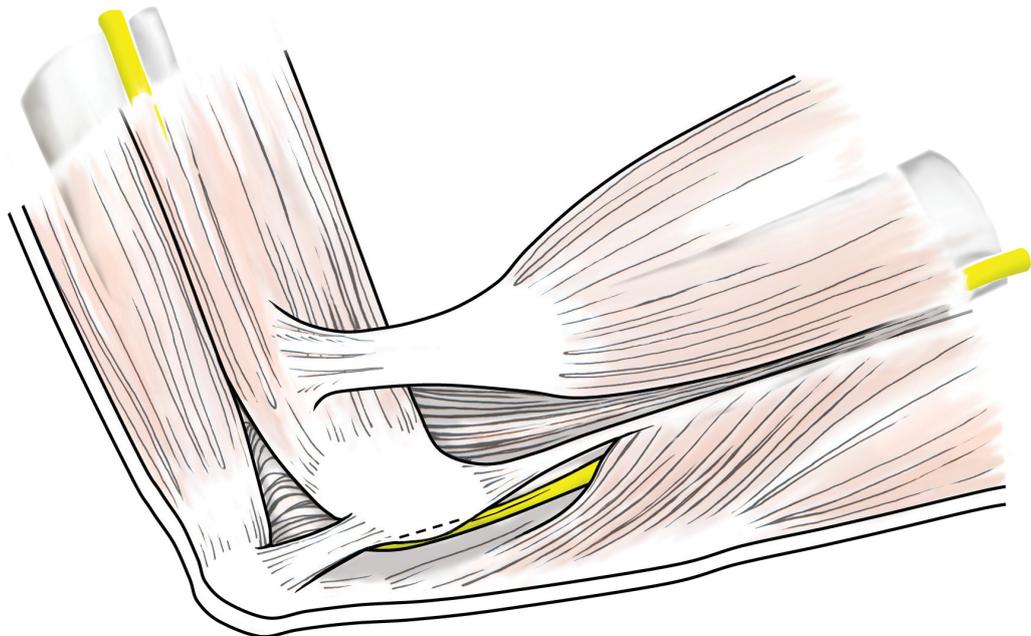


Abb. 4.4: Ventralbewegung des N. ulnaris. Mögliche Darstellung einer Ventralbewegung des N. ulnaris im Bereich proximal des Kubitaltunnels. Zeichnung: Frau Christine Opfermann der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

4.2.3 Das postoperative Bewegungsverhalten des N. ulnaris

Zur Evaluation des mechanischen Einflusses von Fremdmaterial auf den Verlauf des N. ulnaris war jeweils eine anatomischen Osteosyntheseplatte am distalen Humerus appliziert und eine erneute Röntgenserie nach dem präoperativen Protokoll durchgeführt worden. Zusammenfassend war dabei eine dorsale Hauteröffnung und Präparation sowie - unter Belassung der Strutherschen Arkade - eine laterale Inzision des Kubitaltunnelretinakulums mit Mobilisation des N. ulnaris aus seinem Bett im Kubitaltunnel durchgeführt worden. Nach der Implantation war das Kubitaltunnelretinakulum seitlich über dem Nerv mit Nähten verschlossen und die eröffneten Gewebsschichten vernäht worden.

Die einzelnen Teilergebnisse des postoperativen Bewegungsausmaßes und der postoperativen Distanzen zum Drehzentrum sollen im Folgenden separat interpretiert und in einem abschließenden Abschnitt zusammen mit den präoperativen Ergebnissen vor dem chirurgischen Hintergrund der vorliegenden Arbeit diskutiert werden.

Bewegungsausmaß

In drei von vier Untersuchungsobjekten zeigte sich im Vergleich zu den präoperativen Röntgenserien bei allen Pins eine postoperative Reduktion des Winkelbewegungsausmaßes. Diese Reduktion ergab Werte zwischen $-2,3^\circ$ und $-50,6^\circ$ und begründete sich sowohl durch eine distalere Startposition als auch durch eine proximalere Endposition der Pins. Die Übertragung der Ergebnisse auf den postoperativen Verlauf des N. ulnaris bestätigt, dass die Einbringung von Fremdmaterial am distalen Humerus bereits in Streckung des Ellenbogengelenks zu einer Lageänderung des Nervs führt. Einerseits könnte dies durch den direkten mechanischen Einfluss des Fremdmaterials begründet sein, der den Nerv aus seinem ursprünglichen Verlauf verdrängt. Andererseits sind (distale) Anteile des N. ulnaris, die nicht in direktem Kontakt mit der Humerusplatte stehen, ebenfalls von der postoperativen Lageveränderung betroffen. Somit induziert die Humerusplatte nicht nur an möglichen Kontaktpunkten mit dem N. ulnaris eine Lageveränderung, sondern erzeugt ebenfalls in plattenfernen Anteilen des Nervs eine Veränderung der Bewegungsdynamik. Ursächlich könnte in diesem Sinne sowohl eine Einschränkung der Längenreserve als auch eine Reduktion der physiologischen Dehnungsreserve des Nervs aufgrund des - durch das Fremdmaterial induzierten - verlängerten Nervenverlaufs vorliegen.

Gleichzeitig könnte diskutiert werden, dass die veränderte Lage des Nervs lediglich aufgrund der langstreckigen Präparation und Mobilisation des N. ulnaris hervorgerufen wird. Hierbei wäre jedoch zu erwarten, dass sowohl die Startposition der Pins als auch ihre Endposition in die gleiche Richtung (proximal oder distal) verändert wäre. Dahingegen zeigen die vorgelegten Ergebnisse, dass es sich um eine Annäherung von Start- und Endposition handelt, die letzten Endes eine Verringerung des Bewegungsausmaßes bedingt und die Theorie einer - lediglich durch die Präparation bedingten - Lageveränderung nicht bestätigt werden kann.

