

**Diplomarbeit**

**Eine retrospektive Analyse von Unterarm-Refrakturen  
im Kindes- und Jugendalter**

eingereicht von

**Vanessa Hrastnik**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktorin der gesamten Heilkunde**

**(Dr. med. univ.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie**

unter der Anleitung von

**Univ. FA Dr. med. univ. Christoph Arneitz**

**Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. Georg Singer**

Graz, 08.04.2023

## I. Eidesstattliche Erklärung

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Graz, am 08.04.2023*

*Vanessa Hrastnik eh*

## **II. Danksagungen**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich bei der Fertigstellung meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Ein herzlicher Dank geht an meine Betreuer Univ. FA Dr. med. univ. Christoph Arneitz und Priv. Doz. Dr. med. Georg Singer für das Vertrauen und der Überlassung des Themas. Sie haben mich an das wissenschaftliche Arbeiten herangeführt und bei Fragen, sowie bei der Erstellung dieser Arbeit stets unterstützt.

Ich möchte mich auch besonders bei meiner gesamten Familie und Freunden für die ausdauernde und liebevolle Unterstützung beim Erstellen bei meiner Diplomarbeit bedanken. Sie haben mir mit Rat und Tat geduldig beiseite gestanden und mich stets motiviert.

Ein besonderer Dank geht hierbei auch an meiner Schwester Patricia und Pablo für die künstlerische Untermalung und Veranschaulichung mit selbst gezeichneten Skizzen und Bildern.

### **III. Inhaltsverzeichnis**

<b>I.</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>I</b>
<b>II.</b>	<b>Danksagungen</b> .....	<b>II</b>
<b>III.</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>IV.</b>	<b>Abkürzungen</b> .....	<b>VI</b>
<b>V.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>VI.</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>VII.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>XI</b>
<b>VIII.</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Entwicklung und Wachstum der oberen Extremität</b> .....	<b>15</b>
1.1.1	Desmale Osteogenese .....	15
1.1.2	Chondrale Osteogenese .....	16
<b>1.2</b>	<b>Anatomie der Regio antebrachii</b> .....	<b>17</b>
1.2.1	Knochen des Unterarms .....	18
1.2.1.1	Radius .....	18
1.2.1.2	Ulna .....	19
1.2.1.3	Verbindungen der Unterarmknochen .....	21
1.2.2	Muskulatur des Unterarms .....	23
1.2.2.1	Ventrale Unterarmmuskulatur – Flexorengruppe .....	24
1.2.2.2	Radiale Unterarmmuskulatur – brachioradiale Muskelgruppe .....	27
1.2.2.3	Dorsale Unterarmmuskulatur – Extensorengruppe .....	28
1.2.3	Blutversorgung des Unterarms .....	30
1.2.3.1	Arteria radialis .....	31
1.2.3.2	Arteria ulnaris .....	32
1.2.3.3	Arteria interossea communis .....	33
1.2.3.4	Venae membri superioris .....	33

1.2.3.5	Vasa lymphatica.....	34
1.2.4	Innervation des Unterarms .....	35
1.2.4.1	Nervus radialis .....	37
1.2.4.2	Nervus medianus .....	39
1.2.4.3	Nervus ulnaris .....	41
<b>1.3</b>	<b>Frakturklassifikation des Unterarms .....</b>	<b>43</b>
1.3.1	AO-Paediatric-Klassifikation.....	43
1.3.2	Li-La-Klassifikation .....	46
1.3.3	Klassifikation nach Salter-Harris und Aitken.....	48
<b>1.4</b>	<b>Unterarmfrakturen im Kindes- und Jugendalter .....</b>	<b>51</b>
1.4.1	Frakturen des proximalen und mittleren Drittels .....	51
1.4.1.1	Vollständige Frakturen .....	52
1.4.1.2	Unvollständige Frakturen .....	54
1.4.1.3	Monteggia-Fraktur.....	58
1.4.2	Frakturen des distalen Unterarms .....	61
1.4.2.1	Wulstfrakturen.....	62
1.4.2.2	Galeazzi-Fraktur.....	63
1.4.2.3	Grünholzfrakturen am distalen Unterarm .....	63
<b>1.5</b>	<b>Frakturen des Unterarms .....</b>	<b>64</b>
1.5.1	Epidemiologie.....	64
1.5.2	Ätiologie .....	65
1.5.3	Klinik.....	65
1.5.4	Diagnostik.....	66
1.5.5	Frakturbehandlung/-therapie .....	68
1.5.6	Verlauf und Nachbehandlung .....	78
1.5.7	Frakturheilung .....	80
1.5.8	Remodelling und Spontankorrektur .....	81
1.5.9	Komplikationen.....	82

<b>1.6</b>	<b>Refrakturen von Unterarmfrakturen .....</b>	<b>85</b>
1.6.1	Epidemiologie.....	85
1.6.2	Ätiologie .....	86
1.6.3	Behandlung von Refrakturen.....	86
<b>2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>88</b>
<b>2.1</b>	<b>Studiendesign .....</b>	<b>88</b>
2.1.1	Votum der Ethikkommission .....	88
2.1.2	Patientenkollektiv .....	88
2.1.3	Ausschlusskriterien .....	88
2.1.4	Datenerhebung.....	89
2.1.5	Methodik.....	89
<b>2.2</b>	<b>Statistische Auswertung .....</b>	<b>90</b>
<b>2.3</b>	<b>Datenschutz.....</b>	<b>92</b>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse – Resultate.....</b>	<b>93</b>
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>108</b>
4.1	Diskussion und Vergleich mit der Literatur.....	108
4.2	Limitationen.....	116
4.3	Schlussfolgerung.....	117
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>119</b>

#### IV. Abkürzungen

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
ALARA-Prinzip	as low as reasonably achievable
AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
Art.	Articulatio
a.p.	anteroposterior
Bsp.	Beispiel
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CT	Computertomografie
ESIN	elastisch stabile intramedulläre Nagelung
et al.	et alii
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
Dig.	Digitus
Digg.	Digiti
IEFO	Institut für Evaluative Forschung in Orthopädischer Chirurgie
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
Li-La	Licht und Lachen für kranke Kinder – Effizienz in der Medizin e.V.
LKH	Landeskrankenhaus
M.	Musculus
Mm.	Musculi
mind.	mindestens
MRT	Magnetresonanztomografie
MWU-Test	Mann-Whitney-U-Test
N.	Nervus
Nn.	Nervi
NI.	Nodus
NII.	Nodi
OAG	Oberarmgips

PCCF	Pediatric Comprehensive Classification of Long-bone Fractures
Proc.	Processus
R.	Ramus
Rr.	Rami
TEN	titanelastischer Nagel
UAG	Unterarmgips
Univ.-Klinik	Universitätsklinik
u.a.	unter anderem
V.	Vena
Vv.	Venae
vgl.	vergleiche
°	Grad
%	Prozent

## V. Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Knochen des Unterarms (Radius und Ulna) .....	17
<b>Abbildung 2:</b> Verbindungen der Unterarmknochen - Radius und Ulna .....	21
<b>Abbildung 3:</b> Bewegungsumfang des Unterarms .....	23
<b>Abbildung 4:</b> ventrale Unterarmmuskulatur – Flexorengruppe .....	24
<b>Abbildung 5:</b> Radiale Unterarmmuskulatur - brachioradiale Muskelgruppe .....	27
<b>Abbildung 6:</b> Dorsale Unterarmmuskulatur – Extensorengruppe.....	28
<b>Abbildung 7:</b> Sensible Innervationsgebiete der oberen Extremität .....	37
<b>Abbildung 8:</b> Einteilung der Knochen .....	44
<b>Abbildung 9:</b> Veranschaulichung der Salter-Harris-Klassifikation .....	49
<b>Abbildung 10:</b> Komplette dislozierte distale Unterarmfraktur .....	52
<b>Abbildung 11:</b> Grünholzfraktur .....	55
<b>Abbildung 12:</b> Bowing-Fraktur .....	57
<b>Abbildung 13:</b> Monteggia-Fraktur .....	58
<b>Abbildung 14:</b> Röntgenbild einer Monteggia-Fraktur .....	60
<b>Abbildung 15:</b> Monteggia-Fraktur nach Reposition und operativer Versorgung .	60
<b>Abbildung 16:</b> Wulstfraktur .....	62
<b>Abbildung 17:</b> Bild einer typischen Bayonett-Stellung bei einer Unterarmfraktur	66
<b>Abbildung 18:</b> intraoperatives Bild bei dem Einbringen eines ESIN in den Radius .....	72
<b>Abbildung 19:</b> intraoperative Bildwanderkontrolle bei der Einbringung eines ESIN in den Radius .....	73
<b>Abbildung 20:</b> intraoperatives Bild bei der Einbringung eines ESIN in die Ulna	74
<b>Abbildung 21:</b> intraoperative Bildwanderkontrolle einer vollständigen Unterarmfraktur nach der Versorgung mittels ESIN .....	75
<b>Abbildung 22:</b> Bohrdraht-Osteosynthese einer distalen Radiusfraktur .....	76
<b>Abbildung 23:</b> Verlauf einer offenen, dislozierten Unterarmfraktur mittels Fixateur Externe.....	78
<b>Abbildung 24:</b> Geschlechtsverteilung .....	93
<b>Abbildung 25:</b> Häufigkeitsverteilung des Alters bei Unterarmfrakturen .....	94
<b>Abbildung 26:</b> Verteilung von Alter und Geschlecht .....	94
<b>Abbildung 27:</b> Geschlechtsverteilung der Knochenlokalisation .....	96
<b>Abbildung 28:</b> Altersverteilung der Knochenlokalisation der Erstfrakturen .....	96

<b>Abbildung 29:</b> Lokalisation innerhalb der betroffenen Knochen.....	98
<b>Abbildung 30:</b> Altersverteilung der betroffenen Knochen der Erstfrakturen .....	98
<b>Abbildung 31:</b> Geschlechtsverteilung bei Grünholzfrakturen vs. kompletten Frakturen der Erstfrakturen .....	99
<b>Abbildung 32:</b> Altersverteilung bei Grünholzfrakturen vs. komplette Frakturen der Erstfrakturen .....	100
<b>Abbildung 33:</b> Übersicht über die prozentuale Verteilung der Behandlung der Erstfrakturen .....	101
<b>Abbildung 34:</b> Dauer der Immobilisation der Erstfraktur in Bezug auf die Knochenlokalisierung .....	102
<b>Abbildung 35:</b> Häufigkeit des Alters bei der Refraktur .....	103
<b>Abbildung 36:</b> Geschlechtsabhängige Altersverteilung bei der Refraktur .....	104
<b>Abbildung 37:</b> Knochenlokalisierung und Zeit zur Refraktur .....	105

## VI. Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Systematische Übersicht der AO-Klassifikation der Frakturen im Wachstumsalter.....	46
<b>Tabelle 2:</b> Systematische Übersicht der Li-La-Klassifikation .....	48
<b>Tabelle 3:</b> Einteilung der Salter-Harris-Klassifikation.....	49
<b>Tabelle 4:</b> Unfallursachen der Erstfrakturen nach Geschlecht.....	95
<b>Tabelle 5:</b> Geschlechtsverteilung der betroffenen Knochen .....	97

## VII. Zusammenfassung

**Einleitung:** Unterarmfrakturen gehören zu den häufigsten Verletzungen im Kindes- und Jugendalter. Refrakturen treten hier mit einer Häufigkeit von 1 bis 8% auf. Das kindliche Skelett stellt aufgrund seines Wachstums und Korrekturpotentials eine besondere Herausforderung bei der Behandlung von (Re-)Frakturen dar. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die retrospektive Analyse aller Patient\*innen, die aufgrund von Unterarm-Refrakturen behandelt wurden. Anschließend erfolgte die Diskussion über die Risikofaktoren und eine optimale Behandlung von Unterarm-(Re-)Frakturen.

**Methodik:** Es wurde eine retrospektive Analyse aller Kinder und Jugendlichen (Alter 0-18 Jahre) von 2008 bis 2018 durchgeführt, die sich an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie der Medizinischen Universität Graz aufgrund von einer Refraktur des Unterarms in Behandlung befanden. Die Datenerhebung erfolgte über openMEDOCS und die statistische Auswertung wurde mit Hilfe von SPSS Statistics21® durchgeführt.

**Ergebnisse:** Insgesamt wurden 96 Patient\*innen mit einem durchschnittlichen Alter von  $8,4 \pm 3,5$  Jahren in die Studie eingeschlossen. 74 (77,1%) davon waren männlich und 22 (22,9%) weiblich. Die häufigste Ursache für eine (Re-)Fraktur war ein Sturz auf den Arm. Meist waren geschlechtsunabhängig diaphysäre Frakturen (58,3%) und komplette Unterarmfrakturen (64,6%) von Refrakturen betroffen. 34,4% zeigten initial eine Grünholzfraktur, diese waren signifikant jünger als Patient\*innen mit vollständigen Frakturen ( $p < 0,001$ ). Refrakturen traten mit einer Häufigkeit von 1,2% nach durchschnittlich  $97,4 \pm 71,3$  Tagen auf. Es zeigte sich eine Zunahme der operativen Versorgung der Refrakturen im Vergleich zu den Erstfrakturen ( $p < 0,05$ ). Die Immobilisierungsdauer der Refraktur ergab einen Median von 35 Tagen. Eine weitere Komplikation war bei 11,4% der Patient\*innen zu beobachten.

**Diskussion:** Ein erhöhtes Refrakturrisiko besteht ca. 3 Monate nach der Initialfraktur. Als Risikofaktoren wurden das männliche Geschlecht, ein Alter zwischen 5 und 7 Jahren, kombinierte Radius-/Ulnafrakturen und diaphysäre

Frakturen ermittelt. Prävention stellt die effektivste Therapie einer Refraktur dar. So ist eine Aufklärung der Eltern über das Refrakturrisiko, sowie eine optimale Behandlung notwendig. Grundsätzlich ist eine konservative und operative Behandlungsmethode bei (Re-)Frakturen möglich. Eine Immobilisierung für 6 Wochen bei diaphysären Frakturen könnte das Refrakturrisiko senken. Außerdem scheint eine kürzere Immobilisierung bei distalen Unterarmfrakturen ausreichend zu sein. Eine abnehmbare Schiene sowie eine Sportrestriktion für insgesamt 3 Monate ist zu empfehlen.

## VIII. Abstract

**Introduction:** Forearm fractures are among the most common injuries in childhood and adolescence. Refractures occur with a frequency of 1 to 8%. Due to its growth and correction potential, the child's skeleton presents a special challenge in the treatment of (re)fractures. The aim of the study was a retrospective analysis of patients treated with forearm refractures, followed by a discussion of risk factors and optimal treatment.

**Methods:** A retrospective analysis of all children and adolescents (age 0-18 years) treated with forearm refractures at the Department of Pediatric and Adolescent Surgery, Medical University of Graz, Austria, from 2008 to 2018 was conducted. Data collection was performed via openMEDOCS and statistical analysis by using SPSS Statistics21®.

**Results:** A total of 96 patients were included in the study. Out of these, 74 (77.1%) were male and 22 (22.9%) female with an average of  $8.4 \pm 3.5$  years. Falling on the arm was the most common cause of (re)fractures. Especially diaphyseal fractures (58.3%) and complete forearm fractures (64.6%) were affected by refractures, regardless of gender. The 34.4% which initially had a greenstick fracture, were significantly younger than patients with a complete fracture ( $p < 0.001$ ). Refractures occurred with a frequency of 1.2% after an average of  $97.4 \pm 71.3$  days. The number of surgical procedures for treating refractures increased compared to initial fractures ( $p < 0.05$ ). The median duration of immobilization of the refracture was 35 days. Further complications were observed in 11.4% of the patients.

**Discussion:** An increased risk for refracture exists approximately 3 months after the initial fracture. Risk factors identified were male gender, age between 5 to 7 years, combined radius/ulna fractures and diaphyseal fractures. Prevention represents the most effective treatment of refracture. Thus, education of parents about the risk of refracture, as well as optimal treatment, is necessary. Basically, conservative and surgical treatment method for (re)fractures is possible. Immobilization for 6 weeks in diaphyseal fractures could reduce the risk of refracture. In addition, shorter immobilization seems to be sufficient for distal

forearm fractures. A removable splint and sports restriction for a total of 3 months is recommended.

# **1 Einleitung**

## **1.1 Entwicklung und Wachstum der oberen Extremität**

Die Ausbildung der oberen Extremitäten beginnt etwa am 25. Tag der embryonalen Entwicklung mit der Entstehung von faltenförmigen Knospen an der seitlichen Rumpfwand (1). Die Knospen der unteren Extremitäten erscheinen ungefähr zwei Tage später, wodurch sie sich im zeitlichen Verlauf immer nach den oberen Extremitäten entwickeln (1). Diese Extremitätenanlagen setzen sich aus einem Kern, bestehend aus Mesenchym und einer Hülle aus ektodermalem Gewebe zusammen (1). Die Entwicklung der oberen Extremität verläuft annähernd von proximal nach distal (2). So beginnt an der oberen Extremität zuerst die Bildung des Humerus, gefolgt von der Ulna und ulnaren Anteilen der Handwurzel, sowie dem Radius und den radialen Handwurzelbereichen (2).

In der 5. - 6. Woche kommt es zur Ausbildung einer Handplatte, woraus sich durch interdigitale Apoptose die Finger entwickeln (1-3). Im weiteren Verlauf kommt es an den zukünftigen oberen Extremitäten zu mesenchymalen Verdichtungen und Verknorpelungen, die die Vorstufen der späteren Knochen darstellen (3). Um die typische Handposition zu erlangen, erfolgt eine Rotation der Anlage der oberen Extremitäten um ca. 90°, sodass die Daumen nach lateral zeigen (1, 3).

Bereits in der 9. bis 12. Woche kommt es zur proportionalen Entwicklung der oberen Extremitäten (3). Auch Ossifikationszentren bilden sich im weiteren Verlauf aus, woraus sich die Knochen entwickeln (3).

Die Entwicklung des Knochens, auch Osteogenese genannt, kann auf zwei Arten erfolgen (4). Hierbei wird zwischen der desmalen und der chondralen Osteogenese unterschieden (4, 5). Vorerst bildet sich ein Geflechtknochen, der anschließend zu einem mechanisch belastbareren Lamellenknochen umgewandelt wird (1). Der wichtigste Faktor zur Entwicklung des Knochens ist die physiologische Belastung (4).

### **1.1.1 Desmale Osteogenese**

Bei der desmalen Osteogenese bildet sich der Knochen direkt aus dem mesenchymalen Bindegewebe und wird aus diesem Grund auch als direkte Osteogenese bezeichnet (2, 4).

Hierbei differenzieren sich aus den Mesenchymzellen Osteoblasten, die in weiterer Folge das Osteoid, die unverkalkte Knochenmatrix bilden (1, 2). Im weiteren Verlauf kommt es zu Verkalkungen und schließlich entsteht die mineralisierte Knochenmatrix mit sogenannten Osteozyten (1). Durch appositionelles Wachstum vergrößert sich der Knochen an der äußeren Oberfläche (1). Innenseitig wird überflüssiges Knochengewebe durch Osteoklasten abgebaut und es kann eine Höhle entstehen (1).

Auf diese Weise entwickeln sich Teile des Schädeldaches, sowie Anteile der Mandibula und der Clavicula (1).

### **1.1.2 Chondrale Osteogenese**

Die meisten Knochen, wie auch die Röhrenknochen, entwickeln sich durch die indirekte Osteogenese, die auch als chondrale Osteogenese bezeichnet wird (1). In diesem Fall entsteht das Knochengewebe über eine Zwischenstufe, dem Knorpelgewebe (1, 4). Es wird nochmals zwischen der enchondralen und der perichondralen Osteogenese unterschieden (1, 4).

Die schichtweise Auflagerung von Knochengewebe an der Außenseite wird als perichondrale Osteogenese bezeichnet (4). Es bilden sich Osteoblasten im Perichondrium, der Haut des Knorpels, und das Knochengewebe entwickelt sich wie bei der desmalen Ossifikation (1). Hierdurch entsteht eine perichondrale Knochenmanschette direkt aus dem Mesenchym (1, 5). Die perichondrale Ossifikation ist auf die Diaphyse beschränkt (1, 5) und ist für das Dickenwachstum des Knochens notwendig (2).

Bei der enchondralen Osteogenese erfolgt die Entwicklung in Form von Knochenkernen, wie es beispielsweise bei den Röhrenknochen in den Epiphysen und Apophysen der Fall ist (5). Zunächst kommt es im Knocheninneren zu einer Vergrößerung und Verkalkung der Knorpelzellen (1). Anschließend wachsen Blutgefäße ein und aus den eingewanderten Mesenchymzellen differenzieren sich Osteoblasten, die das Knochengewebe bilden und Chondroklasten, die das Knorpelgewebe abbauen (1). Es entwickelt sich das Knochengewebe mit der Knochenbälkchenstruktur wie beispielsweise im Diaphysenbereich der Röhrenknochen (1, 5).

Je nach Knochen kommt es meist postnatal auf diese Weise zur Verknöcherung der Epiphysen (1). Im Epiphysenzentrum entstehen postnatal sekundäre Knochenkerne und die Ossifikation breitet sich Richtung Peripherie weiter aus (1,

5). In den langen Röhrenknochen bleibt die Epiphysenfuge zunächst als knorpelige Struktur zwischen Diaphyse und Epiphyse erhalten und dient dem Längenwachstum des Knochens (4, 5). Die Zunahme der Knochendicke kommt durch appositionelles Wachstum zustande (5). Mit zunehmenden Alter kommt es zur Verknöcherung der Epiphysenfugen bis diese vollkommen knöchern umgebaut wurden und somit verschlossen sind (1, 5). Zuletzt verknöchert die Epiphysenfuge des distalen Radius bis zu einem Alter von ungefähr 25 Jahren (6).

Die distalen Epiphysenfugen des Unterarms sind für ungefähr 80% und die proximalen Epiphysenfugen für ca. 20% des Längenwachstums des Unterarms verantwortlich (7).

## 1.2 Anatomie der Regio antebrachii

Das Antebrachium weist eine konische Form auf (4). Dies ist dadurch zu erklären, dass sich die Masse der Muskeln hauptsächlich im proximalen Anteil befindet (4). Nach distal geht die Muskulatur in die schmalere Sehnen über (4).



**Abbildung 1:** Knochen des Unterarms (Radius und Ulna) in Anlehnung an Wurzinger L.J. *Duale Reihe Anatomie*, 2014, Seite 478 (6) © Patricia Hrastnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

### 1.2.1 Knochen des Unterarms

Die knöchernen Bestandteile des Unterarms setzen sich aus dem Radius und der Ulna zusammen (**Abbildung 1**) (4). Diese beiden Knochen gehören zu der Gruppe der langen Röhrenknochen, bestehend aus Epiphyse, Metaphyse und Diaphyse (4).

Die Epiphysen der Ossae longae bestehen im Inneren aus der Substantia spongiosa mit meist blutbildendem Knochenmark, die von einer dünnen Kortikalis umschlossen wird (4). Das Geflecht der Knochenbälkchen richtet sich entsprechend der einwirkenden Kräfte durch Druck und Zug aus (4). An den Gelenksflächen ist die Epiphyse von Knorpel überzogen (4). Die Diaphyse der Röhrenknochen besitzt eine kompakte Substantia corticalis, die den Raum des Knochenmarks umgibt (4).

Im Bereich der Metaphyse befindet sich die Wachstumsfuge, die, wie bereits erwähnt, für das Längenwachstum des Knochens verantwortlich ist (4, 7).

In Supinationsstellung des Unterarms stehen die beiden Knochen parallel zueinander, lateral liegt der kürzere Radius und auf der medialen Seite die längere Ulna (**Abbildung 1**) (2, 8). Bei der Umwendebewegung des Unterarms kommt es zu einer Überkreuzung der Unterarmknochen, wobei die Ulna fixiert bleibt und sich der Radius im distalen Bereich um die Ulna dreht (2, 8). Dieses Bewegungsmuster wird als Pronation bezeichnet.(2, 8).

Die Verlaufsformen von Radius und Ulna sind entgegengesetzt (4). Der Radius hat an seinem proximalen Ende ein schlankes Köpfchen und ein starkes distales Ende (4). Im Gegensatz dazu ist die Ulna proximal sehr kräftig und ist an ihrem distalen Ende zarter gebaut (4).