Die Ergebnisse des Untersuchungsobjekts 1 zeigen entgegen den oben diskutierten Auswertungen der Untersuchungsobjekte 2 bis 4 ein verändertes postoperatives Bewegungsmuster, das durch eine Erhöhung des postoperativen Bewegungsausmaßes aller Pins charakterisiert ist und Werte zwischen $+4,1^\circ$ und $+9,9^\circ$ aufweist. Eine Interpretation der Ergebnisse erscheint vor dem Hintergrund der homogenen Beobachtungen bei den anderen Untersuchungsobjekten erschwert. Auf der einen Seite kann eine insuffiziente Naht des Kubitaltunnelretinakulums oder eine anderweitige, iatrogene Abweichung vom Operationsstandard als Ursache diskutiert werden. Andererseits könnten die Ergebnisse im Rahmen einer hohen interindividuellen Variabilität der Anatomie des N. ulnaris aufgefasst werden, die sich in diesem Fall möglicherweise als übermäßige, postoperative Dehnung oder als bereits in Extension ausgeschöpfte Längenreserve des Nervs darstellt. Der Nachweis des präoperativ geringsten Winkelbewegungsausmaßes sowie der präoperativ größten Annäherung an das Drehzentrum durch das Untersuchungsobjekt 1 scheinen diese Theorie zu unterstützen. Die Zusammenschau dieser Auswertungen lässt vermuten, dass für das Untersuchungsobjekt 1 eine individuelle Betonung der physiologischen Anpassungsmechanismen besteht, die nicht dem Bewegungsmuster der anderen Untersuchungsobjekte entspricht.

Die präoperativ festgestellten Unterschiede des Bewegungsausmaßes zwischen den proximal und distal des Kubitaltunnels gelegenen Anteilen des N. ulnaris bestanden auch nach der Plattenimplantation, zeigten jedoch mitunter starke Abweichungen von den präoperativen Unterschieden. Für einige Untersuchungsobjekte vergrößerte sich die Differenz zwischen den proximalen und distalen Anteilen des N. ulnaris, bei anderen verringerte sie sich. Aus diesem Grund ist auch an dieser Stelle ein Einfluss der individuell ausgeprägten Anatomie einzelner Untersuchungsobjekte mit variablen Bewegungsmustern zu vermuten.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Implantation einer distalen Humerusplatte bei drei von vier Untersuchungsobjekten eine Verringerung des Bewegungsausmaßes induzierte und somit die Relativbewegung des N. ulnaris gegen den Humerus einschränken kann. Ursächlich sind sowohl eine Verringerung der Längenreserve als auch eine damit einhergehende „Vorspannung“ des Nervs zu vermuten. Die Abweichungen des ersten Untersuchungsobjekts sowie der proximal-distalen Unterschiede könnten einerseits untersucherbedingt und andererseits durch die individuelle Ausprägung einzelner Anpassungsmechanismen begründet sein.

Annäherung an das Drehzentrum

Analog zu den präoperativen Röntgenserien konnte nach der Implantation einer distalen Humerusplatte - bis auf eine Ausnahme (Pin 3 des Untersuchungsobjekts 4) - für alle Pins eine Annäherung an das Drehzentrum nachgewiesen werden. Acht von 12 Pins waren bereits in postoperativer Startposition weiter vom Drehzentrum entfernt als präoperativ; sieben von 12 in endgradiger Beugung. Die Unterschiede zwischen den prä- und postoperativen Röntgenserien betragen dabei bis zu 4,1 mm (Pin 3 des Untersuchungsobjekts 2). Gleichzeitig ergab sich für einige Pins eine nahezu unveränderte oder näher am Drehzentrum gelegene Start- oder Endposition im Vergleich der prä- und postoperativen Daten.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass der N. ulnaris auch nach der Implantation einer distalen Humerusplatte in der Lage ist durch eine Flexionsbewegung nach anterior verlagert zu werden. Dabei findet sich ein variabler Einfluss auf die Ventralbewegung, die sowohl eine stärkere Ausprägung als auch in der Mehrzahl der Untersuchungen ein geringeres Ausmaß aufweisen kann.

In diesem Sinne könnte eine postoperative Vergrößerung der Distanz des N. ulnaris zum Drehzentrum auf die Interposition der Osteosyntheseplatte zurückzuführen sein, welche zwischen Nerv und Knochen zum Liegen kommt (s. 2.13). Auf der anderen Seite ist die postoperative Annäherung eines Pins an das Drehzentrum möglicherweise durch eine postoperativ erhöhte Vordehnung des Nervs mit einer nachfolgend verstärkten Bewegung nach anteriorer zu erklären. Die beiden dargelegten Erklärungsansätze sind vor dem Hintergrund der variablen Ergebnisse lediglich als Interpretationsversuch der komplexen Anatomie des N. ulnaris zu verstehen. Zukünftige Untersuchungen nach dem verwendeten Studiendesign sollten während der Präparation des N. ulnaris eine detaillierte Dokumentation der individuellen Anatomie des jeweiligen Untersuchungsobjekts vornehmen, um eine individuelle Einordnung der teils inhomogenen Ergebnisse durchführen zu können.

In der Zusammenschau zeigte sich auch nach der Implantation einer Osteosyntheseplatte am distalen, medialen Humerus mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks eine anteriore Bewegung des N. ulnaris. Diese wies im Vergleich zu den präoperativen Röntgenserien unter anderem deutliche Veränderungen mit variabler Ausprägung auf. Wie bereits in Bezug auf das postoperative Bewegungsausmaß diskutiert wurde sind die variablen Ergebnisse am ehesten im Rahmen einer individuellen Ausprägung der Anpassungsmechanismen zu verstehen. Um eine adäquate Diskussion dieser Daten zu gewährleisten, sind weitere Untersuchungen mit dem Fokus auf den individuellen, anatomischen Gegebenheiten erforderlich.

4.2.4 Übertragung auf die chirurgische Praxis

In der vorliegenden Arbeit wurde nachgewiesen, dass die mediale Plattenimplantation am distalen Humerus eine Reduktion der physiologischerweise bestehenden Relativbewegung des N. ulnaris gegen den Humerus hervorrufen kann und somit entweder eine Einschränkung der Längenreserve oder eine „Vorspannung“ des Nerv in Streckstellung - mit einer Reduktion der Dehnungsfähigkeit in Beugung - bedingt. Eine kombinierte Einschränkung beider Anpassungsmechanismen ist dabei am ehesten zu vermuten. Mehreren Studien zufolge kann die Dehnung des N. ulnaris bei gesunden Probanden bzw. nicht voroperierten Körperspendern erst ab einer Beugung von 90° nachgewiesen werden [21, 24, 71].

Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf den postoperativen Zustand scheint jedoch anhand der vorliegenden Auswertungen unzulässig, sodass nach der Implantation der Osteosyntheseplatte bereits in geringer Beugung des Ellenbogengelenks die Einwirkung von Zugkräften auf den N. ulnaris zu erwarten ist. Diesbezüglich wiesen Wall et al. [72] durch Untersuchungen an Kaninchen nach, dass die Einwirkung von Zugkräften an peripheren Nerven zu einer Reduktion der neuralen Leitungsamplitude führt und darüber hinaus in Abhängigkeit von der Größe der Zugkräfte irreversibel sein kann. Zusätzlich zur Amplitu-

denreduktion erzeugt die Dehnung peripherer Nerven eine mitunter deutliche Verminderung des neuralen Blutflusses [67].

Folglich ist zu vermuten, dass sowohl die Anlage eines Gipsverbands in 45° Beugung des Ellenbogengelenks [21, 71] als auch die postoperative Beübung des Ellenbogengelenks zu einer Überstrapazierung der physiologischen Anpassungsmechanismen des N. ulnaris führen können. Dabei scheint die Manifestation ulnarer Funktionsstörungen nicht unmittelbar postoperativ aufzutreten, sodass zum Zeitpunkt einer manifesten Symptomatik bereits eine fortgeschrittene Schädigung des Nervengewebes vorliegen kann [70, 73]. Gleichzeitig könnte die verzögerte, postoperative Manifestation ulnarer Funktionsstörungen auf eine im Rahmen des Initialtraumas entstandene Verletzung des Nervs zurückgeführt werden. Schlussfolgernd könnten Studien zur elektrischen Leitfähigkeit (Amplitude des Potenzials, Nervenleitgeschwindigkeit) im prä- und postoperativen Rahmen weiteren Aufschluss über den Zeitpunkt der Nervenschädigung geben.

Vor dem geschilderten Hintergrund ergibt sich durch die Implantatlage eine ausgesprochene, traktionsbedingte Gefährdung des N. ulnaris, die mithilfe einer anterioren Transposition des Nervs in der Theorie einfach umgangen werden könnte. Demgegenüber belegen jedoch einige Studien, dass die kontrovers diskutierte, anteriore Transposition des N. ulnaris ein schlechteres Outcome in Bezug auf ulnare Neuropathien besitzt als das in-situ-Management [53, 54, 74]. Als Ursache des schlechteren Outcomes ist vor allem die langstreckige Präparation des N. ulnaris zu vermuten, die die Durchblutung des N. ulnaris - aufgrund der Verödung der zuführenden Gefäße - trotz seines reichhaltigen Gefäßnetzes vermindern kann [66].

Im Einzelfall kann jedoch bereits intraoperativ eine mechanische Interaktion zwischen Implantat und Nerv auffällig werden, die alternativlos durch eine gefäßschonende anteriore Transposition³² des N. ulnaris behoben werden sollte [48]. Eine abschließende, intraoperative und sorgfältige Beurteilung des Nervenverlaufs sollte aus diesem Grund in jedem Fall durchgeführt werden [40].

Neben den implantatbedingten Störungen des N. ulnaris besteht stets ein intraoperatives Risiko durch die Verwendung von Haken oder die Handhabung des N. ulnaris, die starke Zug- und/oder Druckkräfte auf den Nerv ausüben können [50]. Eine dementsprechend erzeugte, iatrogene Schädigung des Nervs ist selbstverständlich unter allen Umständen zu vermeiden [4, 40].

Die physiologische Ventralverlagerung des N. ulnaris wurde in der vorliegenden Arbeit als zusätzlicher Anpassungsmechanismus an die Beugebewegung des Ellenbogengelenks nachgewiesen. Obwohl die Auswertungen eine weniger einheitliche Tendenz als bei der Einschränkung der Relativbewegung zwischen Humerus und Nerv zeigten, führte die Einbringung der Osteosyntheseplatte in vielen Fällen zu einer - mitunter stark - vermin-

³²In Bezug auf die eingangs erwähnte Struthersche Arkade sollte die anteriore Transposition des N. ulnaris stets von einer Evaluation dieser umstrittenen Struktur begleitet werden, um im Fall einer transpositionsinduzierten Kompression des N. ulnaris eine Spaltung der Arkade vornehmen zu können [5].

dernten Bewegung des N. ulnaris nach anterior. Demnach ist einerseits zu vermuten, dass die Interposition der Humerusplatte eine Vergrößerung des Bewegungsradius für den N. ulnaris um das Ellenbogengelenk bedingen kann, die sowohl die longitudinale Bewegung des Nerven als auch seine Ventralverlagerung vermindern kann [54]. Die daraus resultierende Entstehung von Zugkräften und diesbezügliche Folgen wurden bereits diskutiert.

Andererseits wird durch die vorgelegten Ergebnisse eine Kompression des Nerven gegen die dorsomedialen Anteile des Fremdmaterials wahrscheinlich [53]. Die entsprechenden Auswirkungen einer Kompression des N. ulnaris wurden zuvor im Rahmen der histologischen Diskussion erwähnt und vermuten vor allem in Kombination mit einer Unterbrechung der neuralen Blutversorgung - wie sie intraoperativ durch die langstreckige Präparation des Nerven entstehen könnte - eine potenzielle Ursache postoperativer Funktionsstörungen des N. ulnaris [58].

Zusammenfassend schränkt die Implantation einer distalen Osteosyntheseplatte am medialen Humerus die Anpassungsmechanismen des N. ulnaris (proximale Längenreserve, Dehnungsfähigkeit und anteromedialer Shift) an seinen streckseitigen Verlauf ein. Dabei ist eine interindividuelle Betonung der einzelnen Mechanismen in Abhängigkeit von anatomischen Varianten zu vermuten. Die vermutlich daraus resultierenden postoperativen Funktionsstörungen des N. ulnaris begründen die zunehmende Diskussion der medialen Humerusverplattung, wobei erste Autoren kürzlich eine Empfehlung gegen die mediale Plattenlage aussprachen, solange diese nicht unbedingt für die Stabilisierung der Fraktur benötigt wird [54].

Die vorliegende Studie zeigt in Ergänzung zu den zitierten Voraufordern, dass die Anatomie des N. ulnaris weiterhin ungenügend erforscht ist und als Grundlage chirurgischer Therapien dringend weiterer Forschung bedarf. In diesem Sinne kann sowohl die Vermeidung einer medialen Plattenosteosynthese [54] als auch die Akzeptanz postoperativer Funktionsstörungen des N. ulnaris [56] keine zufriedenstellende Schlussfolgerung sein. Vor allem das Verständnis der Bewegungsdynamik des N. ulnaris könnte in diesem Kontext neue Ansätze für die Verbesserung von Osteosynthesematerial und Operationstechniken bereitstellen und Chirurgen mit Blick auf die individuellen, anatomischen Varianten des Nervenverlaufs weiterhin sensibilisieren. Das in dieser Studie verwendete Untersuchungsverfahren kann in dieser Hinsicht - durch die an entsprechender Stelle eingebrachten Abwandlungen - einen neuen Ansatz liefern.

Zusätzliche Studien zur Prävalenz ulnarer Neuropathien werden dringend benötigt, da bisherige Schätzungen - unter anderem durch die mangelnde Evaluation des zeitlichen Auftretens der Symptome - alles andere als einheitlich sind [4, 51, 59, 74, 75]. In diesem Rahmen sollte eine detaillierte Evaluation der Funktionsstörung hinsichtlich der geschädigten Qualität (sensorisch oder motorisch) und ihrer Lokalisation am Unterarm erfolgen. Die daraus gewonnenen Daten könnten in Bezug auf die von Sunderland et al. [76] beschriebene, intraneurale Topographie des N. ulnaris interpretiert werden. Diese besagt, dass die sensorischen und motorischen Nervenfasern zur Innervation der Hohlhand im Bereich des

Epicondylus medialis humeri oberflächlich gelagert sind und dementsprechend durch eine externe Kompression eher als die motorischen Fasern zum M. flexor carpi ulnaris und M. flexor digitorum profundus geschädigt werden [7]. In diesem Zusammenhang könnte die oben erwähnte Evaluation weitere Hinweise auf eine oberflächliche oder tiefe (im Sinne von „knochennah“) Lokalisation der Schädigung des N. ulnaris geben und darüber hinaus eine weitere Fokussierung der Erforschung der vermuteten Schädigungsmechanismen begünstigen.

4.3 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit sollte die dynamische Bewegung des N. ulnaris im Bereich des Ellenbogens im physiologischen Zustand untersuchen und zusätzlich den Einfluss einer Plattenosteosynthese am distalen Humerus auf die vermuteten Bewegungsmuster prüfen. Darüber hinaus erfolgte die histologische Beurteilung der Gefäßversorgung des N. ulnaris hinsichtlich iatrogen erzeugter Ischämien des Nervs aufgrund einer Devaskularisation oder einer implantatbedingten Kompression der zuführenden Gefäße.

Die Auswertungen der radiologischen Untersuchungen zeigten, dass das eigens entwickelte Studiendesign eine gute Beurteilbarkeit der longitudinalen sowie der anterior-posterioren Bewegung des N. ulnaris ermöglicht und in weiteren Studien verwendet werden kann. Sowohl die mediolaterale Bewegungsebene als auch die Dehnung des N. ulnaris sollten in einer neuen Versuchsreihe mit geringen Veränderungen des Versuchsaufbaus erneut beurteilt werden.

Die Ergebnisse der radiologischen Untersuchungen zeigten, dass der N. ulnaris im Bereich des Ellenbogens eine Relativbewegung gegen den Humerus vollzieht, die distal des Kubitaltunnels ein größeres Bewegungsausmaß zwischen Extension und Flexion zeigte als in den Bereichen proximal des Kubitaltunnels. Die Unterschiede werden auf eine relative, distale Fixierung des N. ulnaris durch seine motorischen Äste zur Beugemuskulatur zurückgeführt und geben in der Zusammenschau mit der ausgewerteten Literatur einen Hinweis darauf, dass der Nerv vor allem proximal des Kubitaltunnels individuell betonte Anpassungsmechanismen an seinen ungewöhnlichen, streckseitigen Verlauf am Ellenbogengelenk besitzt. Dabei handelt es sich einerseits um eine proximale Längenreserve des N. ulnaris, die als lokal aufgelockerter Nervenverlauf in Erscheinung tritt und mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks aufgehoben wird. Andererseits kommt es - gegebenenfalls nach Ausschöpfung der proximalen Längenreserve - zu einer physiologischen Dehnung des N. ulnaris.

Ein weiterer Anpassungsmechanismus konnte in der vorliegenden Studie mit zunehmender Beugung des Ellenbogengelenks als eine anteriore Bewegung des Nervs in Richtung des Kubitaltunnelbodens nachgewiesen werden. Die somit erzeugte Verringerung des Bewegungsradius um das Drehzentrum kann die traktiven Kräfte auf den N. ulnaris vermutlich reduzieren.

Das physiologische Bewegungsmuster des N. ulnaris wird durch die Einbringung einer anatomischen Platte an der medialen Seite des distalen Humerus beeinflusst. Vor allem die longitudinale Relativbewegung des N. ulnaris gegen den distalen Humerus war in drei von vier Untersuchungen mitunter deutlich eingeschränkt. Die anteriore Bewegung des Nervs war in der Mehrzahl der Untersuchungen ebenfalls reduziert.

Ergänzend zu den radiologischen Untersuchungen war die intraneurale Vaskularisierung des N. ulnaris histologisch an vier Nn. ulnaris beurteilt worden. Die Auswertungen zeigten vor allem innerhalb des Kubitaltunnels eine verstärkte intraneurale Vaskularisierung, die in diesem Bereich durch die A. collateralis ulnaris posterior gewährleistet wird und lateral des Nervs verläuft. Darüber hinaus fanden sich in allen Schnittebenen zahlreiche Gefäße in direkter Nähe des N. ulnaris, die im physiologischen Zustand eine adäquate Versorgung des N. ulnaris ermöglichen.

In der gemeinsamen Betrachtung aller Ergebnisse besteht für den N. ulnaris aufgrund der Plattenosteosynthese am Humerus eine erhöhte Gefahr bezüglich Kompressions- und Zugkräften. Die physiologischen Anpassungsmechanismen des Nervs sind durch die Plattenlage möglicherweise in einer geringen Beugung des Ellenbogengelenks bereits ausgereizt, sodass eine Schädigung des Nervs vor allem in höhergradiger Beugung (bspw. durch postoperative Beübungen oder Ruhigstellungen) - aber auch bereits in geringer Beugung - des Ellenbogengelenks auftreten kann.

Die unzufriedenstellenden Ergebnisse einer anterioren Transposition weisen darüber hinaus darauf hin, dass neben implantatbedingten Einflüssen auch die langstreckige Präparation des N. ulnaris über eine (temporäre) Ischämie zu einer neuralen Schädigung führen kann. Aus diesem Grund sind weitere Studien hinsichtlich der dynamischen Bewegung des N. ulnaris am Ellenbogengelenk dringend notwendig. Langfristig könnte die Anpassung des Osteosynthesematerials sowie die detaillierte Kenntnis risikoreicher Operationsschritte zu einer deutlichen Reduktion der postoperativen Funktionsstörungen des N. ulnaris nach distalen Humerusfrakturen führen.