#### 1.2.1.1 Radius

Der Radius kann in Caput, Collum und Corpus eingeteilt werden (2, 8). Proximal gelegen findet man das Caput radii mit der konkaven Fovea articularis, die als Teil der Gelenksfläche für die Articulatio (Art.) humeroradialis dient (4, 9). Die Circumferentia articularis des Radiusköpfchens umgibt die Fovea und dient als ringförmige Kontaktfläche für die Incisura radialis ulnae (4, 9). Diese Strukturen bilden die Articulatio radioulnaris proximalis (4, 9).

Anschließend an das Caput radii liegt distal davon das Collum radii, das den dünnsten Anteil des Radius darstellt (9).

Weiter nach distal folgend schließt sich der Corpus radii an (8). An diesem Collum-Corpus-Übergang befindet sich an der medialen Seite die Tuberositas radii, die als Ansatzstelle für den Musculus (M.) biceps brachii dient (4, 9). Der Radius schneidet sich konvex von der Ulna weg (6). Somit artikulieren die beiden Knochen nur am distalen und am proximalen Ende miteinander (6). Am dreiecksförmigen Corpus des Radius (2, 10) können drei Flächen unterschieden werden (4). Dorsal ausgerichtet befindet sich die Facies posterior, die durch die Margo posterior von der Facies lateralis getrennt wird (2, 4, 10). Anschließend befindet sich ventralseitig die Margo anterior, die weiter in die Facies anterior übergeht (2, 4, 10). Die Facies anterior wird durch die medial gelegene Margo interosseus von der Facies posterior getrennt (4, 6, 8, 10).

Am breiten, distalen Radiusende befindet sich lateralseitig der Processus (Proc.) styloideus radii (8). Auf der medialen Seite ist die Incisura ulnaris radii zu erkennen, die die Gelenksfläche für die Articulatio radioulnaris distalis darstellt (4, 8).

Auf der Dorsalseite befinden sich die Sulci tendinum musculorum extensorum, in denen die Sehnen der Extensoren verlaufen (4). Das Tuberculum dorsale radii, auch Tuberculum Listeri genannt, ist ein prominenter, tastbarer Knochenanteil (4). Dieser trennt die Sehnen des Musculus (M.) extensor carpi radialis brevis und des M. extensor pollicis longus voneinander (4).

Mit seinem distalen Ende steht der Radius mit seiner Facies articularis carpalis in Verbindung zu den Handwurzelknochen Os lunatum und Os scaphoideum (4). Somit bildet er einen Teil der Articulatio radiocarpalis (4, 8).

### **1.2.1.2 Ulna**

In Supinationsstellung liegt die Ulna medial des Radius (2, 8). Ihre Extremitas proximalis endet dorsalseitig mit einem kräftigen Knochenfortsatz, dem Olecranon (4, 9, 10). Auf der palmaren Seite ist die konkave Incisura trochlearis zu finden (2, 4, 10). Diese halbmondförmige Fläche artikuliert zangenförmig mit der Trochlea humeri und endet weiter ventral im kleineren Processus coronoideus (4, 9, 10). Diese Strukturen bilden zusammen die Articulatio humeroulnare (4, 9).

Radial des Processus coronoideus ist die kleine Incisura radialis zu erkennen (4, 10). Sie dient zusammen mit dem von hier ausgehendem, ringförmigen Ligamentum (Lig.) anulare radii als Gelenksfläche für den Caput radii mit der Circumferentia articularis (4). Dieses Ligament weist durch hohe

Druckbeanspruchung an seiner Innenseite Knorpelstrukturen auf (4, 10). Durch diese Konstruktion wird das Radiusköpfchen in seiner Position gehalten (4, 9, 10).

Weiter distal der Incisura radialis liegt die Crista musculi supinatoris, die als Ursprungsort für den M. supinator dient (4).

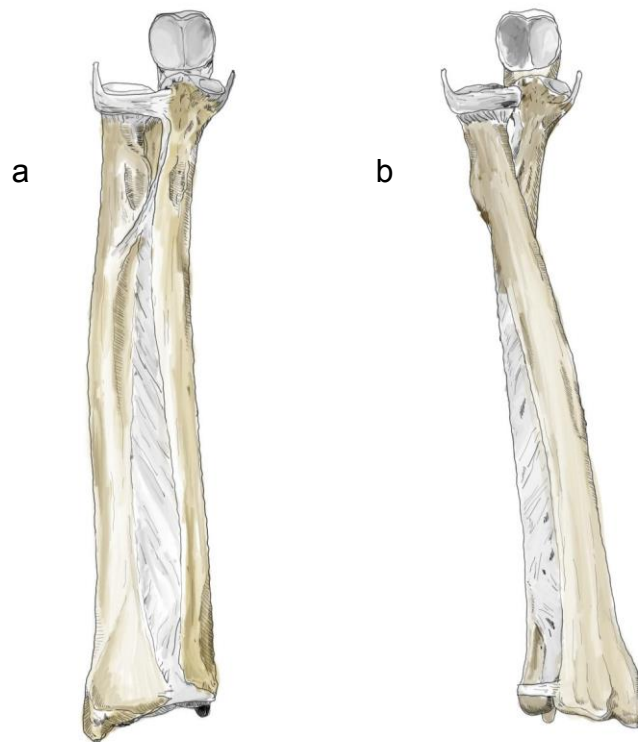
Die Tuberositas ulnae liegt distal des Processus coronoideus und bildet den Übergang zum Corpus ulnae; hier setzt der M. brachialis an (6).

Der Körper der Ulna weist, wie auch der Radius, drei Flächen und drei Kanten auf (4). Hierdurch ergibt sich im proximalen Abschnitt im Querschnitt eine Dreiecksform, die distalwärts immer weiter verschwimmt und schließlich einen annähernd runden Querschnitt aufweist (2, 4). Auf der dorsalen Seite zieht die Margo posterior nach distal zum Processus styloideus ulnae (4, 10). Sie trennt die Facies medialis und die Facies posterior voneinander (4, 10). Weiter auf der radialen Seite der Ulna, ist die Margo interosseus, die ausgehend von der Crista musculi supinatoris nach distal zieht (4, 10). Sie unterteilt die Facies posterior und die Facies anterior (4, 10). Durch die Margo anterior werden die Facies anterior und die Facies medialis unterschieden (4, 8, 10).

Distalwärts endet die Ulna im Caput ulnae (2, 8). Auf ihrer dorsalen Seite befindet sich der weit nach distal ragende kleine Processus styloideus ulnae (4, 8, 10). An dem Caput ist lateral die Circumferentia articularis zu finden, die dem Radius als Gelenkspartner dient (2, 6). Sie bilden gemeinsam die Articulatio radioulnaris distalis (6).

Auch die Ulna ist mit ihrem distalen Ende ein Teil des proximalen Handgelenks (4). Jedoch steht sie nicht in direkter Verbindung mit den Handwurzelknochen, sondern ist durch einen Discus articularis, den Discus ulnocarpalis von diesen getrennt (2, 8).

### 1.2.1.3 Verbindungen der Unterarmknochen



**Abbildung 2:** Verbindungen der Unterarmknochen - Radius und Ulna in (a) Supinations- und (b) Pronationsstellung in Anlehnung an Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Prometheus LernAtlas der Anatomie, 2018, Seite 282 (2)  
© Patricia Hrastrnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

Zu den Verbindungen zwischen Radius und Ulna zählen die fasrige Membrana interossea antebrachii sowie die beiden gelenkigen Verbindungen Articulationes radioulnares proximalis und distalis (**Abbildung 2**) (2, 6, 8).

Die Membrana interossea antebrachii ist eine Bindegewebsplatte (4). Sie entspringt proximal am Radius und verläuft nach distal zur Ulna (4, 10). Sie verbindet die Unterarmknochen fast über die gesamte Länge miteinander (4). Proximal wird sie von der sogenannten Chorda obliqua verstärkt (4, 10). Hierbei handelt es sich um einen Faserzug, der entgegengesetzt zu der Membrana interossea antebrachii verläuft (8, 10). Er entspringt an der Tuberositas ulnae und zieht distal der Tuberositas radii zur Margo interossea radii (10). Diese Faserstrukturen verhindern eine Parallelverschiebung von Radius und Ulna und übertragen Druck- und Zugbelastungen der Knochen aufeinander (10). Zudem kommt es zu einer Stabilisierung des proximalen und distalen Radioulnargelenks (4). Bei der Umwendebewegung sind immer Anteile der Bindegewebsplatte gespannt (4). Des Weiteren entspringen an der kräftigen Membrana interossea antebrachii einige Unterarmmuskeln (4).

Zu der Gelenksverbindung der Unterarmknochen zählen die Articulationes radioulnares proximalis und distalis (2, 6). Sie bilden eine funktionelle Einheit und ermöglichen die Bewegungsrichtungen im Unterarm (6). Der proximale Anteil bildet einen Teil der Articulatio cubiti (4). Bei dem proximalen Radioulnargelenk handelt es sich um ein Zapfengelenk (4). Der Gelenkskopf wird aus der Circumferentia articularis radii gebildet (4, 10). Die Gelenksfläche setzt sich aus der lateral gelegenen Incisura radialis ulnae und dem an der Innenseite überknorpelten Ligamentum anulare radii zusammen (4, 10). Während der Bewegung im proximalen Radioulnargelenk dreht sich das Caput radii in der ringförmigen Gelenksfläche (4, 8).

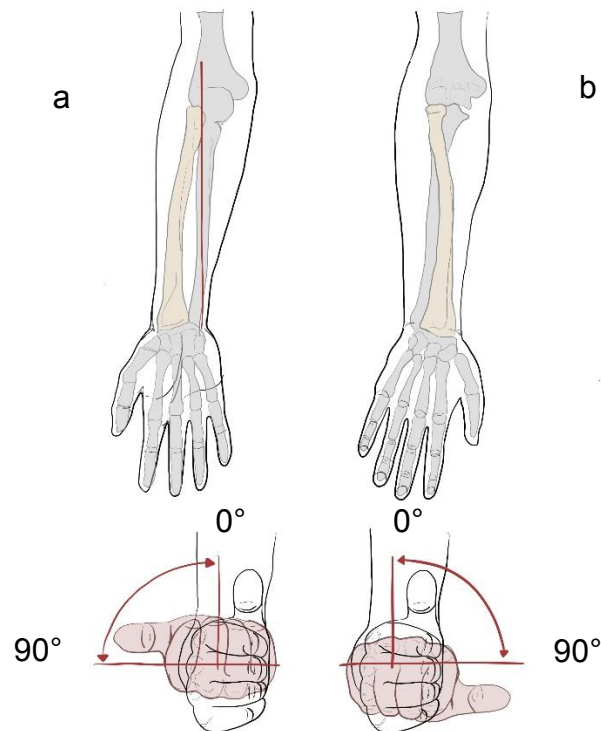
Beim Erwachsenen verengt sich das Ligamentum anulare radii nach distal, wodurch eine trichterähnliche Form geschaffen wird und hierdurch eine Sicherung gegen Luxation bei Zug am distalen Unterarm entsteht (4, 9). Bei Kindern ist diese Verbindung noch nicht stabil genug und durch starken Zug am Unterarm in Pronationsstellung kann es zur sogenannten Pronatio dolorosa kommen (2). Hierbei handelt es sich um eine Subluxation des Radiusköpfchens aus dem Ligamentum anulare radii (2, 4).

Die Articulatio radioulnaris distalis gehört ebenfalls zu der gelenkigen Verbindung von Radius und Ulna und ist der Gruppe der Radgelenke zugeordnet (2, 4). Es wird aus der Circumferentia articularis ulnae und der Incisura ulnaris radii gebildet (2, 4). Der Discus articularis sive ulnocarpalis trennt das distale Radioulnargelenk von der Articulatio radiocarpalis (4). Bei der Umwendebewegung dreht sich der Radius um den Gelenkskopf der feststehenden Ulna (4, 8).

Die genannten Gelenke bilden eine funktionelle Einheit, indem ihre Bewegungen miteinander gekoppelt ablaufen (6). Grund hierfür ist die Verbindung von Radius und Ulna durch die Membrana interossea antebrachii, wodurch Umwendebewegungen, also Pronation und Supination, ermöglicht werden (**Abbildung 2**) (2, 6).

Ausgehend vom Zentrum der Fovea articularis des Caput radii bis zum Processus styloideus des Caput ulnae verläuft die Diagonalachse, die als gemeinsame Gelenksachse der Articulatio radioulnaris proximalis und distalis anzusehen ist (**Abbildung 3**) (4, 10). Um diese Achse finden die Pronations- und Supinationsbewegungen statt (8, 10).

Der Bewegungsumfang der Unterarmdrehung umfasst normalerweise  $80^{\circ}$ - $90^{\circ}/0^{\circ}/80^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , wobei bei der Neutral-Null-Stellung, auch Semipronationsstellung genannt, der Daumen nach oben bzw. ventralwärts zeigt (**Abbildung 3**) (2, 4, 8).



**Abbildung 3:** Bewegungsumfang des Unterarms

((a) Supinations- und (b) Pronationsstellung) in Anlehnung an Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Prometheus LernAtlas der Anatomie, 2018, Seite 285 (2)  
© Patricia Hrastrnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

### 1.2.2 Muskulatur des Unterarms

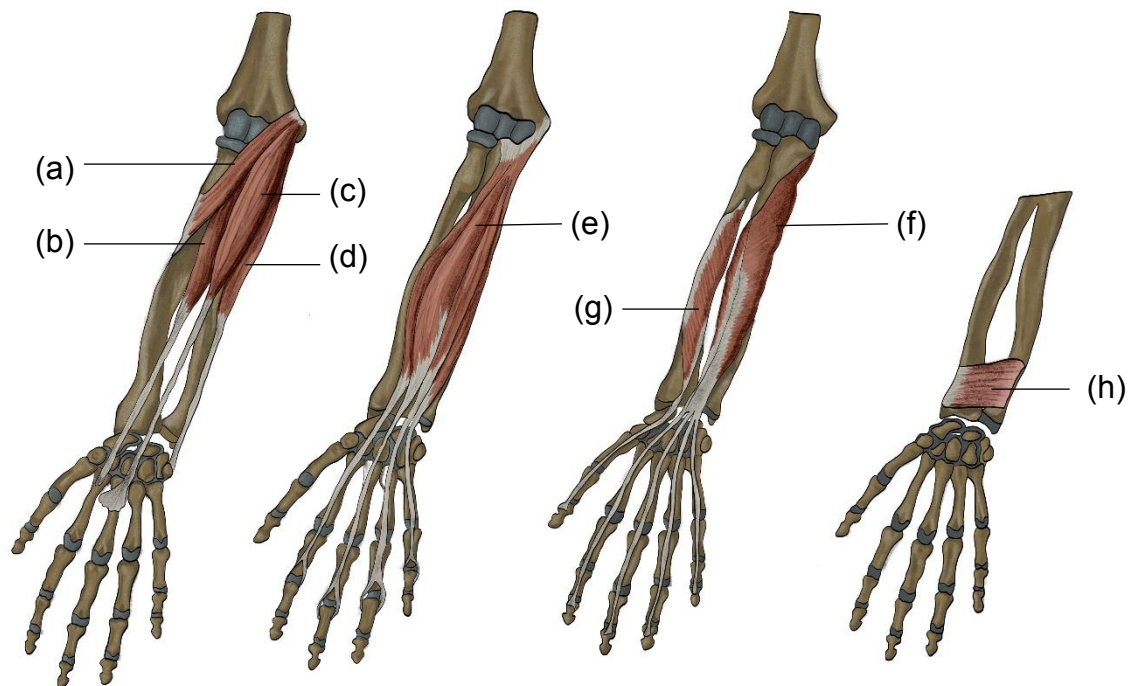
Um Bewegungen in den Gelenken des Armes durchführen zu können, ist eine Muskulatur notwendig (4). Es handelt sich bei der Skelettmuskulatur des aktiven Bewegungsapparates um eine quergestreifte Muskulatur, die willkürlich innerviert werden kann (4).

Bei jedem Muskel gibt es einen rumpfnahen Ursprung, normalerweise das *Punctum fixum* und einen rumpffernen Ansatz, der üblicherweise das *Punctum mobile* darstellt (4). Ein Muskel kann über ein oder mehrere Gelenke ziehen (4). Aus diesem Grund werden eingelenkige, zweigelenkige und mehrgelenkige Muskeln unterschieden (4).

Ausgehend von der oberflächlichen *Fascia antebrachii* ziehen Bindegewebssepten in die Tiefe, die die Muskulatur des Unterarms trennen. (4) So

kann die Muskulatur nach ihrer Lage eingeteilt werden (4). Es wird zwischen der ventralen Flexorengruppe, der brachioradialen Gruppe und der dorsalen Extensorengruppe unterschieden (4, 6).

### 1.2.2.1 Ventrale Unterarmmuskulatur – Flexorengruppe



**Abbildung 4:** ventrale Unterarmmuskulatur – Flexorengruppe in Anlehnung an Paulsen F, Waschke J. Sobotta – Atlas der Anatomie des Menschen, 2010, Seite 175 (8) © Patricia Hrastnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

(a) *M. pronator teres*; (b) *M. flexor carpi radialis*; (c) *M. palmaris longus*; (d) *M. flexor carpi ulnaris*; (e) *M. flexor digitorum superficialis*; (f) *M. flexor digitorum profundus*; (g) *M. flexor pollicis longus*; (h) *M. pronator quadratus*

Die ventrale Unterarmmuskulatur wird in vier Schichten unterteilt (**Abbildung 4**) (4, 8). Die erste Schicht ist die oberflächliche Schicht, bestehend aus *M. pronator teres* (a), *M. flexor carpi radialis* (b), *M. palmaris longus* (c) und *M. flexor carpi ulnaris* (d) (**Abbildung 4**) (2, 4, 8).

Der *M. pronator teres* (a) entspringt mit seinem *Caput humerale* am *Epicondylus medialis humeri* und mit seinem *Caput ulnare* am *Proc. coronoideus ulnae* (2, 4). Er zieht nach distal am Unterarm und hat seinen Ansatz mittig am *Radiusschaft*, der *Facies lateralis radii* (2, 4). Aus diesem Grund gilt er als schwacher Beuger im Ellbogengelenk und ist ein wichtiger Bestandteil bei der Pronation (2, 4, 6).

Auch am Epicondylus medialis des Humerus entspringt der M. flexor carpi radialis (b), wobei seine Ansätze an der Basis der palmaren Seite des Os metacarpale II und manchmal auch des Os metacarpale III zu finden sind (2, 4). Dieser zweigelenkige Muskel hat die Aufgabe der Mithilfe bei der Pronation und der leichten Flexion im Ellenbogengelenk, sowie der Flexion und der Radialabduktion im Handgelenk (2, 4, 8).

Der variabel angelegte M. palmaris longus (c) hat seinen Ursprung ebenfalls am Epicondylus medialis humeri und spannt mit seinem Ansatz die Aponeurosis palmaris auf (2, 4). In der Articulatio cubiti dient er als schwacher Beuger und im Handgelenk ist er an der Palmarflexion beteiligt (2, 4).

Der letzte Muskel dieser Schicht ist der zweiköpfige M. flexor carpi ulnaris (d) (6). Er entspringt mit seinem Caput humerale am Epicondylus medialis humeri und mit seinem Caput ulnare am Olecranon der Ulna (2, 4). Der Muskel zieht nach distal bis zu den Handwurzelknochen, wobei das Os pisiforme als Sesambein zwischengeschaltet ist und die Sehne in zwei Teile aufspaltet (4). Als Ansatz dienen zum einen der Hamulus ossis hamati für das Lig. pisohamatum und zum anderen die Basis des Os metacarpale V für das Lig. pisometacarpale (4). Zu seinen Aufgaben zählen die Flexion im Ellenbogengelenk, sowie im Handgelenk die Flexion und Ulnarabduktion (2, 4, 6).

Anschließend an die oberflächliche Schicht, befindet sich die mittlere, zweite Schicht, bestehend aus nur einem Muskel, dem M. flexor digitorum superficialis (e) (**Abbildung 4**) (4, 8). Dieser Muskel hat drei Köpfe, mit denen er als Caput humerale am Epicondylus medialis humeri, als Caput ulnare am Proc. coronoideus der Ulna und als Caput radiale distal der Tuberositas radii entspringt (2, 4). Er zieht weit nach distal und teilt sich in vier Sehnen, die ihren Ansatz an den Seiten der Phalanx media der Digg. II-V haben (2, 4). Hierdurch liegt seine Hauptaufgabe im Handgelenk und auch in den Fingergrund- und proximalen Fingergelenken in der Flexion, zusätzlich ist er im Ellenbogengelenk als schwacher Beuger beteiligt (2, 4, 8).

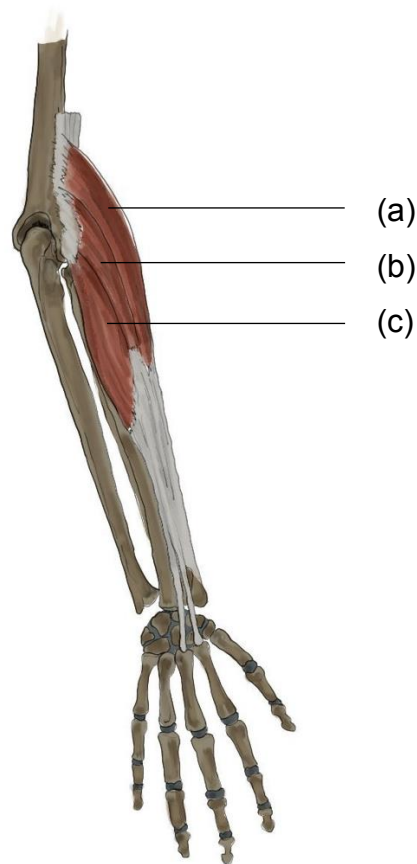
Die nächste Schicht enthält zwei Muskeln, den M. flexor digitorum profundus (f) und den M. flexor pollicis longus (g) (**Abbildung 4**) (4, 8). Ersterer hat seinen Ursprung in den proximalen zwei Drittel der Facies anterior, der Ulna sowie der angrenzende Membrana interossea antebrachii (2, 4). Von dort aus zieht der Muskel mit seinen vier Bäuchen nach distal und tritt als M. perforans durch die Sehnenchenkel des M. flexor digitorum superficialis (e) (4). Sein Ansatz liegt weiter

distal auf der palmaren Seite an der Basis der Endphalangen von Digg. II-V (4). Die Kontraktion des M. flexor digitorum profundus (e) führt zu einer Flexion in den Grund-, Mittel- und Endgelenken der Finger II-V, sowie zu einer Flexion und Ulnaruktion im Handgelenk (2, 4).

Der M. flexor pollicis longus (g) entspringt an der Facies anterior des Radius und der angrenzenden Membrana interossea des Unterarms (2, 4). Sein Ansatz liegt palmarseitig an der Basis des Phalanx distalis des Daumens (2, 4). Hierdurch ergibt sich die Funktion des Muskels; er führt zu einer Beugung im Handgelenk, sowie eine Opposition im Daumensattelgelenk und eine Flexion im Daumengrund- und Endgelenk (2, 4, 6).

Die letzte Schicht besteht aus dem M. pronator quadratus (h) und stellt somit die tiefste Schicht der Flexorengruppe dar (**Abbildung 4**) (4, 8). Dieser Muskel hat seinen Ursprung im distalen Viertel der Facies anterior der Ulna und setzt auf der gegenüberliegenden Seite des distalen Radius an der Facies anterior an (2, 4). Er liegt somit unter den langen Beugemuskeln und dient, wie der Name sagt, der Pronation des Unterarms (2, 8). Zudem verbindet er Radius und Ulna miteinander und sichert die Art. radioulnaris distalis (2, 4).

### 1.2.2.2 Radiale Unterarmmuskulatur – brachioradiale Muskelgruppe



**Abbildung 5:** Radiale Unterarmmuskulatur - brachioradiale Muskelgruppe in Anlehnung an Paulsen F, Waschke J. Sobotta – Atlas der Anatomie des Menschen, 2010, Seite 180 (8) © Patricia Hrastrnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture  
(a) *M. brachioradialis* (b) *M. Extensor carpi radialis longus*; (c) *M. Extensor carpi radialis brevis*

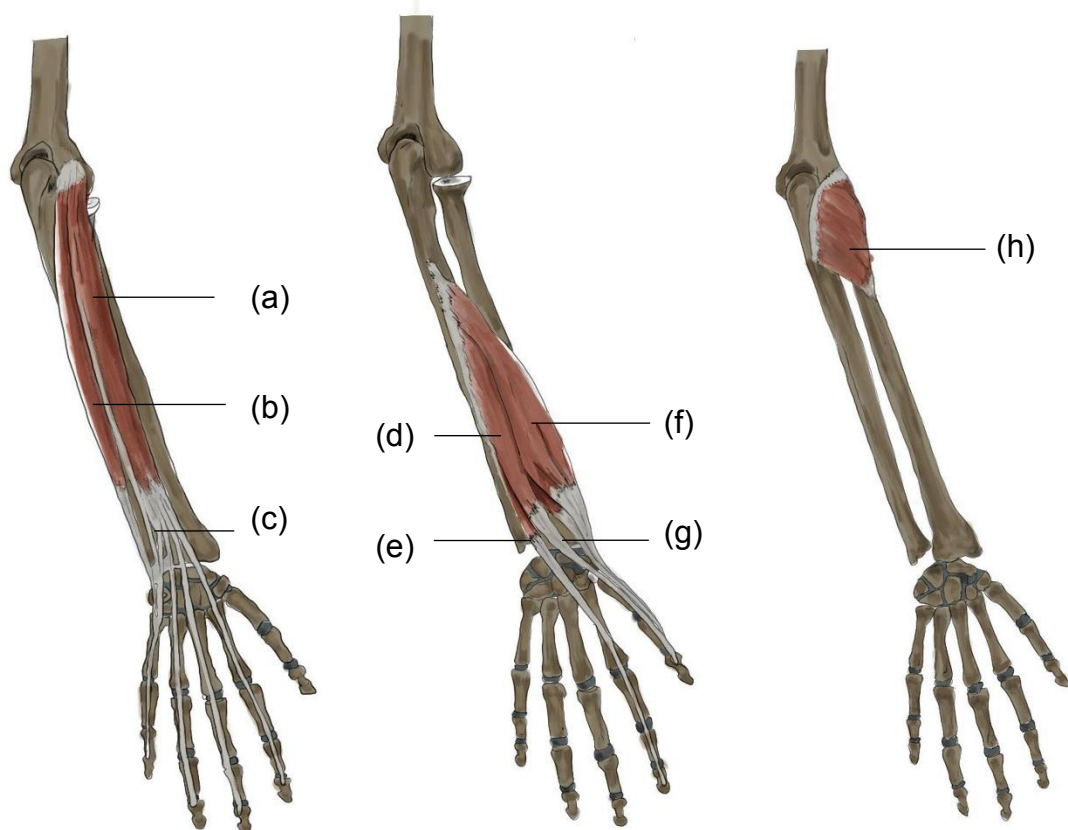
Die brachioradiale Unterarmmuskulatur enthält drei Muskeln, die vor der Transversalebene der *Articulatio cubiti* auf der lateralen Seite des Humerus entspringen (8). Von proximal nach distal gehören der *M. brachioradialis* (a), sowie die *Mm. extensor carpi radialis longus* (b) und *brevis* (c) dazu (**Abbildung 5**) (8).

Auf der lateralen Seite des distalen Humerus und dem *Septum intermusculare laterale* sind die Ursprungsorte des *M. brachioradialis* (a) zu finden (2). Als Ansatz dient die *Facies lateralis proximal* des *Proc. styloideus radii* (2, 4). Hierdurch ist dieser Muskel bei proniertem Arm für eine Flexion im Ellenbogengelenk, aber auch für die Semipronationsstellung verantwortlich (2, 4). So fungiert er bei der Pronation als Supinator und bei der Supination als Pronator (2, 4).

Weiter distal entspringt der M. extensor carpi radialis longus (b) auf der lateralen Seite des Humerus, im Bereich des Epicondylus lateralis sowie am Septum intermusculare laterale (2, 4). Dieser Muskel zieht bis zur dorsalen Seite an der Basis des Os metacarpale II (2, 4). Die Funktion ist in der Articulatio cubiti eine schwache Flexion, sowie im Handgelenk eine Dorsalextension und Radialabduktion (2, 4, 6).

Bei dem letzten Muskel dieser Gruppe handelt es sich um den M. extensor carpi radialis brevis (c). Dieser hat seinen Ursprung am Epicondylus lateralis humeri (2, 4), dem Lig. collaterale radialis und dem Lig. anulare radii (4). Sein Ansatz befindet sich an der Basis des Os metacarpale III auf der dorsalen Seite (2, 4). Der Muskel hat die gleiche Funktion wie der M. extensor carpi radialis longus (b) (2, 4).

### 1.2.2.3 Dorsale Unterarmmuskulatur – Extensorengruppe



**Abbildung 6:** Dorsale Unterarmmuskulatur – Extensorengruppe in Anlehnung an Paulsen F, Waschke J. Sobotta – Atlas der Anatomie des Menschen, 2010, Seite 180 (8) © Patricia Hrastrnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

(a) M. extensor digitorum; (b) M. extensor carpi ulnaris; (c) M. extensor digiti minimi; (d) M. extensor pollicis longus; (e) M. extensor indicis; (f) M. abductor pollicis longus; (g) M. extensor pollicis brevis; (h) M. supinator

Die dorsale Extensorengruppe kann in eine oberflächliche und eine tiefe Schicht eingeteilt werden (**Abbildung 6**) (4, 8). In der Literatur wird der M. anconeus teilweise auch zu dieser Gruppe gezählt (4), in anderen Lehrbüchern wird dieser Muskel bei den Oberarmmuskeln aufgelistet (2, 8).

Zu den oberflächlichen Streckern zählen, ausgehend von radial nach ulnar, der M. extensor digitorum (a), der M. extensor digiti minimi (c) und der M. extensor carpi ulnaris (b) (**Abbildung 6**) (8).

Der Ursprung des M. extensor digitorum (a) ist am Epicondylus lateralis des Humerus, dem Lig. collaterale radiale und dem Lig. anulare radii zu finden (4). Von hieraus zieht der Muskel nach distal und bildet die Dorsalaponeurose der Finger II-V (2, 4). Es ergibt sich die Funktion der Dorsalextension im Handgelenk, sowie der Streckung der Digg. II-V im Grund-, Mittel- und Endgelenk und ermöglicht das Abspreizen der Finger (2, 4, 6).

Der M. extensor digiti minimi (c) entspringt ebenfalls am Epicondylus lateralis humeri und der Muskel ist eng mit dem M. extensor digitorum (a) verbunden (4). Der Muskel ist an der Dorsalaponeurose des fünften Fingers beteiligt (4). Er führt zur Dorsalextension und Ulnarabduktion im Handgelenk. (2, 4). Am fünften Finger dient der Extensor zur Abspreizung sowie Streckung in Grund-, Mittel- und Endgelenken (2, 4).

Auch der M. extensor carpi ulnaris (b) hat seinen Ursprung am Epicondylus lateralis humeri, dem Lig. collaterale radiale, dem Lig. anulare radii und mit seinem Caput ulnare auf der Dorsalseite der Ulna (2, 4). Er setzt distal an der Basis des Os metacarpale V an und fungiert als Dorsalextensor und Ulnarabduktor im Handgelenk (2, 4, 6).

In der tiefen Schicht der Extensorengruppe sind fünf Muskeln inbegriffen, der M. supinator (h), der M. abductor pollicis longus (f), die Mm. extensor pollicis brevis (g) und longus (d), sowie der M. extensor indicis (e) (**Abbildung 6**) (2, 4, 8).

Proximal befindet sich der Hauptmuskel für die Supination, der M. supinator (h) (4). Er entspringt am Olecranon der Ulna, der Crista musculi supinatoris, am Epicondylus lateralis humeri, am Lig. collaterale radiale und dem Lig. anulare radii (4). Dieser Muskel zieht schraubenförmig um den Radius, an dem er schließlich zwischen der Tuberositas radii und dem Ansatz des M. pronator teres endet (2, 4).

Auf der dorsalen Fläche von Ulna, Radius und der Membrana interossea antebrachii ist der Ursprung des M. abductor pollicis longus (f) zu finden (2). Sein

Ansatz liegt radial an der Basis des Os metacarpale I und Os trapezium (2, 4). Funktionell ist dieser Muskel für die Flexion und Radialabduktion im proximalen Handgelenk sowie die Abduktion und Extension im Daumensattelgelenk zuständig (2, 4, 6).

Nachfolgend ist der M. extensor pollicis brevis (g) zu erwähnen. Er beginnt an der Fascia posterior des Radius und der dorsalen Seite der Membrana interossea antebrachii (2, 4). Dieser Muskel setzt an der Basis des Grundphalanx des Daumens an und dient zur Radialabduktion im proximalen Handgelenk und Extension im Daumensattel- und Grundgelenk (2, 4, 6).

Annähernd parallel dazu verläuft der M. extensor pollicis longus (f), der seinen Ursprung auf der Dorsalseite der Ulna und der Membrana interossea antebrachii aufweist (2, 4). Dieser Muskel zieht jedoch weiter nach distal und endet an der Basis der Endphalanx des Daumens, wobei das Tuberculum dorsale radii als Hypomochlion dient (2, 4). Er weist mehrere Funktionen auf; hierzu zählen die Dorsalextension und Radialabduktion im Handgelenk, sowie die Adduktion im Daumensattelgelenk und die Extension im Grund- und Endgelenk des Daumens (2, 4).

Als letzter Extensor der dorsalen Muskelgruppe ist noch der M. extensor indicis (e) zu nennen (6). Er hat den gleichen Ursprungsort wie der M. extensor pollicis longus (f), befindet sich aber weiter distalwärts von diesem (4). Er bildet die Dorsalaponeurose des zweiten Fingers (2, 4). Zu seiner Funktion gehört die Dorsalextension im Handgelenk und die Extension der Gelenke des Zeigefingers, wodurch eine isolierte Streckung dieses Fingers ermöglicht wird (2, 4).

### **1.2.3 Blutversorgung des Unterarms**

Die Blutversorgung der oberen Extremität wird ausgehend von der Arteria (A.) subclavia gewährleistet (4). Diese setzt sich weiter in die A. axillaris und anschließend in die A. brachialis fort, um den Oberarm zu versorgen (4). Die A. brachialis verläuft gemeinsam mit dem Nervus (N.) medianus im Sulcus bicipitalis medialis und zieht von der medialen Seite des Oberarms aus in die Ellenbeuge (4, 8). Hier bildet die Oberarmarterie ihre Endäste, die A. radialis und in die A. ulnaris (6, 8). Teilweise wird in der Literatur beschrieben, dass die A. brachialis in der Ellenbeuge die A. radialis abgibt und sich danach in ihre Endäste der A. ulnaris und A. interossea communis aufspaltet (2).

In der Ellbogenregion werden aus den Kollateralarterien und den Recurrensarterien das Rete articulare cubiti, ein arterielles Gefäßnetz als Kollateralkreislauf gebildet (4). Die vier Kollateralarterien, die in das Rete münden entspringen am Oberarm direkt aus der A. brachialis oder der A. profunda brachii (4). Es handelt sich hierbei um die Aa. collaterales media, radialis, ulnaris superior und ulnaris inferior (4). Die Recurrensgefäße setzen sich aus den Aa. recurrentes radialis und ulnaris, sowie der A. interossea recurrens zusammen (4, 8).

Die Gefäße des Unterarms ziehen entlang ihrer Leitstrukturen nach distal Richtung Hand und geben auf diesem Weg Äste zur Versorgung ab (4).

### **1.2.3.1 Arteria radialis**

Die A. radialis wird meist gemeinsam mit der A. ulnaris als Fortsetzung der A. brachialis angesehen (8). Sie beginnt in der Ellenbeuge, ungefähr auf der Höhe des Radiushalses und folgt in ihrem Verlauf zwischen den Muskeln der brachioradialen Muskelgruppe des Unterarms dem Radius nach distal (2).

Noch in der Fossa cubitalis gibt die A. radialis die A. recurrens radialis ab, die unter anderem gemeinsam mit der A. recurrens ulnaris und der A. interossea recurrens als rückläufige Gefäße das Rete articulare cubiti speisen (6).

Die A. radialis liegt im proximalen Drittel zwischen dem M. pronator teres und dem M. brachioradialis und verläuft weiter distal zwischen dem M. brachioradialis und dem M. flexor carpi radialis (4). Das Gefäß verläuft hierbei zwischen diesen Muskeln bis zum Handgelenk und gibt einige Äste ab (4).

Zur Versorgung des Radius entspringt die A. nutricia radii aus der A. radialis und zieht über die Foramina nutricia in den Knochen ein (4). Zudem gibt die A. radialis Äste zur Versorgung der Unterarmmuskulatur ab (4, 6).

Distal, kurz vor dem Retinaculum flexorum, zieht ein kleiner Ast im Bereich des Canalis carpi aus der A. radialis, der Ramus carpalis palmaris (4). Dieser Ast verläuft zum Rete carpale palmare (4, 6).

Im Bereich des Handgelenks zieht die A. radialis durch die Fovea radialis, auch Tabatière genannt, auf die dorsale Seite der Hand und von hier aus weiter zwischen den Basen der Ossa metacarpalia I und II nach palmar (6). In der Hohlhand bildet die A. radialis als Hauptblutstrom gemeinsam mit dem tiefen Ast der A. ulnaris den Arcus palmaris profundus (6, 8). Von diesem tiefen Hohlhandbogen ausgehend anastomosieren drei bis vier Arteriae (Aa.) metacarpales palmares mit den Aa. digitales palmares communes aus dem oberflächlichen Hohlhandbogen (6, 8). Der

Arcus palmaris superficialis wird aus der Anastomose des Ramus (R.) palmaris superficialis der A. radialis und dem Endast der A. ulnaris als Hauptzufluss gebildet (8). Dieser oberflächige, nicht immer geschlossene Hohlhandbogen liegt zwischen der Palmaraponeurose und den Beugesehnen (4, 6). Er dehnt sich weiter als der Arcus palmaris profundus nach distal aus und gibt die Aa. digitales palmares communes zur Versorgung der Phalangen ab (4, 6, 8).

Der R. carpalis dorsalis der A. radialis bildet mit Ästen des R. carpalis dorsalis der A. ulnaris und A. interossea anterior sowie posterior das Rete carpalis dorsalis (4). Dieser Ast entspringt auf der dorsalen Seite der Handwurzelknochen aus der A. radialis (4). Er gibt die Gefäße zur Versorgung der Finger, die Aa. metacarpales dorsales II-V ab (4). Die A. metacarpalis dorsalis I und die A. princeps pollicis werden direkt aus der A. radialis abgegeben und sind für die Versorgung des Daumens zuständig (4, 6). Ein weiterer Ast stellt die A. radialis indicis dar, der sich bis zur radialen Seite des zweiten Fingers erstreckt (4, 6, 8).

### **1.2.3.2 Arteria ulnaris**

Auch die A. ulnaris entspringt aus der A. brachialis im Bereich der Ellenbeuge (2). Sie verläuft proximal unter dem M. pronator teres (2). Die A. recurrens ulnaris zweigt sich noch in der Fossa cubitalis ab, um einen Teil des Rete articulare cubiti zu bilden (4). Hierbei zieht der R. anterior vor dem Epicondylus medialis und der R. posterior hinter dem Epicondylus medialis in Richtung Rete articulare cubiti (4, 6).

Im weiteren Verlauf zieht die A. ulnaris zwischen den oberflächlichen und tiefen Flexoren des Unterarms auf der ulnaren Seite nach distal (4). An ihrem proximalen Anteil gibt sie die wichtige A. interossea communis ab, die der Membrana interossea nach distal folgt (4). Zudem gibt die A. ulnaris proximal einen Ast, die A. nutricia ulnae, zur Versorgung der Ulna ab (6). Die A. ulnaris selber zieht begleitend mit dem N. ulnaris unterhalb vom M. flexor carpi ulnaris als Leitmuskel Richtung Handgelenk (4, 8).

Die A. ulnaris gibt den R. carpalis dorsalis ab, der Richtung Dorsalseite der Hand verläuft und in das Rete carpale dorsale mündet (2, 4). Zudem entspringt aus der A. ulnaris auf der palmaren Seite der R. carpalis palmaris, der zusammen mit dem R. carpalis palmaris arteriae radialis durch eine Anastomosenbildung das Rete carpale palmare bildet (2, 4, 6).

In ihrem Verlauf gelangt die A. ulnaris zwischen das Retinaculum flexorum auf ihrer dorsalen und dem Lig. carpi palmare auf der palmaren Seite (4, 6). Sie verläuft

in der Guyon-Loge zwischen dem Os pisiforme und dem Hamulus ossis hamati (6). Hier entspringt der R. palmaris profundus, der in die tiefe Hohlhand zieht und gemeinsam mit dem Endast der A. radialis den Arcus palmaris profundus bildet (4, 6, 8).

Der Endast der A. ulnaris bildet den Arcus palmaris superficialis, den oberflächlichen Hohlhandbogen (4, 8). Dieser wird auch spärlich vom R. palmaris superficialis der A. radialis gespeist (6). Ausgehend von diesem Arcus werden die Finger versorgt (6, 8).

### **1.2.3.3 Arteria interossea communis**

Die A. interossea communis entspringt am proximalen Anteil der A. ulnaris und zieht zur Membrana interossea antebrachii (6).

Die Arterie teilt sich in die A. interossea anterior und in die A. interossea posterior (4). Erstere folgt der Membrana auf der ventralen Seite nach distal und wird hier auf ihrem Weg vom N. interosseus antebrachii anterior begleitet (6). Beide Strukturen liegen hierbei unter dem M. flexor digitorum profundus (6). Auf der Höhe des M. pronator quadratus tritt die Arterie durch die Membrana interossea auf die dorsale Seite, um schließlich im Rete carpale dorsale zu münden (4, 6).

Die A. interossea posterior dringt direkt zu Beginn durch die Membrana interossea antebrachii durch und verläuft mit dem R. profundus des N. radialis auf der dorsalen Seite der Membrana nach distal (4, 6). Sie mündet schließlich in das Rete carpale dorsale (4, 6).

Die A. interossea posterior gibt proximal zu Beginn ihres Verlaufs einen rückläufigen Ast ab, die A. interossea recurrens (4, 6). Diese zieht lateral des Olecranon unterhalb des M. anconeus zurück, in Richtung Rete articulare cubiti (4, 6, 8).

### **1.2.3.4 Venae membri superioris**

Der venöse Abfluss der oberen Extremität besteht aus zwei Systemen, wodurch das Blut zentralwärts abgeleitet wird (4, 8). Hierzu gehören die Venae (Vv.) superficiales membri superiores, die das oberflächliche Abflusssystem darstellen (4, 8). Das tiefe Abflusssystem wird durch die Vv. profundae membri superiores gebildet (4, 8). Venenklappen verhindern das Zurückfließen des Blutes innerhalb dieser Gefäße (4). Außerdem gehören zu dem venösen System die Rr. perforantes, welche die oberflächlichen und tiefen venösen Gefäße miteinander verbinden (4).

Das oberflächliche Venensystem kann variabel verlaufen (4). Im Bereich der Hand gibt es ein dorsales Gefäßnetz, das epifasziale Rete venosum dorsale manus (6), aus dem die beiden Hauptstämme, die Vena (V.) cephalica antebrachii auf der radialen Seite und die V. basilica antebrachii auf der ulnaren Seite entstehen (2, 4, 6). Teilweise sind zusätzlich eine V. mediana antebrachii oder eine V. cephalica accessoria antebrachii zu finden (4). Die V. mediana antebrachii sammelt das Blut der Flexorenseite des Unterarms und zieht in der Ellenbeuge am häufigsten in die V. mediana cephalica und in die V. mediana basilica (2). Der Arcus venosus palmaris superficialis liegt auf der palmaren Seite der Hand und sammelt das venöse Blut der Vv. digitales palmares (2, 4, 6).

Im Bereich der Ellenbeuge verbindet die variabel verlaufende V. mediana cubiti die Hauptvenen des Unterarms (4). Diese Vene verläuft von radial, distal nach ulnar, proximal (4, 8). Am Oberarm wird das oberflächliche, venöse Blut über die V. basilica und die V. cephalica Richtung Stamm abgeleitet (2, 4, 9).

Gleichnamige Venen der bereits genannten Arterien des Unterarms begleiten die arteriellen Gefäße auf ihrem Weg und stellen das tiefe venöse Abflusssystem dar (4, 8). Sie verlaufen gemeinsam mit den Arterien in einer Gefäßscheide (4). Die Venen sind hierbei meist paarig angelegt und weisen zahlreiche Anastomosen auf (4). In den Arcus palmaris profundus münden die Vv. metacarpales palmares (2). Weitere wichtige Vv. profundae membri superiores des Unterarms sind die Vv. interossee anteriores und posteriores, die Vv. radiales und die Vv. ulnares (2, 8). In der Ellenbeuge mündet das Blut der tiefen venösen Gefäße in die Vv. brachiales, die den Abtransport am Oberarm weiter Richtung Stamm führen (2, 4, 6, 8).

Die venösen Gefäße haben zahlreiche Verbindungen untereinander und weisen hierdurch ein sehr engmaschiges Geflecht auf (4, 6).

#### **1.2.3.5 Vasa lymphatica**

Das Lymphsystem der oberen Extremität weist ein stark verflochtenes Netz aus Lymphgefäßen auf (4). Auch hier kann zwischen einem oberflächlichen, den Vasa lymphatica superficialia und einem tiefen System, den Vasa lymphatica profunda unterschieden werden (2, 4). Diese beiden Systeme stehen über zahlreiche Anastomosen miteinander in Verbindung (2, 4).

Das oberflächliche Lymphsystem beginnt an der Hand und bildet hier ein Netzwerk, aus dem sich am Unterarm größere Lymphgefäße entwickeln (4). Diese ziehen epifaszial als radiales, mediales und ulnares Bündel im Bereich der

Hauptvenen des Unterarms, der V. cephalica und der V. basilica Richtung Ellenbeuge (4). Oft befinden sich in diesem Bereich Lymphknoten, die Nodi (Nll.) cubitales superficiales und die Nll. supratrochleares (4). Die Lymphgefäße verlaufen anschließend am Oberarm entlang zu den Nll. axillares superficiales (4). Die dorsolateralen Lymphgefäße folgen der V. cephalica Richtung Trigonum deltoideopectorale (4, 8).

Die tiefen Lymphgefäße verlaufen am Unterarm mit den Arterien und tiefen Venen bis zur Ellenbeuge (4). Hier befinden sich oft die Nll. cubitales profundi (4). Von hier aus begleiten die Lymphgefäße den Gefäßnervenstrang im Sulcus bicipitalis medialis am Oberarm bis zu den Lymphknotensystem der Achselhöhle (4).

#### **1.2.4 Innervation des Unterarms**

Die Innervation der oberen Extremität erfolgt ausgehend vom Plexus brachialis (4). Dieser setzt sich durch die Rami anteriores der Spinalnerven der unteren cervicalen und oberen thorakalen Rückenmarksegmente C5 bis Th1 zusammen (4, 8, 9). Die Fasern aus den verschiedenen Segmenten vereinigen sich zu drei Trunci, die in Etagen eingeteilt werden (8). Diese sind lateral der Skalenuslücke, sowie oberhalb der Clavicula lokalisiert (2). Sie werden auch als Primärstränge bezeichnet (2). Der Truncus superior entsteht durch die Vereinigung der Fasern der Segmente C5 und C6 (4, 9). Der Truncus medius wird aus C7 gebildet und der Truncus inferior wird aus den Fasern C8 und Th1 gebildet (4, 9).