4.4 Limitationen der Studie

Eine limitierte Aussagekraft der vorliegenden Arbeit ergibt sich aus der Vorauswahl des Körperspenderkollektivs. Hierdurch wurden die Untersuchungen ausschließlich an männlichen Körperspendern mit gut darstellbaren Nn. ulnaris in die Studie eingeschlossen. Darüber hinaus sollte die vorliegende Studie lediglich eine erste, qualitative Aussage über die Bewegungsdynamik des N. ulnaris ermöglichen, die in der Zukunft durch eine größere Anzahl an Untersuchungsobjekten und unter Einbeziehung weiblicher Körperspender quantitativ bestätigt werden sollte.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Verlauf des N. ulnaris	2
1.2	Arterielle Gefäßversorgung des N. ulnaris	5
1.3	AO-Klassifikation der distalen Humerusfraktur	8
1.4	Chirurgische Versorgung der DHF	10
2.1	Präparatentnahme	17
2.2	Proximaler Schnittblock	18
2.3	Kubitaler und distaler Schnittblock	18
2.4	Präparatbettung	19
2.5	Eingedecktes Längsschnittpräparat	20
2.6	Versuchsaufbau der Metalldrahtinjektion	24
2.7	Injektionsvorrichtung	25
2.8	Kanülenpositionierung im N. ulnaris	26
2.9	Injizierter Pin	26
2.10	Übersicht des Versuchsaufbaus	28
2.11	Endgültiger Versuchsaufbau	30
2.12	Plattennachbildung	31
2.13	Plattenimplantation	32
2.14	Bestimmung der Winkelposition	35
3.1	Übersicht von P5prox	40
3.2	Übersicht von P3prox	40
3.3	Vergrößerte Aufnahme von P5prox	41
3.4	Übersicht von P4kub	42
3.5	Übersicht von P2kub	42
3.6	Vergrößerte Aufnahme von P4kub	43
3.7	Vergrößerte Aufnahme von P3kub	43
3.8	Übersicht von P4dist	44
3.9	Vergrößerte Aufnahme von P1horiz	45
3.10	Vergrößerte Aufnahme von P1horiz	46
3.11	Prä- und postoperative Definierung der Pins von UO 1.	49
3.12	Präoperative Pinbewegungen von UO 1	50
3.13	Präoperative Einzelbeobachtung des UO 1	50
3.14	Präoperative Pinabstände von UO 1	51
3.15	Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 1	51
3.16	Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 1	52
3.17	Prä- und postoperative Pinabstände von UO 1	53

3.18	Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 1	53
3.19	Definierung der Pins von UO 2	54
3.20	Präoperative Humerusbewegung von UO 2	55
3.21	Präoperative Pinbewegungen von UO 2	56
3.22	Präoperative Pinabstände von UO 2	56
3.23	Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 2	57
3.24	Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 2	58
3.25	Prä- und postoperative Pinabstände von UO 2	58
3.26	Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 2	59
3.27	Definierung der Pins von UO 3	60
3.28	Präoperative Pinbewegungen von UO 3	61
3.29	Präoperative Pinabstände von UO 3	61
3.30	Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3	62
3.31	Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 3	63
3.32	Prä- und postoperative Pinabstände von UO 3	63
3.33	Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3	64
3.34	Definierung der Pins von UO 4	65
3.35	Präoperative Pinbewegungen von UO 4	65
3.36	Präoperative Pinabstände von UO 4	66
3.37	Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 4	67
3.38	Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 4	67
3.39	Prä- und postoperative Pinabstände von UO 4	68
3.40	Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 4	68
3.41	Präoperative Pinbewegungen von UO 3 in Pronation	69
3.42	Präoperative Pinabstände von UO 3 in Pronation	70
3.43	Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Pronation	70
3.44	Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 3 in Pronation	71
3.45	Prä- und postoperative Pinabstände von UO 3 in Pronation	72
3.46	Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Pronation	72
3.47	Präoperative Pinbewegungen von UO 3 in Supination	73
3.48	Präoperative Pinabstände von UO 3 in Supination	74
3.49	Präoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Supination	74
3.50	Prä- und postoperative Pinbewegungen von UO 3 in Supination	75
3.51	Prä- und postoperative Pinabstände von UO 3 in Supination	76
3.52	Prä- und postoperative Pindistanzen zum Drehzentrum von UO 3 in Supination	76
3.53	Beispielhafter Pinverlauf	77
3.54	Postoperative Veränderungen des Bewegungsausmaßes	78
4.1	Relativbewegung des N. ulnaris	91
4.2	Längenreserve des N. ulnaris	92
4.3	Dehnungsfähigkeit des N. ulnaris	94
4.4	Ventralbewegung des N. ulnaris	96

Tabellenverzeichnis

2.1	Geräte der histologischen Untersuchungen	15
2.2	Instrumente der histologischen Untersuchungen	15
2.3	Substanzen der histologischen Untersuchungen	16
2.4	Geräte der radiologisch-anatomischen Untersuchungen	22
2.5	Instrumente der radiologisch-anatomischen Untersuchungen	22
2.6	Materialien der histologischen Untersuchungen	23
2.7	Substanzen der radiologisch-anatomischen Untersuchungen	23
3.1	Übersicht der Röntgenserien	47
3.2	Terminologie der Auswertungen	47