Die Trunci teilen sich wiederum dorsal der Clavicula auf und bilden insgesamt sechs Divisiones (2). Diese beinhalten drei Divisiones anteriores, die den vorderen Anteil und drei Divisiones posteriores, die den hinteren Anteil bilden (4). Die Sekundärstränge, sogenannte Fasciculi entstehen auf dem Weg Richtung Axilla, dorsal des M. pectoralis minor (2). Diese werden anhand ihrer Lage zur A. axillaris benannt (2, 4, 8). Der Fasciculus posterior enthält die dorsalen Anteile der drei Trunci superior, medius und posterior (8). Hier ziehen somit Fasern aus allen Rückenmarkssegmenten C5 bis Th1 ein (8). Die Divisiones anteriores der Trunci superior und medius vereinigen sich zum Fasciculus lateralis (2, 4). Dieser enthält demnach Fasern aus den Rückenmarkssegmenten C5 bis C7 (2, 4, 8). Der Fasciculus medialis setzt sich aus den vorderen Anteilen des Truncus inferior zusammen (4, 8). Dieser liegt medial der A. axillaris und beinhaltet Fasern aus C8 und Th1 (2, 8, 9).

Der Plexus brachialis lässt sich topographisch bezüglich seiner Lage zur Clavicula in zwei Teile gliedern, der Pars supraclavicularis und der Pars infraclavicularis (2, 4, 8). Der oberhalb der Clavicula lokalisierte Teil des Plexus brachialis setzt sich aus den Trunci und seinen hier ausgehenden Nerven beziehungsweise den direkt aus den Spinalnerven entspringenden Nervenfasern zusammen (8). Zu den Nerven der Pars supraclavicularis gehören die Rr. musculares der Nerven für die Muskeläste des Mm. scaleni und des M. longus colli, sowie der N. dorsalis scapulae, der N. thoracicus longus, der N. suprascapularis und der N. subclavius (2, 8, 9).

Als infraclavikulärer Teil wird der Teil unterhalb der Clavicula bezeichnet (2, 8). Dieser setzt sich aus den Fasciculi zusammen, woraus sich die großen Nervenstämme der oberen Extremität entwickeln (2, 8).

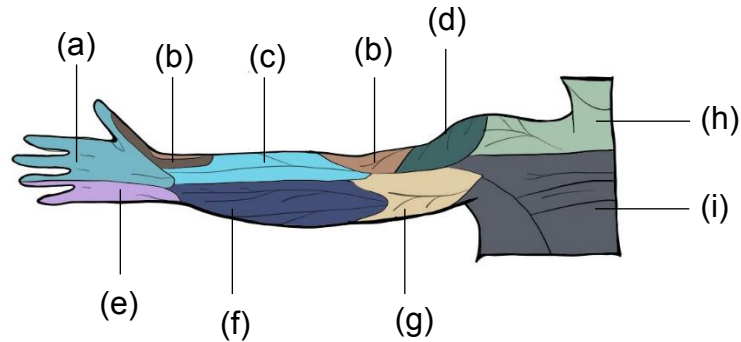
Aus dem Fasciculus posterior entspringen der N. radialis und der N. axillaris (2, 8). Zudem können sich hieraus der N. subscapularis und der N. thoracodorsalis entwickeln (2, 8).

Folgende Nerven gehen aus dem Fasciculus lateralis hervor: Der N. musculocutaneus, sowie die Radix lateralis des N. medianus. Des Weiteren kann der N. pectoralis lateralis in diesem Bereich entstehen (2, 4, 8).

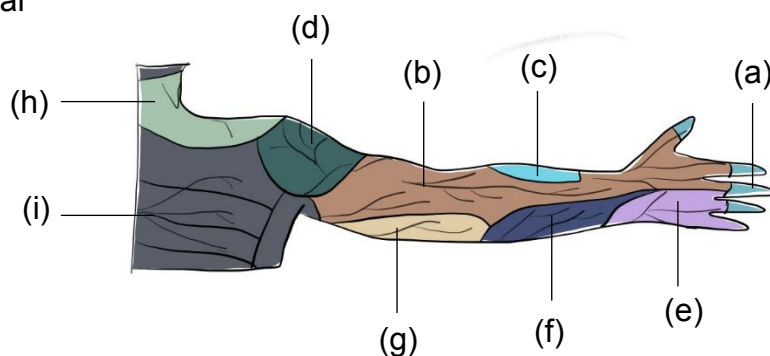
Die Radix medialis des N. medianus, sowie der N. ulnaris, der N. cutaneus brachii medialis und der N. cutaneus antebrachii medialis bilden sich aus dem Fasciculus medialis (2, 8). Aber auch die Nervenfasern des N. pectoralis medialis entwickeln sich im Bereich dieses Faszikels (2, 8).

Jedoch können einige Nerven bereits im supraklavikulären Anteil des Plexus brachialis abzweigen (4). Hierzu gehören beispielsweise der N. subscapularis, der N. thoracodorsalis und die Nn. pectorales (4).

## 1. ventral



## 2. dorsal



**Abbildung 7:** Sensible Innervationsgebiete der oberen Extremität: 1. von ventral und 2. von dorsal in Anlehnung an Paulsen F, Waschke J. Sobotta – Atlas der Anatomie des Menschen, 2010, Seite 196 (8) © Patricia Hrastnik M.A.

Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

(a) N. medianus; (b) N. radialis; (c) N. cutaneus antebrachii lateralis (N. musculocutaneus); (d) N. axillaris; (e) N. ulnaris; (f) N. cutaneus antebrachii medialis; (g) N. cutaneus brachii medialis; (h) Nn. supraclaviculares; (i) Nn. intercostales

### 1.2.4.1 Nervus radialis

Der aus dem Fasciculus posterior entspringende N. radialis ist für die motorische Innervation der Extensoren des Oberarms, sowie für die radialen und dorsalen Muskeln des Unterarms verantwortlich (4, 8). Das sensible Versorgungsgebiet des N. radialis erstreckt sich von der Streckseite des Ober- und Unterarms bis hin in Richtung Hand (4). Hier versorgt er die radiale Seite des Dorsum manus, den Daumen, den Zeigefinger und die radiale Hälfte des Mittelfingers (4). Ausgenommen sind die Mittel- und Endglieder dieser Phalangen (4). Das sensorische Autonomiegebiet des N. radialis ist der erste Fingerzwischenraum (8).

Der N. radialis enthält Fasern der Rückenmarkssegmente C5 bis Th1 (8, 9). In seinem Verlauf am Oberarm windet sich der Nerv im Canalis n. radialis um den

Humerus nach distal (4, 8). Bei dieser schraubenförmigen Windung um den Knochen wird der Nerv von der A. profunda brachii begleitet (4, 8, 9). Hierbei gibt der N. radialis einige Äste zur motorischen und sensiblen Innervation ab (8, 9). Der Nerv zieht Richtung distal vor dem Epicondylus lateralis weiter Richtung Ellenbeuge (9). Hier liegt er im Radialistunnel, zwischen dem M. brachioradialis und M. brachialis und verläuft von lateralwärts in die Ellenbeuge (8). In der Regio cubiti anterior teilt sich der Nerv in zwei Teile, den Ramus superficialis und den Ramus profundus (4, 9). Vor der Teilung gibt er noch Äste zur Innervation der brachioradialen Muskelgruppe ab (8).

Der Ramus superficialis ist für die sensible Innervation verantwortlich (8). Er verläuft in der radialen Gefäß-Nerven-Straße (6) zusammen mit der A. radialis unter seinem Leitmuskel, dem M. brachioradialis (4, 8). In seinem weiteren Verlauf zieht der Ramus superficialis im distalen Bereich des Unterarms auf die dorsale Seite, um anschließend als Hautast sein sensorisches Innervationsgebiet am radialen Handrücken und den radialen zweieinhalb Fingern zu erreichen (2, 6, 8).

Der zweite Ast des N. radialis, der Ramus profundus durchdringt den oberflächlichen Anteil des M. supinator und zieht zwischen diesem und dem tiefen Teil des Muskels, im sogenannten Supinatorkanal (6). Dieser verläuft am proximalen Radius auf die Rückseite des Unterarms (4, 6). Hier entspringen die Nervenäste zur motorischen Innervation der Extensoren des Unterarms (4, 6, 8). Der N. interosseus antebrachii posterior bildet den Endast des Ramus profundus des N. radialis (4). Dieses Nervenende zieht gemeinsam mit der A. interossea posterior auf der Rückseite der Membrana interossea antebrachii nach distal und ist für die Innervation der Dorsalseite der Handgelenke verantwortlich (**Abbildung 7**) (4, 6, 8).

Durch Verletzungen und/oder chronische Druckeinwirkungen des N. radialis kann es zu typischen klinischen Zeichen kommen (2). Es wird zwischen proximaler, mittlerer und distaler Nervenläsion unterschieden (2).

Proximale N. radialis Läsionen entstehen im Verlauf von der Axilla bis zu dem Verlauf im Sulcus n. radialis (2, 8). Hierbei kommt es zu dem klinischen Bild der „Fallhand“ je nach Höhe der Läsion mit oder ohne Beteiligung des M. triceps brachii und Sensibilitätsstörungen (2).

Als mittlere N. radialis Läsionen werden Läsionen bezeichnet, die sich im Bereich des Humerusschafts bis zur Ellenbeuge erstrecken (2, 8). Bei einer

Lokalisation im Bereich des Humerusschafts ist das Bild einer „Fallhand“, sowie einem Defizit der Fingerstreckung und Störung der Supination mit zusätzlichen Sensibilitätsstörungen zu beobachten (8). Bei einer isolierten Läsion des R. profundus n. radialis kommt es zu einer Abschwächung des Faustschlusses. Eine „Fallhand“ und Sensibilitätsstörungen treten nicht auf (8).

Distale Läsionen des R. superficialis des N. radialis entstehen im Bereich der Handgelenke. Hier kommt es zu sensorischen Defiziten, motorische Ausfälle treten nicht auf (8).

Bei distalen Läsionen des R. profundus fehlt das typische Bild der Fallhand und Sensibilitätsstörungen (2). Hierbei treten Defizite der Motorik der Fingerextension auf (2).

#### **1.2.4.2 Nervus medianus**

Das Versorgungsgebiet des N. medianus beinhaltet die Flexoren des Unterarms mit Ausnahme des M. flexor carpi ulnaris und den ulnaren Anteil des M. flexor digitorum profundus (4). Zudem ist dieser Nerv mit dem Ramus thenaris für die Innervation einiger Daumenballenmuskeln und der Mm. lumbricales I und II verantwortlich (4). Die sensorische Innervation umfasst die Haut über der palmaren Handwurzel, Palma manus und der Flexoreenseite der radialen dreieinhalb Finger (4). Hiermit sind der Daumen, der Zeige- und Mittelfinger, sowie die radiale Seite des Ringfingers gemeint (4). Das sensorische Autonomiegebiet des N. medianus befindet sich an den Endgliedern von Digg. II und III (4, 8).

Der N. medianus entwickelt sich aus der Radix lateralis und medialis aus den gleichnamigen Faszikeln (4, 8, 9). Zur Vereinigung der beiden Wurzeln umschlingen sie die A. axillaris und bilden hierdurch vor der Arterie die Medianusgabel (4, 9). Somit umfasst der N. medianus die Rückenmarkssegmente C6 bis Th1 (8, 9). Der Nerv verläuft am Oberarm zusammen mit der A. brachialis im Sulcus bicipitalis medialis distalwärts (2, 8, 9). Während seinem Verlauf im Sulcus gibt der N. medianus keine Äste ab (8). Er gelangt von der medialen Seite in die Ellenbeuge und zieht vor dem Epicondylus medialis humeri entlang (8).

Der weitere Verlauf des Nervs erstreckt sich weiter Richtung distal (8). Er gelangt unterhalb des Lacertus fibrosus, der Aponeurosis bicipitalis (2, 9) und tritt radial zwischen die Köpfe des M. pronator teres, dem Caput humerale und dem Caput mediale hindurch (6, 8). Dieser Tunnel wird als Pronatorschlitz oder Medianustunnel bezeichnet (4). Im Anschluss befindet sich der Nerv in der Mitte

des Unterarms zwischen den oberflächlichen und tiefen Flexoren in einem Verschieberaum, der Medianusstraße (6, 8). Somit ist der Nerv auf seinem Weg am Unterarm entlang zwischen den Mm. flexores digitorum superficialis und profundus lokalisiert (2).

Beim Erreichen des Unterarms entspringt aus dem N. medianus der N. interosseus antebrachii anterior, der begleitet von der A. interossea anterior auf der vorderen Seite der Membrana interossea antebrachii nach distal bis zum M. pronator quadratus verläuft (4, 6). Dieser schmale Nerv innerviert die tiefen Unterarmmuskeln, den M. flexor pollicis longus, den M. pronator quadratus und den radialen Anteil des M. flexor digitorum profundus (4).

Der N. medianus selbst bleibt in der Medianusstraße, entlang seines Leitmuskels, dem M. flexor carpi radialis (4, 6). Er gibt Rr. musculares für die Innervation der Flexoren des Unterarms ab; dem M. pronator teres, dem M. flexor carpi radialis, dem M. palmaris longus und dem M. flexor digitorum superficialis (2, 4). Zusätzlich entlässt der Stammnerv am distalen Unterarm den sensiblen R. palmaris, der über das Retinaculum flexorum verläuft und in die Hohlhand mündet (6). Er gibt einen R. communicans cum nervo ulnari ab, durch den eine nervale Verbindung zwischen dem N. medianus und dem N. ulnaris entsteht (4). Im Bereich des Handgelenks gelangt der N. medianus zwischen die Sehnen des M. flexor digitorum durch den Canalis carpi hindurch (4, 6). Hier liegt der Nerv direkt unterhalb des Retinaculum musculorum flexorum, dem Lig. Carpi transversum (4, 6, 8).

Im Canalis carpi verzweigt sich der N. medianus in die drei Nn. digitales palmares communes, die die Rr. musculares abgeben (8). Diese Muskeläste versorgen die Mm. lumbricales I und II und zerfallen in sensorische Anteile (4). Die Endäste innervieren die palmare Seite der radialen dreieinhalb Finger und zusätzlich die Dorsalseite der Endglieder dieser Finger (**Abbildung 7**) (4). Die motorische Innervation der Thenarmuskeln erfolgt mit ein paar wenigen Ausnahmen über den Ramus thenaris des N. medianus (2, 4, 8).

Auch beim N. medianus kann es zu Läsionen kommen, die in proximale und distale Läsionen eingeteilt werden (2, 8). Sie entstehen beispielsweise (bspw.) durch Verletzungen oder chronische Druckeinwirkung (2, 8).

Bei der proximalen N. medianus Läsion liegt die Ursache im Sulcus bicipitalis medialis oder im Verlauf weiter Richtung Ellenbeuge (2, 8). Hierdurch entwickelt sich das typische Bild einer „Schwurhand“ (2). Zudem kommt es zu

Sensibilitätsausfällen im Innervationsgebiet des N. medianus (8). Auch ein positives Flaschenzeichen ist zu beobachten (2). Dies bedeutet, dass aufgrund der Muskelschwäche eine Flasche nicht mehr gehalten werden kann (2).

Die Ursachen der distalen Läsionen sind im Bereich des Handgelenks lokalisiert, typischerweise im Rahmen des Karpaltunnel-Syndroms (2, 8). Es treten Sensibilitätsstörungen auf der Palmarseite der dreieinhalb Finger auf (2, 8). Zudem kommt es zur sogenannten „Affenhand“, eine Adduktionsstellung des Daumens und ein positives Flaschenzeichen (2, 8).

### 1.2.4.3 Nervus ulnaris

Der N. ulnaris entwickelt sich aus dem Fasciculus medialis (8, 9). Dieser Nerv ist für die Innervation der Flexoren des Unterarms und der Hand verantwortlich, die nicht durch den N. medianus innerviert werden (4). Hierzu gehören der M. flexor carpi ulnaris, der ulnare Anteil des M. flexor digitorum profundum, die Mm. lumbricales III und IV, sowie die Mm. interossei, der M. adductor pollicis, ein Teil des M. flexor pollicis brevis und die Hypothenarmuskeln (4). Die sensorische Innervation erstreckt sich an der Haut der ulnaren Handseite, sowie eineinhalb Finger von der palmaren Seite und den ulnaren zweieinhalb Fingern dorsalseitig (**Abbildung 7**) (4). Das sensorische Autonomiegebiet des N. ulnaris befindet sich am Endglied des Digitus minimus (8).

Aus dem Fasciculus medialis kommend, zieht der N. ulnaris zusammen mit der A. brachialis im Sulcus bicipitalis medialis am Humerus entlang (4, 8). Im unteren Drittel des Oberarms tritt der Nerv durch das Septum intermusculare brachii mediale auf die Extensorenseite (2, 4, 8). Hier verläuft der N. ulnaris hinter den Epicondylus medialis im Sulcus nervi ulnaris weiter distalwärts um die Art. cubiti (2, 8). Am Oberarm entspringen keine Seitenäste des Nervs (8).

Im Anschluss kommt der Nerv von der Dorsalseite des Ellenbogens und zieht zwischen die Köpfe des M. flexor carpi ulnaris, dem Caput humerale und ulnare, hindurch und gelangt auf die antebrachiale Seite der Flexoren (4, 6).

Auf der Flexorenseite des Unterarms wird der Nerv in der ulnaren Unterarmstraße von der A. ulnaris begleitet (4, 8). Sie ziehen zusammen unterhalb des von dem N. ulnaris innervierten Leitmuskels, dem M. flexor carpi ulnaris bis zum Handgelenk (4, 8). Im distalen Drittel des Unterarms gibt der N. ulnaris einen Ast ab. Dieser R. dorsalis versorgt den ulnaren Handrücken (6, 8) und steht häufig mit dem R. superficialis des N. radialis in Verbindung (4). Der R. palmaris entspringt

proximal des Retinaculum flexorum und innerviert die Haut im Bereich des Hypothenars (4, 6, 8).

Der N. ulnaris verläuft nicht durch den Canalis carpi (2, 4). Er zieht durch die Guyon-Loge in Richtung Hohlhand (2, 6). Diese Loge wird ulnar durch das Os pisiforme und radial durch den Hamulus ossis hamati begrenzt (2, 6). Dorsal befindet sich das Retinaculum flexorum beziehungsweise das Lig. pisohamatum (2, 6). Die palmare Begrenzung stellt das Lig. carpi palmare und der M. palmaris brevis dar (2, 6). Hier verzweigt sich der Nerv in einen R. superficialis und einen R. profundus (6). Der R. superficialis dient der motorischen Innervation des M. palmaris brevis und entwickelt sich zu den Nn. digitales palmares communes (8). Diese Endäste versorgen sensibel die palmaren und auch dorsalen Seiten der ulnaren eineinhalb Finger (**Abbildung 7**) (8). Der R. profundus innerviert motorisch die Hypothenarmuskeln, die Mm. interossei, die Mm. lumbricales III und IV, sowie auch der M. adductor pollicis und den tiefen Kopf des M. flexor pollicis brevis (4, 6, 8).

Auch Läsionen des N. ulnaris können auftreten und werden durch traumatische Verletzungen oder chronischen Druck ausgelöst (2). Sie werden in proximale und distale Läsionen (2, 8), sowie teilweise mittlere Läsionen eingeteilt (2).

Störungen im Bereich des Sulcus n. ulnaris durch Druckbelastungen zählen zu den häufigsten Nervenläsionen der oberen Extremitäten (8). Hierbei treten Sensibilitätsstörungen auf (2). Auch eine „Krallhand“ ist ein typisches Symptom einer proximalen N. ulnaris-Läsion (2).

Die Lokalisation der mittleren N. ulnaris-Läsion befindet sich im Bereich des Handgelenks bzw. der Guyon-Loge (2). Diese Lokalisation wird teilweise bereits zu den distalen Läsionen gezählt (8). Auch hierbei zeigt sich das klinische Bild einer „Krallhand“ (2, 8), sowie Sensibilitätsausfälle mit Ausnahme der Hypothenarregion, da der R. palmaris intakt bleibt (2). Ein Blatt Papier kann nicht mehr zwischen Daumen und Zeigefinger gehalten werden, dieses Phänomen wird als Fromment-Zeichen bezeichnet (6).

Läsionen weiter Richtung Hand werden als distale N. ulnaris-Läsionen bezeichnet (2). Hierbei kommt es zu einer Kompression des R. profundus, beispielsweise durch häufiges Bedienen eines Presslufthammers (2). Das klinische Bild der „Krallenhand“ ohne Sensibilitätsstörungen ist zu erkennen (2).

### 1.3 Frakturklassifikation des Unterarms

Es ist wichtig, die Frakturen im Kindes- und Jugendalter von den Frakturen des Erwachsenen zu unterscheiden, da andere Behandlungskonzepte zum Einsatz kommen (11). So wurden eigene Klassifikationssysteme für kindliche Frakturen entwickelt (7, 11, 12).

#### 1.3.1 AO-Paediatric-Klassifikation

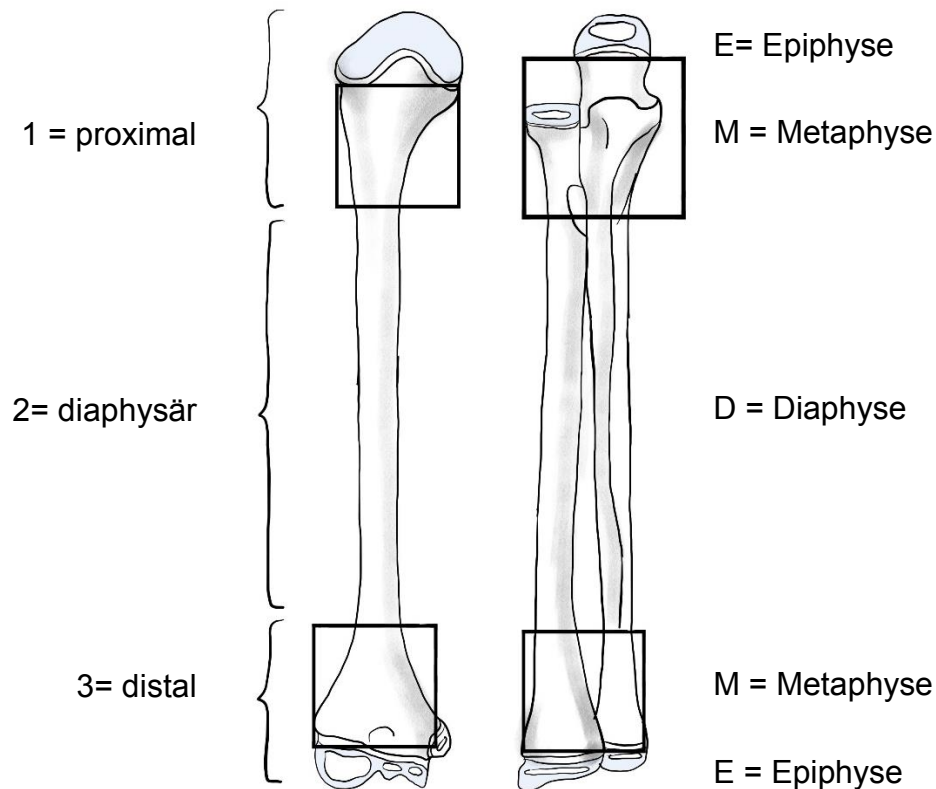
Die Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO) entwickelte eine Einteilung für Frakturen langer Röhrenknochen bei Erwachsenen, die sogenannte AO-Klassifikation (13). Dieses System wurde von Dr. Teddy Slongo und Dr. Laurent Audigé für kindliche Frakturen weiterentwickelt; die „AO-Klassifikation für Frakturen im Wachstumsalter“, im Original „Pediatric Comprehensive Classification of Long-bone Fractures“ (PCCF); hierbei werden die Besonderheiten von kindlichen Frakturen berücksichtigt (13-15).

Dieses Fraktуреinteilungssystem ordnet die Frakturen nach ihrer Lokalisation und ihrer Morphologie ein und vergibt Zahlen und Buchstaben, die einen entsprechenden Code ergeben (13). So beschreibt die erste Ziffer die anatomische Lokalisation im Skelett (betroffener Knochen) und die zweite Position das betroffene Knochensegment (Lokalisation im Knochen) (14). Bei paarig angelegten Knochen wird an dieser Stelle der betroffene Knochen bezeichnet (14). Die nächste Stelle dient zur Einteilung der Subsegmente (14). Zur morphologischen Beschreibung der Fraktur wird zunächst das Frakturmuster beschrieben und anschließend der Schweregrad der Fraktur bestimmt (14). Bei Avulsionsfrakturen wird zusätzlich die Seite der Dislokation (medial oder lateral) angegeben (14). Die letzte Stelle gibt die Seite der Dislokation der Fraktur an (**Tabelle 1**) (14, 15).

Bei der Lokalisationseinteilung wird die Fraktur zuerst hinsichtlich des betroffenen Knochens im Skelett beschrieben (15, 16). Hierbei wird an der oberen Extremität zwischen Humerus (= 1) und Unterarm (= 2), genauer zwischen Radius und Ulna, unterschieden (14, 16).

Zur genaueren Lokalisation im Knochen wird eine zweite Stelle angegeben, die den Knochen in drei verschiedene Segmente einteilt (13, 15). So kann die Fraktur proximal (= 1), diaphysär (= 2) oder distal (=3) vorliegen (14, 16). Um den distalen und proximalen Bereich einzugrenzen, wird ein Quadrat mit einer Seite entlang der Epiphysenfugen gelegt (14, 16). Bei paarig angelegten Knochen müssen beide

Epiphysenfugen der Knochen in dieses Quadrat eingefasst werden (16). Dieser Bereich stellt den Übergang zwischen Epiphyse und Diaphyse dar und wird als Metaphyse bezeichnet (**Abbildung 8**) (14, 16).



**Abbildung 8:** Einteilung der Knochen in proximal (1), diaphysär (2) und distal (3), sowie Darstellung von Epiphyse (E), Metaphyse (M) und Diaphyse (D) in Anlehnung an Slongo T, L. A, Group APC. AO Pediatric Comprehensive Classification of Long-Bone Fractures (PCCF), 2010 (16)  
© Patricia Hrastrnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

Bei Frakturen von paarig angelegten Knochen wird unterschieden, ob ein Knochen oder beide Knochen beteiligt sind (16). Bei einer Fraktur beider Knochen mit demselben Verletzungsmuster werden die paarigen Knochen als eine Einheit bezeichnet (16). So wird nur die Fraktur des Knochens angegeben, in dem das schwerere Bruchbild vorliegt (16). Wenn diese Knochen jedoch unterschiedliche Verletzungen aufweisen, muss jede Fraktur einzeln codiert werden (16). Sobald bei nur einem Knochen bei paarig angelegten Knochen eine Fraktur zu sehen ist, wird diese Fraktur mit einem Kleinbuchstaben des Knochens, beispielsweise r = Radius und u = Ulna, markiert (14, 16).

Zusätzlich wird zur genauen Lokalisationsbeschreibung der Fraktur das Subsegment angegeben (14, 16). Hierbei werden die langen Röhrenknochen in

Epiphyse (= E), Metaphyse (= M) und Diaphyse (= D) unterteilt (**Abbildung 8**) (14, 16). So entstehen das proximale Segment (= 1) mit den Subsegmenten Epiphyse und Metaphyse, das diaphysäre Segment (= 2), das aus dem Subsegment Diaphyse besteht, sowie das distale Segment (= 3), das sich wiederum aus den Subsegmenten Metaphyse und Epiphyse zusammensetzt (**Abbildung 8**) (14, 16).

Mit Hilfe der dritten Stelle des Codes wird die Morphologie der Fraktur beschrieben (16). Hierbei wird zwischen verschiedenen Frakturmustern unterschieden, die bei Kindern einen besonderen Stellenwert einnehmen (16). Epiphysäre Frakturen werden durch die Salter-Harris-Klassifikation (vgl. 1.3.3 Klassifikation nach Salter-Harris und Aitken) eingeteilt (17). Es wird zwischen Salter-Harris I bis IV (= E/1 bis E/4), sowie Tillaux (Two-plane) (= E/5), Tri-plane (= E/6), Avulsion (= E/7), Flake (= E/8) und anderen Frakturen (= E/9) unterschieden (14, 16). Metaphysäre Frakturen werden in inkomplette (= M/2), komplette (= M/3), Avulsions- (= M/7) und andere Frakturen (= M/9) eingeteilt (14, 16). Bei den diaphysären Frakturen werden Bowing-Frakturen (= D/1), Grünholzfrakturen (= D/2), komplette Querfrakturen  $<30^\circ$  (= D/4), komplette Schräg-/Spiralfrakturen  $>30^\circ$  (= D/5), Monteggia-Frakturen (= D/6), Galeazzi-Frakturen (= D/7) und andere Frakturen (= D/9) beschrieben (14, 16). Die Codes D/3 (= Toddler-Fraktur) und D/8 sind in der aktuellen Einteilung der Frakturen im Kindes- und Jugendalter nicht enthalten (16).

Zusätzlich werden zwei Schweregrade differenziert; die einfachen (= .1) und die multifragmentären (= .2) Frakturen (14, 16).

Zur genaueren Beschreibung der Abrissfrakturen M/7 und E/7 wird zudem die Seite des frakturierten Knochenanteils mit medial (= m) oder lateral (= l) angegeben (14).

Des Weiteren wird bei bestimmten Frakturen morphologisch eine Verschiebung der frakturierten Knochen aufgezeichnet, somit stellt diese letzte Ziffer eine Ausnahme dar (14, 16). Hierzu gehören die distalen Humerusfrakturen, proximalen Radiusfrakturen und proximalen Femurfrakturen (14, 16).

<b>Lokalisation</b>	<b>1. Position</b>	Lokalisation im Skelett	1 = Humerus 2 = Radius/Ulna 3 = Femur 4 = Tibia/Fibula
	<b>2. Position</b>	Lokalisation im Knochen (Segment)	1 = proximales Segment 2 = diaphysäres Segment 3 = distales Segment
	<b>3. Position</b>	Bei paarig angelegten Knochen	r = Radius u = Ulna t = Tibia f = Fibula
	<b>4. Position</b>	Subsegment	E = Epiphyse M = Metaphyse D = Diaphyse
<b>Morphologie</b>	<b>5. Position</b>	Frakturmuster	E/1 – E/9 M/2, M/3, M/7, M/9 D/1, D/2, D/4, D/5, D/6, D/7, D/9
	<b>6. Position</b>	Schweregrad	.1 = einfache Fraktur .2 = Multifragmentfraktur
	<b>7. Position</b>	Seite der Dislokation	m = medial l = lateral

**Tabelle 1:** Systematische Übersicht der AO-Klassifikation der Frakturen im Wachstumsalter, übernommen aus Slonigo T, L. A, Group APC. AO Pediatric Comprehensive Classification of Long-Bone Fractures (PCCF), 2010, Seite 4 (16)

### 1.3.2 Li-La-Klassifikation

Die „Li-La-Klassifikation für Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter“ hat sich seit einigen Jahren zur Fraktуреinteilung bei Kindern etabliert (18). Sie wurde in Zusammenarbeit vom Verein „Licht und Lachen für kranke Kinder – Effizienz in der Medizin e.V.“ (Li-La) und dem Institut für Evaluative Forschung in Orthopädischer Chirurgie (IEFO) der Universität in Bern erstellt (18). Sie unterscheidet sich von anderen Frakturklassifikationssystemen vor allem durch die Unterscheidung von Gelenk- und Schaftfrakturen (7).

Bei dieser Fraktуреinteilung werden fünf Zahlen nach einem entsprechenden System vergeben (**Tabelle 2**) (7).

Die erste Position stellt die Kennzeichnung der Lokalisation der Fraktur im Skelett dar (7, 18). Hierbei wird zwischen 1 = Oberarm, 2 = Unterarm, 3 = Oberschenkel und 4 = Unterschenkel unterschieden (7, 18).

An Stelle Zwei wird näher auf die Lokalisation der Fraktur im betroffenen Knochen eingegangen, diese kann im proximalen (= 1), mittleren/diaphysären (= 2) oder distalen (= 3) Bereich vorliegen (7, 18). Das proximale und distale Segment wird durch ein individuelles Quadrat bestimmt (7, 18). Die Seitenlänge des Quadrats ergibt sich aus dem Abstand der Eckpunkte der Epiphysenfuge (7, 18). Dieser eingeschlossene Bereich wird als Metaphyse bezeichnet (**Abbildung 8**) (7, 18).

Die nächste Ziffer, die Nummer Drei, beschreibt die morphologische Unterteilung der Fraktur (7, 18). Es wird zwischen einer Gelenksfraktur (a = artikulär) und einer Schaftfraktur (s = Schaft) differenziert (7, 18). Sobald die Gelenksfläche beteiligt ist, wird von einer Gelenksfraktur gesprochen (7, 18). Alle anderen Frakturformen zählen zu den Schaftfrakturen, so auch beispielsweise eine Epiphysenlösung (7, 18).

An Position vier wird die Morphologie der Gelenks- und Schaftfrakturen nochmals genauer spezifiziert (7, 18). Hierfür werden die Frakturen in weitere fünf Untergruppen eingeteilt (7, 18). Zu den Schaftfrakturen zählen die peripheren Schaftfrakturen und Epiphysenlösungen nach Salter-Harris I und II (= 1), die stabilen metaphysären und diaphysären Grünholzfrakturen, Wulstfrakturen und Bowingfrakturen (= 2) (7, 18). Außerdem gehören die diaphysären Quer-, Schräg- und Torsionsfrakturen (= 3), sowie instabile Torsions- und Trümmerfrakturen (= 4) zu dieser Gruppe (7, 18). Alle weiteren Schaftfrakturen, die nicht in diese Kategorien eingeordnet werden können, werden unter der Ziffer „5“ zusammengefasst (7, 18). Zu den artikulären Frakturen gehören die epiphysären Frakturen nach Salter-Harris III (= 1) und IV (= 2) bei offenen Wachstumsfugen (7, 18). Des Weiteren zählen Two-plane Übergangsfrakturen (= 3) und Tri-plane Übergangsfrakturen (= 4) bei beginnenden Epiphysenfugenschluss zu dieser Gruppe (7, 18). Unter der Ziffer „5“ werden auch hier die nicht in diese Kategorien einteilbaren Frakturen zusammengefasst (7, 18).

Zur Charakterisierung des Dislokationsausmaßes wird die fünfte Stelle verwendet (7, 18). Es gibt undislozierte (= 0), tolerable (= 1) und nicht tolerable (= 2) Frakturen (7, 18). Jedoch wird die Frakturzuteilung derzeit subjektiv durch die

Einschätzung des Chirurgen/der Chirurgin beziehungsweise der Kliniken gestellt (7, 18).

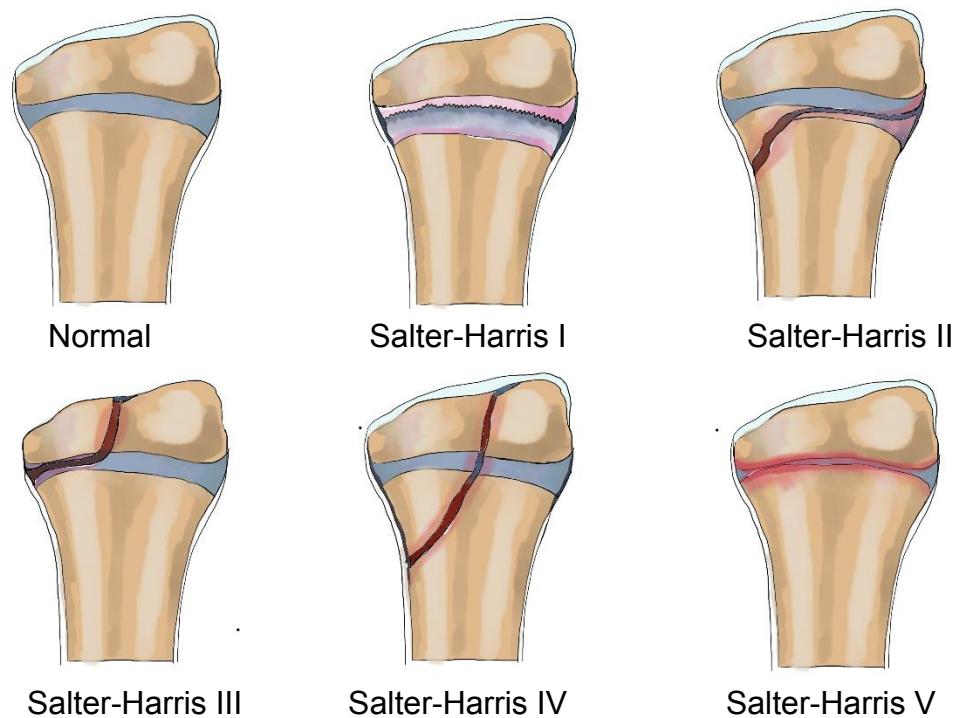
Die Lokalisation sechs im Code wird nur in Ausnahmefällen verwendet. Sie dient dazu, bei paarigen Knochen den nicht-tragenden Knochen zu benennen (7). Somit steht „U“ für Ulna und „F“ für Fibula (7).

<b>1. Position</b>	Lokalisation im Skelett	1 = Humerus 2 = Radius (Ulna) 3 = Femur 4 = Tibia (Fibula)
<b>2. Position</b>	Lokalisation im Knochen	1 = proximal 2 = Mitte/Diaphyse 3 = distal
<b>3. Position</b>	Frakturmorphologie	a = Gelenkfraktur (artikulär) s = Schafffraktur
<b>4. Position</b>	Spezifizierung der Morphologie	Gelenksfrakturen mit 1 – 5 Schafffrakturen mit 1 – 5
<b>5. Position</b>	Dislokationsausmaß	0 = undisloziert 1 = tolerabel 2 = nicht tolerabel
<b>6. Position</b>	Ausnahme bei paarig angelegten Knochen (nicht tragender Knochen)	U = Ulna F = Fibula

**Tabelle 2:** Systematische Übersicht der Li-La-Klassifikation, übernommen aus von Laer L, Kraus R, Linhart WE. *Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter*, 2013, Seite 60 (7)

### 1.3.3 Klassifikation nach Salter-Harris und Aitken

Die Einteilungen nach Salter-Harris und Aitken wurden für Frakturen erstellt, die die Wachstumsfugen im wachsenden Skelett betreffen (17, 19). Die Wachstumsfugen stellen eine besondere Herausforderung in der therapeutischen Behandlung dar, da diese im Kindes- und Jugendalter noch nicht verknöchert sind (17, 19). Sie sind für das Längenwachstum des Knochens verantwortlich (19). Eine Verletzung in diesem Bereich kann folglich zu Wachstumsstörungen führen (12, 19).



**Abbildung 9:** Veranschaulichung der Salter-Harris-Klassifikation in Anlehnung an Little JT, Klionsky NB, Charturvedi A, Soral A, Charturvedi A. *Pediatric Distal Forearm and Wrist Injury: An Imaging Review, RadioGraphics* 2014, Seite 476 (20) © Patricia Hrastnik M.A. Architecture und Pablo Wegmann M.A. Architecture

Salter-Harris I	Epiphysiolyse
Salter-Harris II	Epiphysiolyse mit metaphysärem Keil
Salter-Harris III	Epiphysiolyse mit epiphysärem Keil
Salter-Harris IV	Epiphysiolyse mit epi- und metaphysärem Keil
Salter-Harris V	Kompression der Epiphysenfuge

**Tabelle 3:** Einteilung der Salter-Harris-Klassifikation, übernommen aus Levine R.H., Foris L.A., Nezwik T.A., M.W. *Salter Harris Fractures*. 2022 (17)

Bei dem Typ I der Salter-Harris Klassifikation kommt es zu einer transphysären Frakturlinie, ohne eine direkte knöcherne Beteiligung (**Abbildung 9**) (19). Es kommt zu einer „Abtrennung“ der Epiphyse von der Metaphyse (= Epiphysiolyse) (**Tabelle 3**) (17, 19). Die Fraktur ist hierbei normalerweise in der Zone der Hypertrophie

lokalisiert, da hier der Weg des geringsten Widerstandes beim Unfall auftritt (19). Komplikationen wie Wachstumsstörungen sind bei Salter-Harris I selten anzufinden, da die essentiellen proliferativen und versorgenden Zonen normalerweise nicht betroffen sind (19). Jedoch kann jeder Bereich in der Wachstumsfuge von der Frakturlinie betroffen sein und folglich zu Störungen führen (19). Radiologisch kann es schwierig sein, diesen Frakturtyp zu erkennen, so kann die Diagnose auch durch klinische Befunde gestellt werden (17, 20).

Die Kategorie Salter-Harris Typ II umfasst Frakturen mit physärer und metaphysärer Komponente (**Abbildung 9, Tabelle 3**) (17, 19). Auch beim Typ II kommt es selten zu Wachstumsstörungen (19). Jedoch kann der metaphysäre Anteil als Komplikation in die Wachstumsfuge gedrückt werden und diese hierdurch schädigen (19). Dieser Frakturtyp kommt am häufigsten vor (17).

Bei den bereits beschriebenen zwei Typen ist die Gelenksfläche nicht betroffen (19). Meist ist bei Notwendigkeit eine Reposition und eine Gipsanlage ausreichend (17).

Bei Salter-Harris Typ III und IV kommt es zu einer Beteiligung der Gelenksflächen, somit handelt es sich um intraartikuläre Frakturen (19).

Bei Typ III läuft die Frakturlinie durch die Wachstumsfuge und die Epiphyse (**Abbildung 9, Tabelle 3**) (17, 19). Die Metaphyse ist hierbei nicht beteiligt (19). Bei dieser Frakturart ist der Verletzungsmechanismus von besonderer Bedeutung (19). Zum einen, da es sich um eine Gelenksfraktur handelt und zum anderen, da die Frakturlinie durch die Wachstumszone verläuft (19). Folglich kann es hierbei zu Wachstumsstörungen des betroffenen Knochens kommen (19). Um dieses Risiko zu reduzieren, ist bei dislozierten Frakturen therapeutisch ein operatives Vorgehen zur Wiederherstellung der Gelenksfläche erforderlich (19).

Typ IV der Salter-Harris-Klassifikation weist eine Frakturlinie von der Epiphyse über die Physe und zusätzlichem metaphysären Keil auf (**Abbildung 9, Tabelle 3**) (12, 17, 19). Aufgrund der Beteiligung der Gelenksfläche und der Wachstumszone besteht das Risiko von Wachstumsstörungen (19). Auch hier ist therapeutisch eine adäquate Stabilisierung der Frakturfragmente und Wiederherstellung der Gelenksfläche erforderlich (19).

Der letzte Typ dieser Einteilung ist der Typ V, der am seltensten auftritt (20). Dieses Frakturmuster wurde nicht durch Aitken beschrieben (19). Meist handelt es sich hierbei meist um nicht bzw. spät erkannte Frakturen (17, 19). Es kommt zu

einer Kompression der Physe (**Abbildung 9, Tabelle 3**) (17, 19). Radiologisch ist oft initial ein unauffälliger Befund zu finden (19). Im Verlauf kann es folglich zu einem vorzeitigen Schluss der Wachstumsfuge führen (19).

Insgesamt kommt es bei Typ IV und V häufiger zu Komplikationen als bei Typ I bis III (20).

#### **1.4 Unterarmfrakturen im Kindes- und Jugendalter**

Frakturen des Unterarms im Kindes- und Jugendalter gehören zu den häufigsten Frakturen (21, 22). Sie können in Frakturen des proximalen und mittleren Drittels, sowie Frakturen des distalen Drittels eingeteilt werden (7).

Aus funktionell-anatomischer Sicht können Unterarmfrakturen aufgrund der Pronations- und Supinationsbewegung als Gelenksfrakturen angesehen werden, sodass bereits geringe Achsenabweichungen in Funktionseinschränkungen resultieren können (22).

##### **1.4.1 Frakturen des proximalen und mittleren Drittels**

Die Frakturen des Unterarmschafts machen einen großen Teil der kindlichen Frakturen aus (19, 22). Unfälle im Freizeitsport stellen hierbei die häufigste Ursache dar (22). Meist sind die diaphysären Frakturen bei Kindern im distalen Drittel des Unterarms lokalisiert (22). Bei Unterarmschaftfrakturen kann nur einer der Knochen des Unterarms oder auch beide Knochen beteiligt sein (21, 23). Sie sind der häufigste Grund für die Notwendigkeit einer operativen Versorgung des kindlichen Unterarms (19).

Im Schaftbereich werden Achsenabweichungen nicht so gut ausgeglichen wie im distalen Bereich des Unterarms (7). Es sind Achsenknicke in Frontal- und Sagittalebene altersabhängig in einem bestimmten Ausmaß tolerierbar (7, 22). Stärkere Abweichungen erfordern Korrekturmaßnahmen, um Einschränkungen in den Bewegungen des Unterarms zu vermeiden (7). Seit-zu-Seit-Verschiebungen können im Schaftbereich meist gut ausgeglichen werden (7).

Morphologisch werden die diaphysären Frakturen in vollständige und unvollständige Frakturen unterteilt (7, 12, 22).

#### 1.4.1.1 Vollständige Frakturen



**Abbildung 10:** *Komplette dislozierte distale Unterarmfraktur, aus eigenem Krankengut*

Vollständige diaphysäre Frakturen des Unterarms sind in der Regel als instabile Frakturen zu beurteilen (7, 22, 24). Meist handelt es sich bei diesen Frakturen um Querfrakturen oder kurze Schrägfrakturen (22). Aber auch Torsions- und Trümmerfrakturen können vorkommen (22). Bei dieser Frakturform kommt es zu einem vollständigen Durchbrechen des Knochens und diese kann auch in Kombination mit einer unvollständigen oder vollständigen Fraktur des zweiten Knochens, dem Radius oder der Ulna einhergehen (7, 19, 22, 23). Vollständige diaphysäre Frakturen des Unterarms weisen einen Altersgipfel um das 10. Lebensjahr auf (7).

Je nach Lokalisation am Unterarm werden diese Frakturen im proximalen, mittleren oder distalen Drittel (**Abbildung 10**) unterteilt (19).

Bei Kindern ist eine Dislokation mit Achsenabweichung mit definierten Grenzen als tolerabel anzusehen, da das Remodelling in jungen Jahren besser ausgeprägt ist als bei Erwachsenen (7). Diese Grenzen sind bei Kindern bis fünf Jahren bei

einem Achsenknick bis 20°, wenn keine gegenläufige Abweichung der Unterarmknochen vorliegt und bei Kindern über fünf Jahren bei einem Achsenknick bis 10° festgelegt (7, 22). Es gilt, je proximaler die Fraktur lokalisiert ist, desto geringer ist die tolerable Achsenabweichung, da persistierende Fehlstellungen folglich zu Funktionseinschränkungen führen können (7, 22). Dies ist dadurch erklärbar, dass es sich bei Unterarmfrakturen, wie bereits erwähnt, auch um Gelenksfrakturen handelt (22).

Therapeutisch können stabile Frakturen, die achsengerecht aufeinander stehen bzw. im Rahmen des erwähnten Dislokationsausmaßes liegen, konservativ mittels Oberarmgips für ungefähr drei Wochen behandelt werden (7). Anschließend kann bei Bedarf auf eine abnehmbare Unterarmgipsschiene für weitere zwei bis drei Wochen gewechselt werden (7, 19). Bei einer stärkeren Achsenabweichungen ist vor der Gipsanlage eine geschlossene Reposition notwendig (7). Laut von Laer ist eine konservative Therapie mit Reposition nur zu empfehlen, wenn einer der Knochen eine ausreichende Stabilität aufweist (7).

Bei instabilen Frakturen und dislozierten Frakturen über die definierte Grenze hinaus werden in der Regel eine Reposition und operative Stabilisierung mittels elastisch stabiler intramedullärer Nagelung (ESIN) durchgeführt (7, 22). Seltener besteht die Indikation für eine Plattenosteosynthese oder Fixateur externe (7). Beispielsweise wird bei Frakturen im Übergang von mittleren zum distalen Drittel auf die alternativen operativen Techniken ausgewichen, da hier das distale Fragment bei einer intramedullären Nagelung nicht ausreichend fixiert werden kann (vgl. 1.5.5.3.2. Perkutane Kirschner-Draht-Osteosynthese) (7). Bei entsprechender Indikationsstellung wird auch eine Kombination von intra- und extramedullären Methoden angewandt (7). Nach einer operativen Versorgung mit ESIN ist eine sofortige spontane Bewegung des Arms bis zur Schmerzgrenze möglich (7).