Literaturverzeichnis

- [1] Daniel B Polatsch, Charles P Melone, Jr, Steven Beldner, and Angelo Incorvaia. Ulnar nerve anatomy. *Hand Clin*, 23(3):283–9, v, Aug 2007.
- [2] M Spinner and E B Kaplan. The relationship of the ulnar nerve to the medial intermuscular septum in the arm and its clinical significance. *Hand*, 8(3):239–42, Oct 1976.
- [3] M M al Qattan and K A Murray. The arcade of struthers: an anatomical study. *J Hand Surg Br*, 16(3):311–4, Aug 1991.
- [4] Robert Shin and David Ring. The ulnar nerve in elbow trauma. *J Bone Joint Surg Am*, 89(5):1108–16, May 2007.
- [5] Edie Benedito Caetano, João José Sabongi Neto, Luiz Angelo Vieira, and Mauricio Ferreira Caetano. The arcade of struthers: an anatomical study and clinical implications. *Rev Bras Ortop*, 52(3):331–336, 2017.
- [6] Ayse Karatas, Nihal Apaydin, Aysun Uz, R Shane Tubbs, Shane R Tubbs, Marios Loukas, and Ferruh Gezen. Regional anatomic structures of the elbow that may potentially compress the ulnar nerve. *J Shoulder Elbow Surg*, 18(4):627–31, 2009.
- [7] D B Apfelberg and S J Larson. Dynamic anatomy of the ulnar nerve at the elbow. *Plast Reconstr Surg*, 51(1):79–81, Jan 1973.
- [8] Esq Struthers, John. On a peculiarity of the humerus and humeral artery. *Monthly Journal of Medical Science*, 3(28):264–267, 10 1848.
- [9] E Kane, E B Kaplan, and M Spinner. [observations of the course of the ulnar nerve in the arm]. *Ann Chir*, 27(5):487–96, May 1973.
- [10] Mario G Siqueira and Roberto S Martins. The controversial arcade of struthers. *Surg Neurol*, 64 Suppl 1:S1:17–20; discussion S1:20–1, 2005.
- [11] Laurent Wehrli and Christophe Oberlin. The internal brachial ligament versus the arcade of struthers: an anatomical study. *Plast Reconstr Surg*, 115(2):471–7, Feb 2005.
- [12] R H M A Bartels, J A Grotenhuis, and J M G Kauer. The arcade of struthers: an anatomical study. *Acta Neurochir (Wien)*, 145(4):295–300; discussion 300, Apr 2003.
- [13] G Osborne. Compression neuritis of the ulnar nerve at the elbow. *Hand*, 2(1):10–3, Mar 1970.
- [14] Andre Granger, Juan P Sardi, Joe Iwanaga, Thomas J Wilson, Lynda Yang, Marios Loukas, Rod J Oskouian, and R Shane Tubbs. Osborne’s ligament: A review of its history, anatomy, and surgical importance. *Cureus*, 9(3):e1080, Mar 2017.
- [15] A Erdem Bagatur, Mehmet Burak Yalcin, and Utku Erdem Ozer. Anconeus epitroch-

- learris muscle causing ulnar neuropathy at the elbow: Clinical and neurophysiological differential diagnosis. *Orthopedics*, 39(5):e988–91, Sep 2016.
- [16] C Martinoli, S Bianchi, N Gandolfo, M Valle, S Simonetti, and L E Derchi. Us of nerve entrapments in osteofibrous tunnels of the upper and lower limbs. *Radiographics*, 20 Spec No:S199–213; discussion S213–7, Oct 2000.
- [17] T G Wadsworth. The external compression syndrome of the ulnar nerve at the cubital tunnel. *Clin Orthop Relat Res*, (124):189–204, May 1977.
- [18] Veronica Macchi, Cesare Tiengo, Andrea Porzionato, Carla Stecco, Gloria Sarasin, Shane Tubbs, Nicola Maffulli, and Raffaele De Caro. The cubital tunnel: a radiologic and histotopographic study. *J Anat*, 225(2):262–9, Aug 2014.
- [19] S W O’Driscoll, E Horii, S W Carmichael, and B F Morrey. The cubital tunnel and ulnar neuropathy. *J Bone Joint Surg Br*, 73(4):613–7, Jul 1991.
- [20] Paul Michelin, Grégoire Leleup, Mourad Ould-Slimane, Marie Caroline Merlet, Benjamin Dubourg, and Fabrice Duparc. Ultrasound biomechanical anatomy of the soft structures in relation to the ulnar nerve in the cubital tunnel of the elbow. *Surg Radiol Anat*, 39(11):1215–1221, Nov 2017.
- [21] R H Gelberman, K Yamaguchi, S B Hollstien, S S Winn, F P Heidenreich, Jr, R R Bindra, P Hsieh, and M J Silva. Changes in interstitial pressure and cross-sectional area of the cubital tunnel and of the ulnar nerve with flexion of the elbow. an experimental study in human cadavera. *J Bone Joint Surg Am*, 80(4):492–501, Apr 1998.
- [22] F A Schuind, D Goldschmidt, C Bastin, and F Burny. A biomechanical study of the ulnar nerve at the elbow. *J Hand Surg Br*, 20(5):623–7, Oct 1995.
- [23] Arvin R Wali, Brandon Gabel, Madhawi Mitwalli, R Shane Tubbs, and Justin M Brown. Clarification of eponymous anatomical terminology: Structures named after dr geoffrey v. osborne that compress the ulnar nerve at the elbow. *Hand (N Y)*, page 1558944717708030, May 2017.
- [24] V V Patel, F P Heidenreich, Jr, R R Bindra, K Yamaguchi, and R H Gelberman. Morphologic changes in the ulnar nerve at the elbow with flexion and extension: a magnetic resonance imaging study with 3-dimensional reconstruction. *J Shoulder Elbow Surg*, 7(4):368–74, 1998.
- [25] D W Vanderpool, J Chalmers, D W Lamb, and T B Whiston. Peripheral compression lesions of the ulnar nerve. *J Bone Joint Surg Br*, 50(4):792–803, Nov 1968.
- [26] Pietro Caliandro, Giuseppe La Torre, Roberto Padua, Fabio Giannini, and Luca Padua. Treatment for ulnar neuropathy at the elbow. *Cochrane Database Syst Rev*, 11:CD006839, 11 2016.
- [27] Jonathan Robert Staples and Ryan Calfee. Cubital tunnel syndrome: Current concepts. *J Am Acad Orthop Surg*, 25(10):e215–e224, Oct 2017.
- [28] Robert M Szabo and Christine Kwak. Natural history and conservative management of cubital tunnel syndrome. *Hand Clin*, 23(3):311–8, v–vi, Aug 2007.
- [29] Mei-Xiu-Li Li, Qiong He, Zhong-Lin Hu, Sheng-Hua Chen, Yun-Cheng Lv, Zheng-Hai Liu, Yong Wen, and Tian-Hong Peng. Applied anatomical study of the vascularized ulnar nerve and its blood supply for cubital tunnel syndrome at the elbow region. *Neural Regen Res*, 10(1):141–5, Jan 2015.