Bei der Kombination einer vollständigen Fraktur des einen Knochens mit einer Grünholzfraktur des zweiten Knochens, kann die Therapie wie bei den Grünholzfrakturen angewendet werden (7). So wird, wenn nötig, eine Reposition des frakturierten Knochens vorgenommen und eine möglichst stabile Situation angestrebt, sodass eine konservative Therapie durchgeführt werden kann (7). Bei einem vollständigen Durchbrechen der Grünholzfraktur infolge des Repositionsversuchs kommt es zu einer instabilen Situation und eine operative Methode zur Stabilisierung ist die zielführende Therapie (7).

Isolierte Radiusfrakturen im proximalen Drittel des Unterarms bzw. am Übergang vom proximalen zum mittleren Schaftdrittel gelten als besondere Frakturen, da hier eine Achsenabweichung von kleiner als  $10^\circ$  anzustreben ist (7). Größere Abweichungen können mit folglichem Funktionseinschränkungen der Bewegung des Unterarms verbunden sein (7). Dies kann mittels Gipskeilung oder Reposition mit anschließender intramedulläre Stabilisierung erzielt werden (7).

Trümmerfrakturen stellen bei Kindern- und Jugendlichen eine seltene Frakturform dar und kommen am ehesten im Zusammenhang mit hoch-energetischen Verletzungen wie offenen Frakturen vor (19). Diese Frakturen bedürfen einer besonderen Behandlungsstrategie, meist mittels verschiedener operativer Techniken (19). Verkürzungen bis zu 1 cm (Zentimeter) können akzeptiert werden (19).

#### **1.4.1.2 Unvollständige Frakturen**

Die unvollständigen Frakturen des Unterarmschafts kommen vor allem bei Kindern unter 10 Jahren vor (23). Hierzu zählen beispielsweise die typischen Grünholzfrakturen und die Bowing-Frakturen (7, 23). Diese Frakturen werden als stabil angesehen (7, 22).

#### 1.4.1.2.1 Grünholzfrakturen



**Abbildung 11:** Grünholzfraktur, aus eigenem Krankengut

Die Grünholzfrakturen gehören zu den inkompletten Frakturen, die speziell im Kindesalter vorkommen (7, 12). Es kommt typischerweise zu einer vollständigen Durchbrechung der Kortikalis auf der konvexen Seite des Knochens (7, 12). Die Kortikalis der gegenüberliegenden Seite bleibt hierbei aber intakt (12) bzw. ist angebrochen (**Abbildung 11**) (7, 24).

Grünholzfrakturen treten bei Kindern mit einer Häufigkeit von ungefähr ein Drittel aller diaphysärer Frakturen des Unterarms auf (7, 24), können aber auch am distalen Unterarm lokalisiert sein (7). Sie zeigen einen Altersgipfel um das 8. Lebensjahr und zählen grundsätzlich zu den stabilen Frakturen (7). Sie gehören jedoch auch zu den Problemfrakturen (21), da sie laut Definition Achsenabweichungen aufweisen (7). Die Problematik dieser Frakturart besteht vor allem in dem erhöhten Risiko der Gefahr einer Refraktur (7). Dies ist so zu erklären, dass die Kortikalis auf einer Seite vollständig durchgebrochen, jedoch auf der konkaven Seite meist nur angebrochen ist (7). Aus diesem Grund kommt es bei dem Belassen der Fraktur vermutlich zu einer asymmetrischen knöchernen Konsolidierung des betroffenen Knochens und der erhöhten Gefahr einer Refraktur (7). Hierbei ist die nicht komprimierte Konvexseite des frakturierten Knochens als

Sollbruchstelle anzusehen (23). Je weiter Richtung Metaphyse die Fraktur lokalisiert ist, desto seltener kommt es zu einer Refraktur (7). Zudem zeigte sich laut von Laer ein höheres Refrakturrisiko bei Grünholzfrakturen, je geringer das Ausmaß der Dislokation ist (7). Bei einem größeren Dislokationsausmaß besteht ein geringeres Refrakturrisiko (7). Insgesamt besteht das Risiko einer Refraktur innerhalb von einem Jahr bei ca. 30% (21). Als weitere Folge von Grünholzfrakturen, die in Fehlstellung ausheilen, können Funktionsstörungen des betroffenen Armes auftreten, da Korrekturmechanismen im Schaftbereich, wie bereits erwähnt, nur eingeschränkt möglich sind (7).

Durch die Morphologie der Fraktur kann auf den Mechanismus der Verletzung geschlossen werden (19). Grünholzfrakturen von Radius und Ulna auf gleicher Höhe weisen darauf hin, dass wahrscheinlich keine oder nur sehr geringe Rotationsbewegungen zu dieser Fraktur geführt haben (19). Die Lokalisation der inkompletten Fraktur in unterschiedlichen Levels von Radius und Ulna kann durch den Einfluss einer Rotationsbewegung erklärt werden (19). So resultiert meist durch ein Pronationstrauma eine apex-dorsale Grünholzfraktur, wohingegen eine apex-palmare Grünholzfraktur meist durch einen Supinationsmechanismus hervorgerufen wird (19). Dies ist für die notwendige Reposition von wichtiger Bedeutung, da hier die jeweiligen Gegenbewegungen durchgeführt werden müssen (19).

Therapeutisch können Grünholzfrakturen bei Kindern sowohl konservativ, als auch operativ behandelt werden (7). Da typische Grünholzfrakturen meist eine Abkippung von weniger als 20° aufweisen, kann eine konservative Methode mittels Oberarmgips gewählt werden (7). Die tolerable Abweichung kann primär bestehen bleiben und im Verlauf um den 8. Tag mittels Gipskeilung korrigiert werden (7). Sollte diese Behandlung nicht zu dem gewünschten Therapieerfolg führen, eine zunehmende Abkippung auftreten bzw. eine primäre Abkippung von mehr als 20° bestehen, muss individuell eine alternative Methode angewandt werden (7).

In Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ werden die zwei Methoden der Reposition diskutiert (19). Eine Vorgehensweise beschreibt die Reposition mittels vollständiger Durchbrechung, sodass eine komplette Fraktur entsteht (19). Dies hat nach einigen Sichtweisen den Vorteil, dass ein Abkippen der Reposition seltener vorkommt und zudem, dass das Refrakturrisiko durch eine gleichmäßige Kallusbildung reduziert werden kann (19). Bei der anderen Methode wird eine

Reposition ohne vollständiges Durchbrechen des Knochens gewählt (19). Die Befürworter\*innen dieser Methode möchten die bestehende Stabilität dieser Frakturart beibehalten (19). Zu diesen unterschiedlichen Meinungen gibt es jedoch bisher keine validierten Daten aus Studien (19).

Nach der Reposition kann meist ein Gips angelegt werden (7). Bei instabilen Verhältnissen ist jedoch eine operative Versorgung mittels intramedullärer Marknagelung notwendig (7). Dies ist notwendig, da eine konservative Behandlung die geschaffene Position nicht ausreichend stabilisiert und in Folge sekundäre Dislokationen und Achsenabweichungen auftreten können (7).

#### 1.4.1.2.2 Bowing-Frakturen



**Abbildung 12:** *Bowing-Fraktur, aus eigenem Krankengut*

Bei einer Bowing-Fraktur handelt es sich um eine inkomplette, stabile Fraktur, wobei es zu einer plastischen Verbiegung des Knochens kommt (11) und die Kortikalis nicht unterbrochen ist (**Abbildung 12**) (21). Aus diesem Grund wird sie als Biegefraktur bezeichnet (23). Diese Fraktur kommt bei Kindern aufgrund der vermehrten Elastizität der Knochen vor (11, 12). Radiologisch ist meist kein Frakturspalt nachweisbar, jedoch können kortikale Mikroeinrisse auf der konvexen Knochenseite vorhanden sein (7, 11, 19).

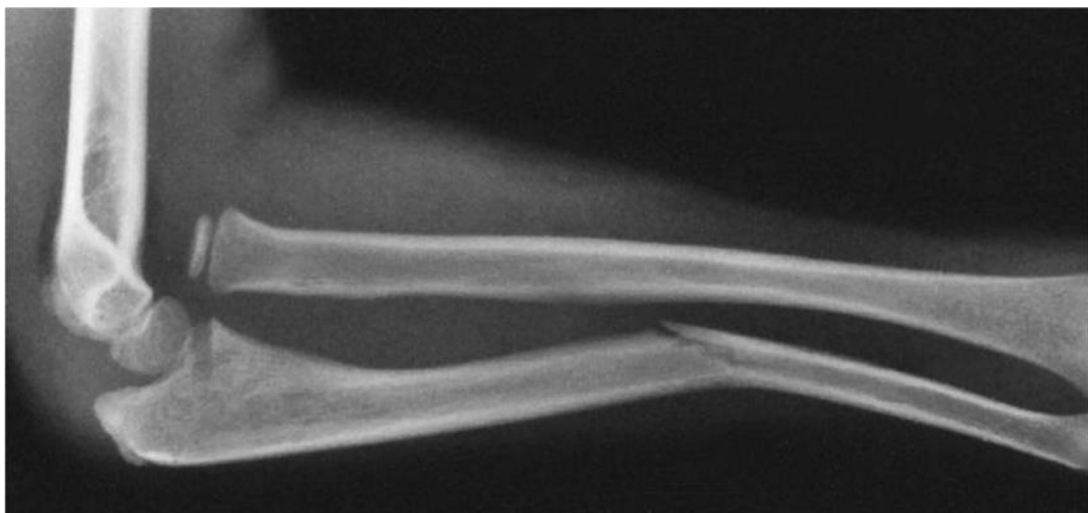
Sie treten mit einem Altersgipfel von über 10 Jahren auf (7). In der Literatur werden die Bowing-Frakturen teilweise als atypische Grünholzfrakturen beschrieben (7).

Bei Bowing-Frakturen wird meist eine konservative Therapiemethode bevorzugt (7). Hierbei ist bei einer schwachen Ausprägung der Biegung des Knochens, ohne primäre Funktionsstörung der Umwendebewegungen der Hand, keine Reposition

erforderlich (7). In diesem Fall wird ein Oberarmgips zur Ruhigstellung für drei Wochen angelegt (7). Bei einer Achsenabweichung von mehr als 20° mit Funktionsstörung der Pronation und Supination kann eine konservative Behandlung mit einer Keilung des Gipses versucht werden (7). Bei Misslingen dieses Versuchs ist jedoch eine Reposition und Einbringen eines Marknagels zur Stabilisierung notwendig (7). Nach Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ ist bereits eine Reposition bei einer klinisch signifikanten Biegung von über 10° und einem Alter von über 6 Jahren anzustreben (19).

Anders als bei den Grünholzfrakturen besteht bei den Bowing-Frakturen kein erhöhtes Risiko einer Refraktur (7).

#### 1.4.1.3 Monteggia-Fraktur



**Abbildung 13:** Monteggia-Fraktur, aus eigenem Krankengut

Monteggia-Frakturen kommen mit weniger als 1% der pädiatrischen Unterarmfrakturen selten vor (19). Es kommt dabei zu einem komplexen Verletzungsmuster, das durch die anatomische Nähe verschiedener Strukturen, wie Muskeln, Nerven und Bänder bedingt wird (19). Monteggia-Frakturen weisen einen Altersgipfel zwischen 4 und 10 Jahren auf (19).

Bei diesem Frakturmuster kommt es zu einer Kombination aus einer isolierten Fraktur der Ulna und gleichzeitiger Luxation des Radiusköpfchens im Bereich des Radiohumeralgelenks (**Abbildung 13 und 14**) (3, 24).

Für diese Frakturkombinationen werden eigene Einteilungssysteme verwendet (19); beispielsweise die Bado-Klassifikation (Bado Typ I bis IV) mit zusätzlichen Monteggia äquivalenten Frakturmustern oder die Letts Klassifikation (19).

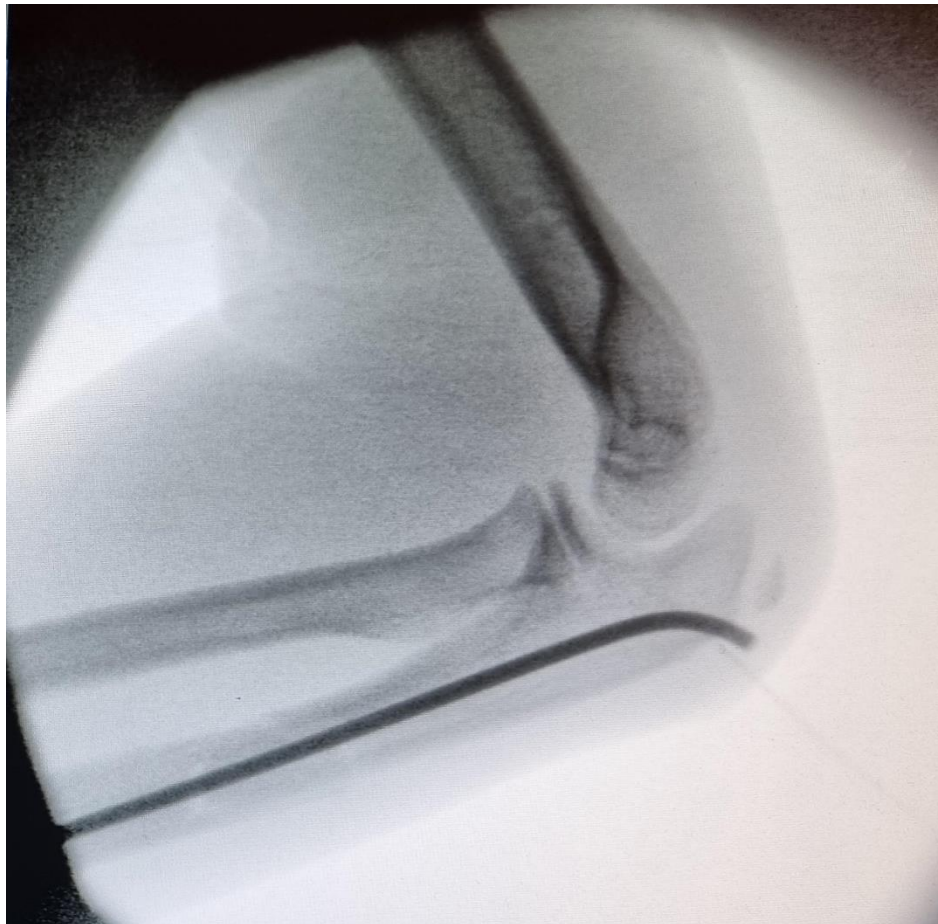
Als Verletzungsmechanismen werden zum Beispiel ein direktes Trauma, eine Hyperpronation und Hyperextension, sowie ein Sturz auf den ausgestreckten Arm beschrieben (19).

Diagnostisch werden Röntgenbilder des Ellenbogengelenks und des Unterarms in zwei Ebenen (a.p. und lateral) angefertigt (19, 24). Hierbei muss die korrekte Stellung des Radiusköpfchens auf das Capitulum humeri überprüft werden (24). Es muss bei jeder Ulnafraktur oder -deformierung das Ellenbogengelenk radiologisch mitbeurteilt werden, um eine Radiuskopf(sub)luxation und somit eine Monteggia-Läsion ausschließen zu können (19, 24). Laut Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ wird eine Dislokation des Radiuskopfes oft übersehen (19). Eine Reposition beider Knochen ist bei dieser Frakturart unbedingt notwendig, da es sonst folglich zu Komplikationen, wie Bewegungseinschränkungen oder Fehlstellungen des Ellbogengelenks kommen kann (3, 24). Anschließend ist bei kompletten Ulnafrakturen oder einer instabilen Situation nach der Reposition, meist ein operatives Vorgehen zur Stabilisierung notwendig (**Abbildung 15**) (19, 22). Plastische Deformierungen oder inkomplette Frakturen, wie Grünholzfrakturen, können weiter konservativ mittels Gips behandelt werden (19). Die Immobilisierung erfolgt durch einen Oberarmgips in einer 100° bis 110° Flexionshaltung im Ellenbogengelenk und Supinationsstellung (19).

Monteggia-Läsionen zählen zu den sogenannten Kadiläsionen (7). Dies bedeutet, dass sie auf jeden Fall diagnostiziert oder ausgeschlossen werden müssen, um die oben beschriebenen Problematiken vermeiden zu können (7).



**Abbildung 14:** Röntgenbild einer Monteggia-Fraktur, aus eigenem Krankengut



**Abbildung 15:** Monteggia-Fraktur nach Reposition und operativer Versorgung, aus eigenem Krankengut

### 1.4.2 Frakturen des distalen Unterarms

Die Frakturen des distalen Unterarms zählen zu den häufigsten Frakturen des Kindes- und Jugendalters (19, 22). An dieser Lokalisation kommen sie mit einer Häufigkeit von bis zu 75% der Unterarmfrakturen vor, wobei überwiegend der distale Radius in diesem Zusammenhang betroffen ist (19, 22). Sie treten bei einem Altersgipfel um das 12. und 13. Lebensjahr auf (7).

Distale Unterarmfrakturen können in der distalen Physe, der distalen Metaphyse und der distalen Diaphyse lokalisiert sein (7). Zudem können Galeazzi-Frakturen auftreten (19). Frakturen des distalen Unterarms werden in ulnare und/oder radiale Frakturen unterteilt (19). Es kommen vor allem Wulstfrakturen, Grünholzfrakturen, sowie komplette Frakturen und Fugenfrakturen vor (7, 19).

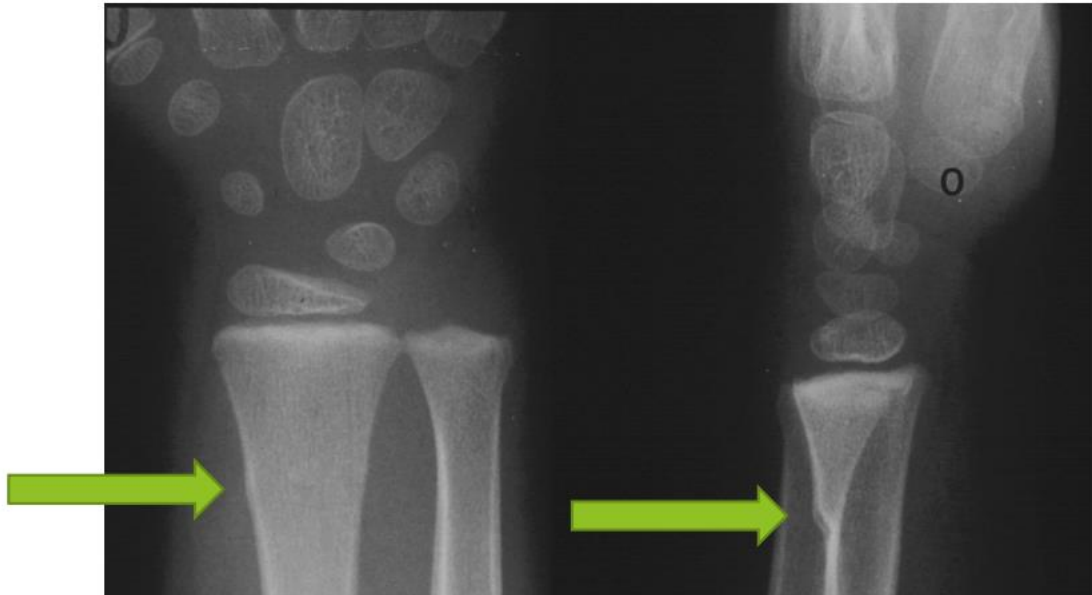
Vor allem im Bereich des distalen Unterarms weisen Kinder aufgrund der Nähe zur offenen Epiphysenfuge ausgeprägte Korrekturmechanismen auf (7, 22). Aus diesem Grund sind Achsenabweichungen altersentsprechend tolerierbar (7). Bis zu einem Alter von 12 Jahren sind beispielsweise Abkippungen in der Frontalebene von  $10^\circ$  bis zu  $20^\circ$  als tolerabel anzusehen sowie in der Sagittalebene bis zu  $30^\circ/40^\circ$  (7). Ab dem 12. Lebensjahr vermindert sich die Grenze alters- und reifeabhängig auf  $0^\circ$  bis  $10^\circ/20^\circ$  in beiden Ebenen (7). Bei Seit-zu-Seit-Fehlstellungen von über einem Viertel der Schaftbreite, Rotationsfehlstellungen und entsprechendem Alter, ist eine Reposition und eventuell ein operatives Verfahren erforderlich, um Funktionseinschränkungen zu verhindern (7, 22).

Eine konservative Therapie kann bei stabilen Frakturen und dislozierten Frakturen, die innerhalb der altersabhängigen Korrekturgrenzen liegen, angewendet werden (22). Hierbei wird bei kleinen Kindern bis zum 8. Lebensjahr normalerweise ein Oberarmgips angelegt, wobei bei älteren Kindern und bei operativ versorgten Kindern ein Unterarmgips ausreichend ist (7). Instabile, undislozierte Frakturen werden konservativ mittels Oberarmgips behandelt (22). Bei dislozierten, stabilen Frakturen werden eine Reposition mit anschließender Stabilisierung durch einen Gips vorgenommen (22).

Ein operatives Verfahren wird bei Frakturen nach Reposition und anschließend instabiler Situation, sowie bei instabilen, dislozierten Frakturen und sekundär dislozierten Frakturen angewendet (22). Diese Frakturen werden primär reponiert und operativ stabilisiert (22). Die operative Versorgung mit Kirschner-Drähten ist bei

distalen Unterarmfrakturen das Mittel der Wahl, um eine achsengerechte Stellung zu erzielen (7, 22).

#### 1.4.2.1 Wulstfrakturen



**Abbildung 16:** Wulstfraktur, aus eigenem Krankengut

Bei den im Kindesalter sehr häufig auftretenden Wulstfrakturen handelt es sich um sogenannte Stauchungsfrakturen (24), die zu den stabilen Frakturen gezählt werden (19, 21). Sie sind meist im Bereich der distalen Metaphyse lokalisiert und entstehen durch eine axiale Kompression des Knochens (19, 21). Durch das umgebene Periost wird die Wulstfraktur stabilisiert (19). Selten kann es zu einer Ausweitung Richtung Physe kommen, hier besteht ein erhöhtes Risiko von Wachstumsstörungen (19). Im Röntgenbild ist eine Vorwölbung der Kortikalis (12) als Unterbrechung der Kontinuität zu erkennen (**Abbildung 16**) (25). Jedoch kann diese Frakturart bei geringer Ausbildung leicht übersehen werden, da die Wulst radiologisch nicht stark ausgeprägt sein muss (3). Posttraumatisch entsteht ungefähr 7 bis 10 Tage eine periostale Reaktion, wodurch die subtile Wulstfraktur radiologisch „sichtbar“ wird.(20).

Wulstfrakturen werden normalerweise konservativ zur Schmerztherapie mit einer Gipsanlage altersabhängig für zwei bis vier Wochen behandelt (7, 21). Bei jüngeren Kindern wird eine Oberarmgipsschiene angebracht, bei älteren Patient\*innen ist eine Unterarmgipsschiene meist ausreichend (21). Eine weitere radiologische Kontrolle ist in diesem Fall nicht notwendig (7, 21). Bei einer bestehenden Druckschmerzhaftigkeit wird der Arm bis zur Schmerzlosigkeit weiter

ruhiggestellt (7). Einfache Wulstfrakturen heilen in der Regel ohne Komplikationen aus (19, 20).

#### **1.4.2.2 Galeazzi-Fraktur**

Bei diesem Frakturmuster frakturiert bei Kindern der Radiuschaft meist im Bereich der distalen Metaphyse mit gleichzeitiger Luxation des Ulnaköpfchens (22). Diese Luxation entwickelt sich im wachsenden Skelett häufig aufgrund einer distalen Physisfraktur der Ulna (19). Dies wird als pädiatrisches Galeazzi-Äquivalent bezeichnet (19). Seltener kommt die Frakturart bei jungen Personen in einer Kombination mit Bandverletzungen im Bereich des Radioulnargelenks vor (19). Dies wird eher bei Erwachsenen beobachtet (20). Die Galeazzi-Fraktur entsteht bei Kindern in der Regel durch einen Sturz auf den ausgestreckten Arm in Pronations- oder Supinationshaltung (19). Es werden zwei Typen unterschieden (19). Bei dem häufiger vorkommenden Typ I kommt es zu einer dorsalen Verschiebung des distalen Radius und bei Typ II zu einer palmaren Verschiebung des distalen Radius (19). Bei Kindern kommt diese Fraktur mit einer Häufigkeit von 3% der distalen Radiusfrakturen selten vor (19).