-
- [30] K Yamaguchi, F A Sweet, R Bindra, and R H Gelberman. The extraneural and intraneural arterial anatomy of the ulnar nerve at the elbow. *J Shoulder Elbow Surg*, 8(1):17–21, 1999.
- [31] M. Schünke, E. Schulte, U. Schumacher, M. Voll, and K. Wesker. *Prometheus, Lern-Atlas der Anatomie, Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. Thieme, Stuttgart, 3., überarbeitete und erweiterte auflage edition, 2011.
- [32] C D Prevel, H S Matloub, Z Ye, J R Sanger, and N J Yousif. The extrinsic blood supply of the ulnar nerve at the elbow: an anatomic study. *J Hand Surg Am*, 18(3):433–8, May 1993.
- [33] K H Künzel, C Fischer, and H Anderl. The ulnar nerve as vascularized nerve transplant. part i: Anatomy: arterial vascular supply. *J Reconstr Microsurg*, 2(3):175–9, Apr 1986.
- [34] W C Breidenbach and J K Terzis. The blood supply of vascularized nerve grafts. *J Reconstr Microsurg*, 3(1):43–58, Oct 1986.
- [35] A E Moore, J C Muirhead, K Sharples, and M D Stringer. The effect of upper limb position on ultrasonographic arterial flow to the ulnar nerve. *Anaesthesia*, 69(4):356–61, Apr 2014.
- [36] Daniel Steinitz, Amir; Sailer Jannis; Rikli. *Distal humerus fractures: a review of current therapy concepts*. Springer-Steinitz + Business Media New York 2016, 2016.
- [37] S H Rose, L J Melton, 3rd, B F Morrey, D M Ilstrup, and B L Riggs. Epidemiologic features of humeral fractures. *Clin Orthop Relat Res*, (168):24–30, Aug 1982.
- [38] C Michael Robinson, Richard M F Hill, Neal Jacobs, Graham Dall, and Charles M Court-Brown. Adult distal humeral metaphyseal fractures: epidemiology and results of treatment. *J Orthop Trauma*, 17(1):38–47, Jan 2003.
- [39] Wang. Surgical interventions for treating distal humeral fractures. 2013.
- [40] J.M. Rueger, A. Rücker, and D. Briem. Distale humerusfraktur. *Der Chirurg*, 78(10):959–972, Oct 2007.
- [41] Eric G Meinberg, Julie Agel, Craig S Roberts, Matthew D Karam, and James F Kellam. Fracture and dislocation classification compendium-2018. *J Orthop Trauma*, 32 Suppl 1:S1–S170, 01 2018.
- [42] F. J. P. Beeres, F. Oehme, and R. Babst. Distale humerusfraktur – zugänge und erweiterungen. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 29(2):115–124, Apr 2017.
- [43] V. Bühren, M. Keel, and I. Marzi. *Checkliste Traumatologie*. Thieme, 8. auflage edition, 2016.
- [44] J. M. Rueger, A. Janssen, F. Barvencik, and D. Briem. Distale humerusfraktur. *Der Unfallchirurg*, 108(1):49–58, Jan 2005.
- [45] T Bégué. Articular fractures of the distal humerus. *Orthop Traumatol Surg Res*, 100(1 Suppl):S55–63, Feb 2014.
- [46] William Min, Abbas Anwar, Bryan C Ding, and Nirmal C Tejawani. Open distal humerus fractures–review of the literature. *Bull NYU Hosp Jt Dis*, 68(4):257–61, 2010.
- [47] H.J. Bail, P. Schwabe, and S. Greiner. Distale humerusfrakturen. *Trauma und Berufskrankheit*, 17(1):120–125, Mar 2015.

-
- [48] David A Fuller. Open reduction, internal fixation distal intraarticular distal humerus fracture. *J Orthop Trauma*, 30 Suppl 2:S13–4, Aug 2016.
- [49] F. Bonnaire and P. Bula. Distale humerusfrakturen. *Trauma und Berufskrankheit*, 12(2):96–103, Jul 2010.
- [50] Jeffrey Anglen. Distal humerus fractures. *J Am Acad Orthop Surg*, 13(5):291–7, Sep 2005.
- [51] M. E. Wenzl, F. Raimund, S. Fuchs, A. Paech, and C. Jürgens. Distale humerusfrakturen. *Trauma und Berufskrankheit*, 9(2):S183–S191, May 2007.
- [52] Patrick A Varady, Christian von Rüden, Markus Greinwald, Sven Hungerer, Robert Pätzold, and Peter Augat. Biomechanical comparison of anatomical plating systems for comminuted distal humeral fractures. *Int Orthop*, Mar 2017.
- [53] Ryan C Chen, David J Harris, Stephane Leduc, Joseph J Borrelli, Jr, Paul Tornetta, 3rd, and William M Ricci. Is ulnar nerve transposition beneficial during open reduction internal fixation of distal humerus fractures? *J Orthop Trauma*, 24(7):391–4, Jul 2010.
- [54] Jonathan W Shearin, Talia R Chapman, Andrew Miller, and Asif M Ilyas. Ulnar nerve management with distal humerus fracture fixation: A meta-analysis. *Hand Clin*, 34(1):97–103, 02 2018.
- [55] P C Amadio. Anatomical basis for a technique of ulnar nerve transposition. *Surg Radiol Anat*, 8(3):155–61, 1986.
- [56] Oscar Vazquez, Marijn Rutgers, David C Ring, Michael Walsh, and Kenneth A Egol. Fate of the ulnar nerve after operative fixation of distal humerus fractures. *J Orthop Trauma*, 24(7):395–9, Jul 2010.
- [57] D Ring and J B Jupiter. Complex fractures of the distal humerus and their complications. *J Shoulder Elbow Surg*, 8(1):85–97, 1999.
- [58] K Ogata, S Shimon, J Owen, and P R Manske. Effects of compression and devascularisation on ulnar nerve function. a quantitative study of regional blood flow and nerve conduction in monkeys. *J Hand Surg Br*, 16(1):104–8, Feb 1991.
- [59] Olga D Savvidou, Frantzeska Zampeli, Panagiotis Koutsouradis, George D Chloros, Aggelos Kaspiris, Savas Sourmelis, and Panayiotis J Papagelopoulos. Complications of open reduction and internal fixation of distal humerus fractures. *EFORT Open Rev*, 3(10):558–567, Oct 2018.
- [60] Kenichi Nakano, Keiichi Murata, Shohei Omokawa, Yasuaki Nakanishi, Takamasa Shimizu, Tsutomu Kira, Tadanobu Onishi, and Yasuhito Tanaka. Dynamic analysis of the ulnar nerve in the cubital tunnel using ultrasonography. *J Shoulder Elbow Surg*, 23(7):933–7, Jul 2014.
- [61] Seung Nam Yang, Joon Shik Yoon, Sei Joo Kim, Hyo Jung Kang, and Se Hwa Kim. Movement of the ulnar nerve at the elbow: a sonographic study. *J Ultrasound Med*, 32(10):1747–52, Oct 2013.
- [62] Yasuhiro Kawahara, Tetsuji Yamaguchi, Yuzo Honda, Yumiko Tomita, and Masataka Uetani. The ulnar nerve at elbow extension and flexion: Assessment of position and signal intensity on mr images. *Radiology*, 280(2):483–92, 08 2016.
- [63] M OKAMOTO, M ABE, H SHIRAI, and N UEDA. Morphology and dynamics of the ulnar nerve in the cubital tunnel: Observation by ultrasonography. *The Journal*