In der Regel ist bei pädiatrischen Patient\*innen eine konservative Behandlung mittels geschlossener Reposition und Gipsanlage angemessen (19, 22). Der Grund hierfür ist, dass es sich bei dem betroffenen Radius meist um eine Grünholzfraktur handelt, die nach Reposition als stabil eingestuft wird (19). Ausnahme stellen instabile Radiusfrakturen (19, 22) und frustrane Repositionsversuche dar (19). Hier muss ein operatives Verfahren mit Reposition und anschließender Fixierung gewählt werden (19, 22).

Klassische Galeazzi-Frakturen weisen eine günstige Prognose auf, bei Galeazzi-äquivalenten Frakturen können Wachstumsstörungen als Folge auftreten (22).

#### **1.4.2.3 Grünholzfrakturen am distalen Unterarm**

Wie bereits aufgeführt, können Grünholzfrakturen auch im distalen Unterarm auftreten (vgl. 1.4.1.2.1 Grünholzfrakturen) (7). Im Bereich vom Übergang des diaphysären zum metaphysären Bereichs handelt es sich oft um eine Kombination aus einer Grünholzfraktur und einer Stauchungsfraktur (7). Es kommt typischerweise zu Abkippen, die innerhalb der altersentsprechenden

Korrekturgrenzen ausgeglichen werden können und nicht korrigiert werden müssen (7).

## **1.5 Frakturen des Unterarms**

### **1.5.1 Epidemiologie**

Frakturen des kindlichen Skeletts kommen häufig vor, wobei die Frakturen des Unterarms mit 23 - 40% aller pädiatrischen Verletzungen überwiegen (19, 26). Diese treten mit einer Inzidenz von ungefähr 1,5/100 Kinder pro Jahr auf (19).

Hierbei zählen die Frakturen im Bereich des distalen Unterarms zu den häufigsten Verletzungen der oberen Extremitäten (19). Sie weisen einen Gipfel im vorpubertären Wachstumsschub auf (19). Überwiegend ist der nicht dominante Arm von männlichen Kindern und Jugendlichen betroffen (19). Kinder um das 10. Lebensjahr weisen einen Altersgipfel von diaphysären Frakturen auf, während bei älteren Kindern um das 12. bzw. 13. Lebensjahr distale Unterarmfrakturen häufig zu finden sind (7). Grünholzfrakturen treten gehäuft um das 8. Lebensjahr auf (7). Diese Altershäufigkeiten sind auf die Entwicklung und den Umbauprozesse des kindlichen Knochens während des Wachstums zurückzuführen (19).

Biomechanisch kommt es zu einer Fraktur im schwächsten Bereich des Knochens, der im Verlauf des Wachstums variiert (19). Folglich sind die Knochen beim Kind altersabhängig empfindlicher gegenüber Frakturen (19).

Nach Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ haben Mädchen ein höheres Risiko für Frakturen des distalen Unterarms als Jungen, mit Ausnahme in der frühen Pubertät, in diesem Zeitraum sind die Jungen häufiger betroffen (19). Zudem kann ein Häufigkeitsgipfel von Unterarmfrakturen bei Kindern und Jugendlichen in den Sommermonaten beobachtet werden (19). Ein erhöhtes Risiko weisen übergewichtige Kinder, Kinder mit einer geringer Knochenmineralisation und lockeren Bändern, sowie „poor postural balance“ auf (19).

Aufgrund der Kraftübertragung auf den Radius beim Sturz, sowie den anatomischen Gegebenheiten des Radius während dem Wachstum, kommt es vermehrt zu distalen Radiusfrakturen (19).

Unterarmschaftfrakturen zählen zu den häufigsten Unterarmfrakturen, die einer operativen Versorgung bedürfen (19).

### **1.5.2 Ätiologie**

Der Unfallmechanismus und auch die Krafteinwirkung spielen eine große Rolle bei Unterarmfrakturen und bewirken verschiedene Frakturtypen und Verschiebungen (19). Die häufigste Ursache für eine Fraktur im Bereich des Unterarms stellt ein Sturz auf den ausgestreckten Arm dar (19). Hierdurch resultiert eine indirekte Krafteinwirkung auf die Knochen des Unterarms (19). Oft kommt es zudem durch den Fall zu einer Rotationsbewegung, die das Auftreten einer Fraktur zusätzlich begünstigt und eine Drehverschiebung verursacht (19). Eine Fraktur des Unterarms einer oder beider Knochen kann neben einer indirekten Krafteinwirkung auch durch eine direkte Einwirkung einer Kraft resultieren (19). Hierbei kommt es folglich meist auch zu einer Dislokation (19). Beispielsweise kann dies durch einen Schlag auf den Knochen entstehen (19). Bei den diaphysären Unterarmfrakturen ist hierbei häufiger die Ulna als isolierte Fraktur betroffen (19).

Distale Unterarmfrakturen sind meist mit sportlichen Aktivitäten oder Freizeitunfällen wie beispielsweise Skifahren, Basketball, Fußball und Rollerblading assoziiert (19, 22). Im Rahmen eines Hyperflexionstraumas kommt es zu einer Abkippung des distalen Knochenfragments nach palmar (25). Dies wird als „Smith-Fraktur“ bezeichnet (25). Bei der „Colles-Fraktur“ kommt es hingegen durch ein Hyperextensionstrauma zu einer dorsalen Fragmentabkippung (25).

Auch Kindesmisshandlungen müssen in Betracht gezogen werden, vor allem bei multiplen Verletzungen und Hämatomen unterschiedlichen Alters, sowie bei einem inadäquaten Unfallhergang (22).

### **1.5.3 Klinik**

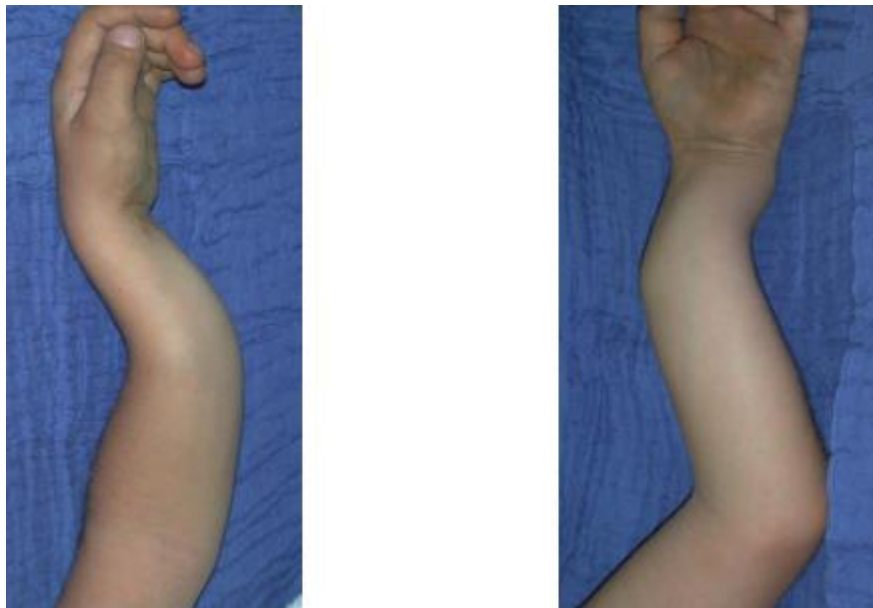
Abhängig von der Art der Fraktur und Dislokation können verschiedene Symptome auftreten (19).

Die klassischen Symptome einer Fraktur sind Deformität, Schmerz und Schwellung (19). Es werden grundsätzlich zwischen den sicheren und den unsicheren Frakturzeichen unterschieden (25, 27). Klinische Symptome wie beispielsweise Tumor (Schwellung), Dolor (Schmerzen), Hämatombildung und Functio laesa (Funktionseinschränkung) zählen zu den unsicheren Zeichen einer Fraktur (25, 27). Sichere Zeichen für eine Fraktur beinhalten eine offene Fraktur, sichtbare Fehlstellung, Krepitationen und eine ungewöhnliche Beweglichkeit (25,

27). Zusätzlich können die periphere Motorik, Sensibilität und Durchblutung des betroffenen Arms eingeschränkt sein (25, 27).

Durch die Dislokation der Knochen kann es zu einer Verkürzung des Unterarms kommen, auch eine typische Bayonett-Stellung ist zu beobachten (**Abbildung 17**) (19).

Frakturen bei jungen Kindern können auch übersehen werden, da sie den frakturierten Arm teilweise noch aktiv einsetzen (19). So sollte eine Fraktur abgeklärt werden, wenn ein Arm eines Kindes innerhalb von ein bis zwei Tagen nach dem Trauma nicht die vollständige Funktion zurückerlangt (19).



**Abbildung 17:** Bild einer typischen Bayonett-Stellung bei einer Unterarmfraktur, aus eigenem Krankengut

#### 1.5.4 Diagnostik

Bei der Diagnostik ist zu beachten, dass sich das wachsende Skelett von dem des Erwachsenen unterscheidet (28). Bei Kindern und Jugendlichen ist bei Frakturen vor allem der Reifezustand des Skeletts, insbesondere die Epiphysenfugen von besonderer Bedeutung (7).

Die Basis der Diagnostik bilden die Anamnese, die Inspektion, die klinische Untersuchung und die Röntgendiagnostik (7). Nicht jede Fraktur im Wachstumsalter ist im Röntgenbild sichtbar (7). Die Diagnostik mittels Röntgen hat das Ziel, den Therapieweg festzulegen und „Kadiläsionen“ auszuschließen bzw. zu diagnostizieren (7). Zu den relevanten Kadiläsionen des Unterarms zählen beispielsweise die Luxation des Radiusköpfchen als isolierte Verletzung oder im Rahmen der Monteggia-Läsion (7).

Grundsätzlich werden Röntgenbilder bei Frakturen des Unterarms in zwei orthogonalen Ebenen angefertigt (7, 19, 22, 25); der anteroposterioren (a.p.) Ebene und der seitlichen Ebene (19). Zum Ausschluss von Luxationen und Luxationsfrakturen müssen die angrenzenden Gelenke auf dem Röntgenbild abgebildet sein (22). Diagnostisch werden die Frakturart, sowie Verschiebungen, sowie Abkipfung, Malrotationen und Achsenabweichungen bestimmt (19, 22). Ein Röntgenbild der Gegenseite als Vergleich anzufertigen wird nachweislich nicht als sinnvoll erachtet (7).

Es muss eine Nutzen-Risiko-Abwägung hinsichtlich der Durchführung einer Röntgendiagnostik durchgeführt werden, da es sich bei Röntgenstrahlen um ionisierende Strahlen handelt (7, 19, 22, 25).

Die Strahlenexposition, v.a. bei Kindern, soll möglichst geringgehalten werden, hierzu wurde das ALARA-Prinzip entwickelt (25). Die Abkürzung steht für „as low as reasonably achievable“ mit den Grundregeln: Abstand halten, Abschirmung, Minimierung der Aufenthaltsdauer und Vermeidung der Aufnahme von Strahlung durch Schutzkleidung (25). Grundsätzlich bestehen gesetzliche Regelungen für den Einsatz von Strahlung in der Medizin (25). Aufgrund der höheren Strahlenempfindlichkeit und der längeren Lebenserwartung bei Kindern muss sich sehr streng an die Strahlenschutzmaßnahmen gehalten werden (25). Dies kann durch die höhere Zellteilungsrate und die kleineren Organe und somit einer höheren Strahlenabsorption pro Gewebeeinheit erklärt werden (29). So haben Kinder ein höheres Lebenszeitrisko für Folgen durch Strahlenexposition (25, 29).

Weitere diagnostische Maßnahmen mittels CT oder MRT werden bei suspekten Ergebnissen, bekannten intraartikulären Frakturen oder Frakturen, die mit den Handwurzelknochen assoziiert sind, durchgeführt (19, 25). So kann beispielsweise eine Epiphysiolysis im Ultraschall bzw. MRT diagnostiziert werden (25).

Radiologisch werden direkte und indirekte Zeichen einer Fraktur unterteilt. Zu den indirekten Zeichen gehören eine Weichteilschwellung, ein Gelenkserguss, sowie ein „fat-pad-sign“ (=Fettpolsterzeichen) und eine Periostreaktion (25, 30). Beispiele von direkten Frakturzeichen im Röntgenbild sind eine sichtbare Aufhellungslinie als Frakturspalt, eine Unterbrechung der Kontinuität, eine Achsenabweichung und somit eine Stufenbildung der Kortikalis, sowie eine Kompression der Kortikalis mit Wulstbildung durch eine Stauchung, abgetrennte Knochenfragmente und eine Unterbrechung der Spongiosabälkchen (25).

Des Weiteren kann eine Sonographie bei der Diagnostik der Verletzung von Weichteilen, der Membrana interossea antebrachii und bei der Beurteilung der Durchblutung nützlich sein (7, 22). Vor allem bei suspekten Frakturen und sehr jungen Kindern mit noch nicht ausgeprägter Ossifikation des Knochens kann dieses diagnostische Tool nützlich sein (19, 22).

Eine Einschränkung der peripheren Durchblutung, Motorik und Sensibilität muss vor der Behandlung unbedingt überprüft werden (19).

### **1.5.5 Frakturbehandlung/-therapie**

Die vollständige Wiederherstellung der Funktion, sowie ein kosmetisch zufriedenstellendes Resultat des frakturierten Unterarms und die Vermeidung von Komplikationen stellen das Ziel der Therapie dar (19, 22).

Die Entscheidung ob eine konservative oder operative Therapie durchgeführt wird, ist bei jeder Fraktur individuell zu treffen (7). Bei Kindern ist ein ausgeprägtes Remodelling möglich und somit sind gute Korrekturmechanismen bei Achsenabweichungen realisierbar (7). Aus diesem Grund sind altersentsprechende Abweichungen der Achsen als tolerabel anzusehen und eine konservative Behandlung möglich (7, 22).

Die Indikation und Entscheidung der Therapiemaßnahme ist vom Alter der/des Patient\*innen, vom Dislokationsausmaß, sowie von der Lokalisation der Fraktur und von dem Entwicklungsstand der Wachstumsfuge abhängig (11, 22). Zudem sind die Bewegungsebenen der angrenzenden Gelenke, sowie Begleitverletzungen zu beachten (11, 22). Grundsätzlich sollte die Entscheidung und Vorgehensweise der Behandlung von Frakturen mit den Eltern und wenn möglich mit dem Kind selbst besprochen, sowie die Vor- und Nachteile der Behandlungsmöglichkeiten gegeneinander abgewogen werden (7).

#### **1.5.5.1 Konservative Therapie**

Zu den Indikationen einer konservativen Behandlung zählen folgende Frakturen (7, 19, 22):

- geschlossene Frakturen (19)
- stabile und nicht-dislozierte Frakturen (7, 19, 22)
- Frakturen mit tolerabler Achsenabweichung (alters- und lokalisationsabhängig) (7, 19, 22)

- Frakturen nach Reposition und stabilen Verhältnissen (19, 22)
- späte Vorstellung bei dislozierten Fugenfrakturen (19)

Insgesamt kann für die Indikation der Anlage eines Gipses bei Kindern und Jugendlichen großzügig vorgegangen werden (7). Auf die einzelnen Besonderheiten der konservativen Therapie der jeweiligen Frakturen wurde bereits bei den einzelnen Frakturen eingegangen (vgl. 1.4 Unterarmfrakturen im Kindes- und Jugendalter).

Je weiter proximal die Fraktur lokalisiert ist, desto eher werden bei der Gipsanlage die angrenzenden Gelenke miteingeschlossen, um eine Ruhigstellung des frakturierten Knochens zu gewährleisten (19). So wird bei Unterarmschaftfrakturen ein Oberarmgips angelegt und bei stabilen distalen Unterarmfrakturen ist normalerweise ein Unterarmgips ausreichend (19). Bei instabilen aber nicht dislozierten Frakturen des distalen Unterarms kann ebenfalls eine konservative Therapie mittels Oberarmgips erfolgen (22).

Primär wird bei einer frischen Fraktur mit der Möglichkeit einer zunehmenden Schwellung initial ein nicht-zirkulärer Gips angelegt (19), der nach Abschwellung, um den 8. Tag, geschlossen werden kann (7, 23). Dies ist notwendig, um durch eine Zunahme der Schwellung ein Kompartmentsyndrom zu verhindern (19). Bei kleinen, ängstlichen Kindern kann der Gipsschluss eventuell auch ausbleiben (7). Reponierte Frakturen sollten nach Gipsschluss zur Kontrolle der achsengerechten Stellung bzw. zum Ausschluss einer sekundären Dislokation eine Röntgenkontrolle erhalten (19, 22). Mögliche Achsenabweichungen können mittels Keilung um den 8. Tag korrigiert werden (7, 22, 27). Nach der Keilung folgt eine radiologische Kontrolle (7).

Bei diaphysären Unterarmfrakturen ist die Armposition bei der Immobilisierung abhängig von der Lokalisation der Fraktur zur Insertionsstelle des M. pronator teres (19). Frakturen proximal dieser Stelle sollten in Supinationsstellung, Frakturen distal dieser Stelle in Neutralposition immobilisiert werden, anders lokalisierte Frakturen in der Position der Reposition (19). Frakturen, die einer Reposition bedürfen, sollten in den ersten zwei bis drei Wochen wöchentlich evaluiert werden, um mögliche Achsenabweichungen frühzeitig korrigieren zu können (19). Nach einer ausreichenden Kallusbildung wird der Gips alters- und frakturabhängig (22) nach ungefähr drei bis vier (7) bzw. bis hin zu sechs bis acht (19) Wochen abgenommen (22). Da Schafffrakturen im Kindesalter ein signifikantes Refrakturrisiko aufweisen,

sollte nach der Gipsabnahme eine Schiene bis zur vollständigen Heilung getragen werden (19). Normalerweise ist dies für ungefähr zwei bis vier weitere Wochen bis zur Schmerzfreiheit empfohlen (7, 19).

Bei distalen Unterarmfrakturen wird eine Ruhigstellung für drei bis vier Wochen empfohlen (22).

### **1.5.5.2 Reposition**

Eine Reposition muss bei Frakturen durchgeführt werden, bei denen eine Achsenabweichung besteht, die nicht durch eine Gipskeilung oder das Wachstum korrigiert werden kann (7). Sie wird abhängig vom Unfallmechanismus und Frakturmuster durchgeführt (19).

Es wird zwischen der Reposition mit konservativer Therapie und Reposition mit operativer Therapie unterschieden (7). Bei der ersten Methode wird die Reposition geschlossen durchgeführt und anschließend ein Gips oder eine Schiene angelegt (22). Bei der operativen Behandlung kann die Reposition geschlossen oder offen erfolgen (7). Bei der erstgenannten Vorgehensweise erfolgt die Reposition geschlossen und nachfolgend eine innere Fixierung (22). Bei der offenen Reposition wird intraoperativ durch eine offene Darstellung und direkter Sicht auf die Fraktur eine Reposition vorgenommen, unabhängig von der anschließenden Fixation (22).

In Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ werden die Methoden der Finger-Trap und Arm-Traktion beschrieben (19). Bei diesen Verfahren soll bei kompletten Unterarmfrakturen durch Traktion eine korrekte Ausrichtung der Fraktur erzielt und Abweichungen korrigiert werden (19).

### **1.5.5.3 Operative Therapie**

Bei folgenden Frakturen besteht im Allgemeinen eine Indikation für eine operative Therapie (7, 19, 22):

- Offene Frakturen (7, 19)
- Frakturen mit Begleitverletzungen wie Weichteilschädigungen oder neurovaskulärer Beteiligung (7, 19)
- Nicht geschlossene reponierbare Frakturen (7, 19)
- Frakturen mit nicht akzeptablen Achsenabweichungen (alters- und lokalisationsabhängig) (7, 19, 22)
- Instabile Frakturen (19)

- Dislozierte Frakturen (nach Reposition instabil) (22)
- (Dislozierte) intraartikuläre Frakturen (7, 19)

Instabile und dislozierte Frakturen des Unterarms zeigen ein hohes Risiko einer sekundären Dislokation (22). Aus diesem Grund wird nach der Reposition eine operative Stabilisierung vorgenommen (22).

Diese dient zur Aufrechterhaltung der korrekten Position und minimiert zusätzlich das Risiko der Entstehung eines Kompartmentsyndroms (19). Je nach Verletzung gibt es verschiedene operative Wege, diese Frakturen zu therapieren (22).

#### **1.5.5.3.1 Elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN)**

Diese Methode stellt das primäre Verfahren zur operativen Versorgung im Wachstumsalter bei instabilen, dislozierten Unterarmschaftfrakturen dar (7, 22). Durch den vorgebogenen Marknagel kommt es am Eintrittspunkt, am Ende des Nagels und auf Frakturhöhe zu einer Dreipunktverspannung, sodass dieser dynamisch verankert wird (7). Durch dieses Verfahren sind bessere kosmetische Resultate mit weniger Funktionsstörungen im Vergleich zur die früher häufig verwendeten Plattenosteosynthesen zu erzielen (22). Zudem ist eine zusätzliche Ruhigstellung im Gips nicht notwendig, da eine übungstabile Situation geschaffen werden kann (7, 22). Beim Unterarm wird je ein Titanelastischer Nagel (TEN) in den betroffenen Knochen eingebracht (7).

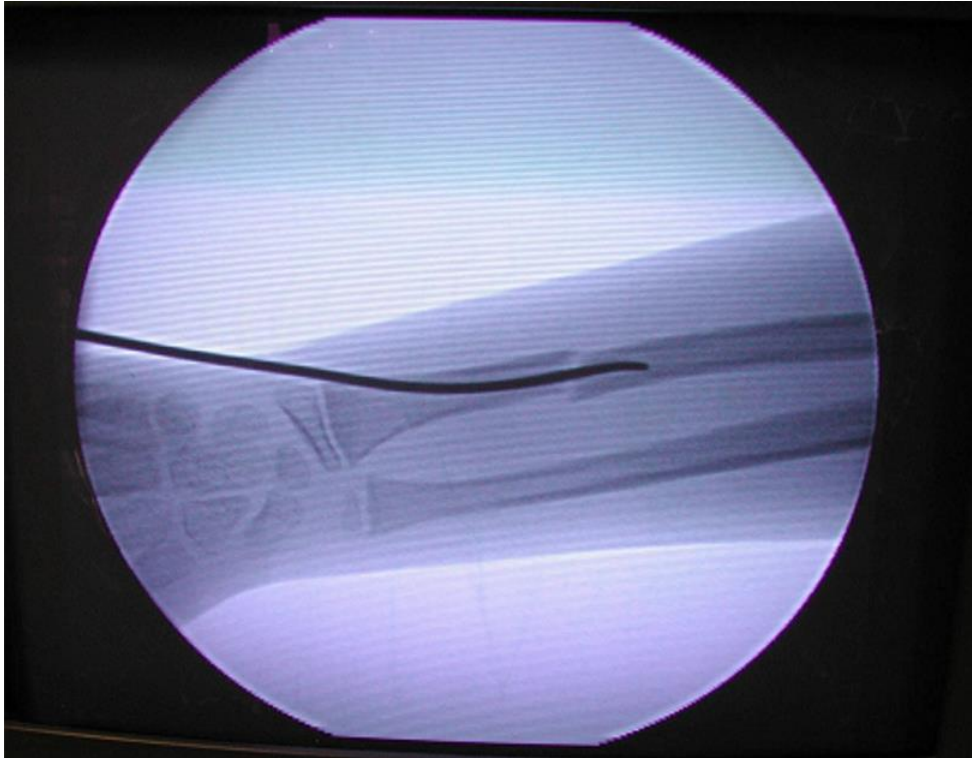
Es handelt sich somit um ein minimalinvasives und wenig traumatisierendes Osteosyntheseverfahren, das bei Kindern gut verwendet werden kann (31).