- of Hand Surgery: British European Volume*, 25(1):85 – 89, 2000.
- [64] Mordechai Vigler, Farshad Farnejad, and Nader Paksima. Complete anaesthesia in the cutaneous distribution of the ulnar nerve following submuscular anterior transposition - a case report. *Bull NYU Hosp Jt Dis*, 66(4):327–8, 2008.
- [65] Hong-Jiang Ruan, Jun-Jian Liu, Cun-Yi Fan, Jia Jiang, and Bing-Fang Zeng. Incidence, management, and prognosis of early ulnar nerve dysfunction in type c fractures of distal humerus. *J Trauma*, 67(6):1397–401, Dec 2009.
- [66] K Ogata, P R Manske, and P A Lesker. The effect of surgical dissection on regional blood flow to the ulnar nerve in the cubital tunnel. *Clin Orthop Relat Res*, (193):195–8, Mar 1985.
- [67] W L Clark, T E Trumble, M F Swiontkowski, and A F Tencer. Nerve tension and blood flow in a rat model of immediate and delayed repairs. *J Hand Surg Am*, 17(4):677–87, Jul 1992.
- [68] W FEINDEL and J STRATFORD. Cubital tunnel compression in tardy ulnar palsy. *Can Med Assoc J*, 78(5):351–3, Mar 1958.
- [69] H WEISL and G V OSBORNE. The pathological changes in rats’ nerves subject to moderate compression. *J Bone Joint Surg Br*, 46:297–306, May 1964.
- [70] R C Prielipp, R C Morell, F O Walker, C C Santos, J Bennett, and J Butterworth. Ulnar nerve pressure: influence of arm position and relationship to somatosensory evoked potentials. *Anesthesiology*, 91(2):345–54, Aug 1999.
- [71] Jaison James, Levi G. Sutton, Frederick W. Werner, Niladri Basu, Mari A. Allison, and Andrew K. Palmer. Morphology of the cubital tunnel: An anatomical and biomechanical study with implications for treatment of ulnar nerve compression. *The Journal of Hand Surgery*, 36(12):1988 – 1995, 2011.
- [72] E J Wall, J B Massie, M K Kwan, B L Rydevik, R R Myers, and S R Garfin. Experimental stretch neuropathy. changes in nerve conduction under tension. *J Bone Joint Surg Br*, 74(1):126–9, Jan 1992.
- [73] Olukemi Fajolu, Kavita Iyengar, and Christopher S Litts. Distal humerus fractures: handling of the ulnar nerve. *J Hand Surg Am*, 37(8):1696–8, Aug 2012.
- [74] Birgitta Svernlöv, Jens Nestorson, and Lars Adolfsson. Subjective ulnar nerve dysfunction commonly following open reduction, internal fixation (orif) of distal humeral fractures and in situ decompression of the ulnar nerve. *Strategies Trauma Limb Reconstr*, 12(1):19–25, Apr 2017.
- [75] Mark A Mighell, Brent Stephens, Geoffrey P Stone, and Benjamin J Cottrell. Distal humerus fractures: Open reduction internal fixation. *Hand Clin*, 31(4):591–604, Nov 2015.
- [76] S SUNDERLAND. The intraneural topography of the radial, median and ulnar nerves. *Brain*, 68:243–99, Dec 1945.

Anhang

Fixierung nach Thiel

Für die Verwendung der Brust-Bauch-Injektionslösung an einem Körperspender (10,5 l) benötigt man:

Stammlösung L 1989	10 l
Chlorkreosollösung 86/3	0,5 l
Natriumsulfit	0,5 kg
Ethanol	3 l
Morpholin	0,3 l
Formalin	1 l

Für die Verwendung der Leicheninfusionslösung L 1992 an einem Körperspender (15 l) benötigt man:

Stammlösung L 1989	12 l
Chlorkreosollösung 86/3	0,5 l
Natriumsulfit	0,6 kg
Ethanol	1,5 l
Morpholin	0,15 l
Formalin	0,6 l

Formalinlösung

Zur Herstellung von 95 Litern Formalinlösung werden benötigt:

Alkohol	60 l
destilliertes Wasser	15 l
Formalin	20 l

Danksagung

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Timm J. Filler für die fachlich und persönlich hervorragende Betreuung dieser Arbeit und den stets bereichernden Austausch über anatomische und fachübergreifende Fragestellungen danken.

Des Weiteren gilt mein großer Dank Herrn Dr. med. Thomas Frankewitsch für die unermüdliche Unterstützung bei allen großen und kleinen Problemen, die motivierenden Worte und nicht zuletzt für die überaus angenehme Zusammenarbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Thomas Gausepohl, der den gedanklichen Anstoß zu dieser Arbeit gab und stets mit ansteckender Begeisterung und fachlicher Kompetenz an der Durchführung der Untersuchungsreihen beteiligt war.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. physiol. Keywan Sohrabi für die freundliche Bereitstellung der Plattenreplikate danken.

Vielfacher Dank gilt dem Team des Instituts für Anatomie I - unter der Leitung von Frau Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. pol. Svenja Caspers -, das mich in zahlreichen Angelegenheiten über die gesamte Dauer der Promotion hilfsbereit unterstützte. Im Besonderen möchte ich an dieser Stelle Frau Sabine Wittschonke, Herrn Marco Warten und Herrn Robert Kubitza nennen sowie Frau Christine Opfermann-Rüngeler für die Anfertigung der überaus gelungenen Abbildungen danken.

Nicht zuletzt bedanke ich mich von Herzen bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich zu jeder Zeit und uneingeschränkt unterstützten.