Bei der Durchführung des operativen Verfahrens mittels intramedullärer Nagelung wird zuerst der Knochen versorgt, der schwieriger zu reponieren ist (22). Dabei handelt es sich meist um den Radius (22). Der Nagel wird ascendierend von distal unter Bildwandlerkontrolle eingebracht (**Abbildung 18, Abbildung 19**) (22). Der Zugang liegt ca. 2 cm proximal der distalen Epiphysenfuge (22, 32). Hier wird eine kleine Hautinzision durchgeführt und der R. superficialis n. radialis dargestellt (22, 32). Dieser Nervenast wird mittels eines Hakens zur Seite gehalten, um eine Verletzung zu vermeiden (19, 22). Nun wird unter Blutstillung die Eintrittsstelle am Radius dargestellt und sich mit einem Pfriem unter Rotationsbewegungen durch die Kortikalis gearbeitet (22). Alternativ kann bei harter Kortikalis ein Spiralbohrer verwendet werden (22). Bei weit distal gelegenen Frakturen kann die Eintrittsstelle

dorsal über dem Tuberculum Listeri unter Schonung der Strecksehnen erfolgen (22). Hierbei darf das Nagelende nicht im Strecksehnenfach zum Liegen kommen (22). Bei beiden Zugangswegen wird der TEN aszendierend Richtung proximal über den Frakturspalt bis vor die proximale Epiphysenfuge vorgeschoben (**Abbildung 19**) (22). Hierbei gelingt meist eine geschlossene Reposition (22). Der Nagel wird gekürzt, sodass dieser subkutan zum Liegen kommt (7, 22).



**Abbildung 18:** *intraoperatives Bild bei dem Einbringen eines ESIN in den Radius, aus eigenem Krankengut*



**Abbildung 19:** *intraoperative Bildwandlerkontrolle bei der Einbringung eines ESIN in den Radius, aus eigenem Krankengut*

Die operative Versorgung der Ulna erfolgt deszendierend auf die gleiche Weise, ebenfalls unter Bildwandlerkontrolle (**Abbildung 20**) (22). Die Eintrittsstelle wird hierbei ca. 2 cm distal der Apophysenfuge des Olekranons festgelegt (22, 32). Es erfolgt eine kurze Hautinzision dorsoradial der Ulna unter Schonung der Olekranonapophyse (22, 32). Auch hier wird ein Pfriem zur Eröffnung der Markhöhle verwendet und der Marknagel von proximal über den reponierten Frakturspalt nach distal eingebracht (22).



**Abbildung 20:** *intraoperatives Bild bei der Einbringung eines ESIN in die Ulna, aus eigenem Krankengut*

Bei einer kompletten Unterarmfraktur müssen beide frakturierten Knochen mittels ESIN gesichert werden (**Abbildung 21**) (19, 22). Hierbei ist darauf zu achten, dass die Marknägel den gleichen Durchmesser aufweisen, so dass eine gleichmäßige Spannkraftentfaltung des Radius und der Ulna gegeben ist (22).



**Abbildung 21:** *intraoperative Bildwanderkontrolle einer vollständigen Unterarmfraktur nach der Versorgung mittels ESIN, aus eigenem Krankengut*

Insgesamt ist es wichtig, dass die eingebrachten Marknägel entsprechend der physiologischen Form der Knochen vorgebogen werden (19). Anderenfalls kann es zu einer unvollständigen Konsolidierung mit partieller Pseudoarthrose führen und das Risiko einer Refraktur erhöht sich (7).

In den letzten Jahren hat die operative Behandlungsmethode mit ESIN bei Frakturen des Unterarms zugenommen (19, 33). Hierbei wurden gute Ergebnisse mit einer niedrigen Komplikationsrate detektiert (33).

#### **1.5.5.3.2 Perkutane Kirschner-Draht-Osteosynthese**

Dieses operative Verfahren kann nach offener oder geschlossener Reposition zur Anwendung kommen (22). Es wird vor allem bei Frakturen mit kleinen peripheren Fragmenten verwendet, bei denen die Fraktur gut zu reponieren, aber schlecht zu halten ist (7). Somit stellt die perkutane Spickung das Mittel der Wahl bei gelenksnahen Unterarmfrakturen dar, die einer operativen Stabilisierung bedürfen (22). Auch bei Schafffrakturen im Übergang vom mittleren zum distalen

Drittels kann dieses Verfahren notwendig sein, um das distale Fragment ausreichend zu stabilisieren (7).

Die Kirschner-Drähte werden mit oder ohne kleinem Hautschnitt eingebracht, beispielsweise am Radius über dem Processus styloideus radii (**Abbildung 22**) (21). Manchmal kann es notwendig sein, einen zweiten Kirschner-Draht überkreuzend zu verwenden, um eine ausreichende Rotationstabilisierung zu erzielen (21, 22). Die Pins dürfen sich hierbei nicht auf der Höhe des Frakturspalts kreuzen (22). Die Epiphysenfuge sollte, wenn nötig, möglichst zentral durchbohrt werden und ihr Randbereich beim Einbringen des Metalls ausgespart bleiben, da es sonst zu Durchblutungsstörungen kommen kann (21, 22). Die Pins werden unter Schonung der Weichteilstrukturen und Bildwandlerkontrolle eingebracht (19, 22). Postoperativ ist altersabhängig eine Ruhigstellung in einer Unterarm- bzw. Oberarmgipsschiene mit Aussparung der Drahtenden zur Vermeidung von Druckulcera notwendig (7, 22). Überstehende Drähte können in der Regel nach drei bis sechs Wochen ohne Narkose entfernt werden (22). Drähte, die versenkt wurden, werden mit Hilfe einer Kurznarkose entfernt (22).



**Abbildung 22:** Bohrdraht-Osteosynthese einer distalen Radiusfraktur, aus eigenem Krankengut

### 1.5.5.3.3 Plattenosteosynthese

Diese operative Methode wird bei Unterarmfrakturen im Wachstumsalter nur in Ausnahmefällen durchgeführt (7). Bei der Frakturstabilisierung mittels Platten kann es zu einer Funktionsbehinderung der Pro- und Supination, sowie Fixierung von Achsenabweichung mit nachfolgender Funktionsstörung führen (7). Dennoch gibt es bestimmte Indikationen zur Wahl dieser Behandlungsmethode (7). Bei Patient\*innen mit geschlossenen Wachstumsfugen kann dieses operative Verfahren angewendet werden, um eine Stabilisierung der frakturierten Knochen zu erzielen (22). Zudem kann eine Fraktur im distalen metadiaphysären Übergang eine Indikation zur Verwendung einer Plattenosteosynthese sein, um eine ausreichende Stabilisierung des distalen Fragments zu erreichen (7, 22, 23).

Zur Stabilisierung einer Radiusfraktur wird die Hautinzision auf einer gedachten Linie zwischen Epicondylus radialis humeri und mittig auf der Dorsalseite des Radiusendes durchgeführt (22). Anschließend wird unter Schonung der Weichteile bis zum Knochen präpariert (22). Aufgrund der Lage des R. profundus n. radialis wird eine Darstellung des Nervenastes empfohlen, um eine Verletzung zu verhindern (22). Die Osteosyntheseplatte wird nach der Reposition zur Stabilisierung der Fraktur eingebracht und mittels Schrauben fixiert (22).

Bei Ulnafrakturen wird die Hautinzision auf der gedachten Linie zwischen Olekranon und Processus styloideus ulnae durchgeführt (22). Auch hier wird bis zum Knochen präpariert und die Platte zur Stabilisierung angebracht (22).

Nach dem Einbringen der Platten und Schrauben wird die Lage radiologisch kontrolliert (22). Anschließend kann eine kurzzeitige Ruhigstellung bis zur Abschwellung indiziert sein (22).

### 1.5.5.3.4 Fixateur externe

Dieses Verfahren wird bei offenen Frakturen und Frakturen mit einer starken Weichteilschädigung, sowie Mehrfragmentfrakturen angewendet (**Abbildung 23**) (7, 22). Zudem kann ein Fixateur externe eine Alternative bei Frakturen am Übergang vom mittleren zum distalen Schaftdrittels darstellen (7, 22).

Prinzipiell tolerieren Kinder den Fixateur externe meist relativ gut, sodass dieser aufgrund der schnellen Frakturheilung oft bis zur Ausheilung belassen werden kann (31). Ein Problem dieses Verfahrens stellt das mögliche Infektionsrisiko an den

Eintrittsstellen dar (31). Um das Infektionsrisiko möglichst gering zu halten, ist eine gute Pflegeanleitung für die Patient\*innen und die Eltern notwendig (31).



**Abbildung 23:** Verlauf einer offenen, dislozierten Unterarmfraktur mittels Fixateur Externe, aus eigenem Krankengut

### 1.5.6 Verlauf und Nachbehandlung

Nach der Operation mit einem Osteosyntheseverfahren, mit Ausnahme der Kirschner-Drähte, ist normalerweise keine Ruhigstellung im Gips notwendig, da eine ausreichende Stabilität gewährleistet ist (7). Hier können die Kinder bereits vom ersten postoperativen Tag spontane Bewegungsübungen durchführen (7). Nach individuellem Wunsch der Patient\*innen und ihrer Eltern wird jedoch häufig ein „Schutz“ gewünscht (7). In diesen Fällen erhalten die Kinder, auch zur Schmerztherapie, eine abnehmbare Unterarmschiene für einige Tage bis zwei oder drei Wochen (7, 22). Grundsätzlich sollte nach der Gipsanlage nochmals eine klinische Kontrolle im Gips mit der Überprüfung der peripheren Durchblutung, Sensibilität und Motorik erfolgen (7). Weitere klinische Kontrollen erfolgen meist um den 4. Tag, sowie bei den radiologischen Untersuchungsterminen (7).

Stellungskontrollen erfolgen normalerweise am 8. Tag nach der Gipsanlage beim Gipsschluss, um sekundäre Dislokationen ausschließen zu können (7, 22). Dieser Zeitpunkt stellt sich am günstigsten dar, da sich hier die Weichteilschwellung

zurückgebildet hat und die Fraktur bereits begonnen hat sich zu fixieren (7). Zeitgleich kann, wenn nötig, eine Keilung durchgeführt werden (7). Bei Patient\*innen älter als 12 Jahre, wird bei diaphysären Frakturen nochmals eine radiologische Kontrolle durchgeführt (7). Reponierte und osteosynthetisch versorgte Frakturen erhalten noch intraoperativ eine Stellungskontrolle (7). Weitere radiologische Stellungskontrollen sind hierbei durch die bewegungsstabile Situation normalerweise nicht notwendig (7). In Absprache mit den Eltern kann auch bei undislozierten Frakturen eventuell auf eine Röntgenkontrolle verzichtet werden (22).

Gipsfreie Konsolidationskontrollen werden bei reponierten Frakturen, Gelenksfrakturen, sowie bei Frakturen mit zu erwartenden Konsolidationsstörungen und bestehenden Achsenabweichungen durchgeführt (7). Diese erfolgen meist zwischen der 4. und 5. Woche (7, 22). Auch bei operativ versorgten Frakturen mit einer übungsstabilen Situation erfolgt ca. 4 bis 6 Wochen postoperativ eine Konsolidierungskontrolle (22). Die Fraktur gilt als radiologisch stabil, wenn mindestens drei der vier Kortikales eine ausreichend durchbaute Kallusbildung aufweisen (7). Anschließend sind keine weiteren radiologischen Kontrollen notwendig (7). Wenn jedoch die Kallusbildung nicht zufriedenstellend ist, wird der Arm nochmals ruhiggestellt und in der Regel nach vier bis sechs Wochen eine weitere radiologische Kontrolle durchgeführt (7). Bei Frakturen, bei denen eine periostale Reaktion ausbleibt, kann eine radiologische Diagnostik nicht ausreichend sein (7). Hier richten sich die therapeutischen Maßnahmen nach der Klinik (7).

Bei der Gipsabnahme wird der Kallus palpirt und die Bewegungsstabilität beurteilt (7). Bei einer Indolenz gilt die Fraktur als bewegungsstabil, bei einer dolenten Palpation wird der Arm unabhängig von dem radiologischen Befund bis zur Schmerzfreiheit nochmals ruhiggestellt (7). Dies wird abhängig von den Schmerzen für zwei bis vier Wochen beibehalten und nochmals kontrolliert (7).

Nach Gipsabnahme wird in der Regel eine Funktionskontrolle durchgeführt (7). Grundsätzlich sollten klinische Funktionskontrollen bis zur vollständig erreichten Funktionsfähigkeit erfolgen (7, 22).

Nach zufriedenstellender Konsolidierung der Fraktur kann das Kind seinen Arm anschließend selbst spontan mobilisieren (7). Ein Sportverbot sollte je nach Fraktur und Behandlungsverfahren für insgesamt 3 bis 6 Wochen eingehalten werden (7). Im Anschluss kann aufbauend mit sportlicher Betätigung begonnen werden (7).

Laut Literatur sollten bei einer operativen Versorgung mittels Marknägeln, die Metallentfernung nach drei bis vier Monaten (7) bzw. bis sechs Monaten (22) erfolgen (7). An der Univ.-Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie der Medizinischen Universität Graz werden Marknägeln bei Kindern unter 12 Jahren nach 6 Monaten und bei Kindern über 12 Jahren nach 12 Monaten entfernt. Bei einer Plattenosteosynthese erfolgt die Entfernung des Metalls normalerweise nach sechs bis acht Monaten (7, 22). Mittels Kirschner-Drähten versorgte Frakturen wird eine Metallentfernung nach vier bis sechs Wochen empfohlen (22). Vor der operativen Entfernung des Metalls wird eine erneute Röntgenkontrolle durchgeführt (22).

Bei subjektiver Beschwerdefreiheit der Patient\*innen, sowie zurückerhaltener Funktion des Arms und ausbleibenden Komplikationen, gilt die Behandlung als abgeschlossen (7).

Wachstumskontrollen sind nach Frakturen der oberen Extremitäten nicht notwendig (7). Bei Auftreten von Komplikationen, wie beispielsweise Funktionsstörungen oder Achsenabweichungen, sollte eine erneute Vorstellung erfolgen und eine radiologische Bildgebung erzielt werden (7).

### **1.5.7 Frakturheilung**

Der Mechanismus der Heilung einer Fraktur ist sehr komplex und kann primär als auch sekundär ablaufen (19). Um eine ungestörte Heilung einer Fraktur zu gewährleisten, gibt es bestimmte Voraussetzungen (27). Hierzu gehören die intakte Durchblutung, sowie die Ruhigstellung der Fraktur und ein Knochenkontakt der Fragmente (27).

Die primäre Knochenheilung kommt nach kompletten Frakturen selten vor (19). Nach einer operativen Behandlungsmethode mit anschließenden stabilen Verhältnissen der Knochenteile und guter Durchblutung heilt die Fraktur primär aus (19, 27). Dies bedeutet, es entwickelt sich neuer Knochen ohne Zwischenprodukt und somit ohne sichtbarer Kallusbildung (19, 27).

Bei der sekundären Knochenheilung erfolgt eine physiologische Heilung in nacheinander ablaufenden Schritten (27). Es kommt durch die Stimulation von Chondro- und Osteoblasten an der Innenseite des Periosts zu einer Kallusbildung (19, 27). Ausgehend von dem Kallus, dem unreifen Knochengewebe, entwickelt sich durch verschiedene Umbauprozesse ein reifer Knochen (19). Der Kallus wird im Verlauf durch osteoklastische Mechanismen wieder abgebaut (22). Diese Art der

Frakturheilung ist häufiger zu beobachten (19) und dauert physiologischerweise länger als die direkte Knochenheilung (27).

Zu erwähnen ist, dass die Frakturheilung im wachsenden Skelett in der Diaphyse und Epiphyse unterschiedlich abläuft (22). Die Heilung des Periosts mit Kallusbildung zur Frakturstabilisierung steht bei diaphysären Frakturen im Vordergrund (22). Dahingegen ist bei epiphysären Frakturen eine Wiederherstellung der Gelenksfläche am wichtigsten (22). Aus diesem Grund soll in diesem Bereich ein Behandlungsverfahren mit möglichst hoher Stabilität gewählt werden (22).

Insgesamt läuft die Knochenheilung bei Kindern schneller ab als bei erwachsenen Personen (19, 22). Je jünger das Kind ist, desto schneller wird die Stärke des frakturierten Knochens wieder hergestellt (19).

#### **1.5.8 Remodelling und Spontankorrektur**

Wie bereits erwähnt, weisen kindliche Knochen ein hohes Remodelling- und Korrekturpotential auf (7). Vor allem Bereiche in der Nähe von Wachstumsfugen sind besonders korrekturfähig (7, 22). Hier besteht eine erhöhte Vaskularität mit osteogenen Potential (22). So können vor allem Achsenabweichungen am distalen Unterarm beim Kind im hohen Maße korrigiert werden (22). Diese Korrekturmechanismen beruhen auf statisch-mechanischen Veränderungen im Knochen im Zusammenspiel mit der Korrektur während des Wachstums (7, 19, 21). Achsenfehlstellungen der Diaphyse und Metaphyse können in der Heilungsphase des Knochens durch konkavseitigen Knochenaufbau und konvexseitigen Knochenabbau korrigiert werden (22). Nach Roux kommt dies durch eine Anpassung an die Funktion, im Sinne „minimaler Materialaufwand für ein Maximum an Belastbarkeit“ zustande (22). Die Überlegungen zum Transformationsgesetz von Wolff im Sinne der „optimalen Balance zwischen Form und Funktion“ ergänzen dies (22). So erfolgt ein appositionelles Wachstum konkavseitig durch Druck und eine Resorption auf der konvexen Zugseite (22). Die Knochenbälkchenstruktur richtet sich nach der axialen Belastung aus (22).

Im Bereich der Epiphyse kommt die funktionelle Anpassung durch die Pauwels-Theorie zustande (22). Diese besagt, dass es druckbedingt durch asymmetrisches Wachstum zu einer genauen Ausrichtung der Epiphyse senkrecht zur Belastungsachse kommt (22). So handelt es sich in diesem Falle um eine

Scheinkorrektur, da die Achsenfehlstellung im Bereich der Dia-Metaphyse im eigentlichen Sinne bestehen bleibt (22).

Dieses Korrekturpotential ist altersabhängig und bestimmte Altersgrenzen wurden festgelegt (vgl. 1.4 Unterarmfrakturen im Kindes- und Jugendalter) (7). Mit zunehmendem Alter nehmen die Fähigkeiten der Korrekturmechanismen ab (21). Jedoch sollten diese Altersgrenzen nicht allzu starr angesehen werden, da jedes Kind individuelle Unterschiede in seiner Entwicklung aufweist und vermutlich noch deutlich stärkere Achsenabweichungen korrigiert werden können (21). Grundsätzlich kann gesagt werden, dass je älter das Kind ist, desto strenger sind die Toleranzgrenzen bei Frakturdislokationen anzusehen (21).

Zusammenfassend gilt: Im Schaftbereich sind nur geringe Achsenabweichungen als tolerabel anzusehen, da hier das Korrekturpotential begrenzt ist und Bewegungseinschränkungen als Folge auftreten können (21). Dislokationen im proximalen Unterarm sind nur sehr bedingt ausgleichbar, wobei Seit-zu-Seit-Verschiebung ein fast vollständiges Korrekturpotential aufweisen (7). Rotationen bei Unterarmfrakturen weisen normalerweise keine Spontankorrektur auf und müssen dementsprechend behandelt werden (19).

### **1.5.9 Komplikationen**

Die meisten Unterarmfrakturen heilen ohne weitere Probleme, jedoch können auch Komplikationen auftreten (34). Diese können in intraoperative und postoperative Komplikationen unterteilt werden, aber auch bei dem konservativen Behandlungsweg kann es zu Komplikationen kommen (22).

Komplikationen können auch durch die falsche bzw. unsachgemäße Anlage des Gipses auftreten (19). Es kann beispielsweise zu einer Dermatitis, Druckstellen, sowie Kontrakturen und auch einem Kompartmentsyndrom kommen (19).

Zu den intraoperativen Komplikationen zählen unter anderem (u.a.) Verletzungen der umliegenden Gewebestrukturen, Nerven- und Gefäßverletzungen und Perforation der Kortikalis (22).

#### **1.5.9.1 Bewegungseinschränkungen**

Bewegungseinschränkungen in der Pronation und Supination können eine mögliche Problematik darstellen (23). Dies tritt vor allem nach einer übermäßigen altersentsprechenden Achsenabweichung auf, bei der keine ausreichende Korrektur erzielt wurde (7, 23). Bei Schaftfrakturen des Unterarms ist die Steifigkeit

eine häufige Langzeitkomplikation, die mit einer Verringerung der Umwendebewegungen einhergeht (19). Geringe Defizite des Bewegungsumfangs werden von Patient\*innen häufig nicht bemerkt und meist treten keine funktionalen Einschränkungen auf (19).

#### **1.5.9.2 Sekundäre Dislokation**

Bei einer konservativen und operativen Behandlungsverfahren sind sekundäre Dislokationen möglich (22). Diese erfordern meist eine Reposition und operative Versorgung zur Stabilisierung (22).

#### **1.5.9.3 Wundinfektionen**

Wundinfektionen stellen auch eine Komplikation von Frakturen dar (19). Vor allem nach offenen Frakturen, aber auch bei operativer Versorgung kann dies vorkommen (19).

#### **1.5.9.4 Pseudarthrose**

Von einer Pseudarthrose wird bei einer fehlenden knöchernen Durchbauung nach 6 Monaten gesprochen (25). Die Bildung einer Pseudarthrose ist bei Kindern und Jugendlichen im Schaftbereich nicht häufig (23), kommt aber am ehesten nach einer offenen Reposition vor (22). Die Ulna ist von dieser Komplikation eher als der Radius betroffen (22, 23). Im distalen Unterarm kann es vor allem bei einem Abriss des Proc. styloideus ulnae häufig zur Ausbildung einer Pseudoarthrose kommen, diese ist jedoch meist asymptomatisch (23).

#### **1.5.9.5 Wachstumsstörungen**

Nach distalen Radiusfrakturen kann es zu Wachstumsstörungen kommen, diese können hemmend und auch stimulierend auftreten (22). Erstere kommen vermehrt nach Frakturen mit Beteiligung der Epiphyse und Epiphysiolyse vor (22). Im Bereich des Radius sind sie in der Literatur mit einer Häufigkeit von 1 bis 7% beschrieben (22). Die Ulna ist hierbei häufiger als der Radius betroffen (22). Zu einer Stimulation des Wachstums kann es prinzipiell nach allen Unterarmfrakturen kommen (22, 23). Folglich kann eine Längendifferenz der beiden Unterarmknochen entstehen, die jedoch im Wachstumsalter meist keine klinische Relevanz zeigt (7, 23), da sie sich im Laufe des Wachstums gegenüber dem Partnerknochen normalerweise wieder zu einem tolerablen Maß ausgleicht (7). Durch häufige

Repositionen und Refrakturen wird das Risiko für eine stimulative Wachstumsstörung erhöht (22). Wachstumsstörungen der distalen Ulna sind problematischer und bedürfen häufig einer Korrektur (7, 22, 23).

Selten kommt es nach Frakturen des distalen Unterarms zu einem vorzeitigen vollständigen oder partiellen Verschluss der distalen Wachstumsfuge des Radius oder der Ulna (7). Folglich kommt es zu einer Verkürzung des betroffenen Knochens (7). Hierdurch können kosmetische und funktionelle Störungen auftreten (22). Diese Problematik kann zu Dauerschmerz, problematischer Fehlstellung mit Einschränkung der Bewegung im Handgelenk und Instabilität führen (22). Somit sind rechtzeitige Maßnahmen zur Korrektur notwendig (7, 22).

Eine Längendifferenz von Radius und Ulna mit einer Überlänge der Ulna kann durch eine stimulative Wachstumsstörung der Ulna oder durch eine hemmende Wachstumsstörung des Radius entstehen (19). Folglich übt das Caput ulnae Druck auf die Handwurzelknochen, insbesondere das Os lunatum und das Os triquetum aus (19). Dies resultiert in Schmerzen bei Ulnardeviation, Extension und Kompression (19). Dieses Komplikationsmuster wird als „Ulnocarpal Impaction Syndrome“ bzw. Ulnavorschub bezeichnet (19). Therapeutisch ist eine Behandlung zu wählen, die zu einer Längenangleichung der Knochen führt (19).

Das Risiko der Entwicklung von Wachstumsstörungen ist umso geringer, je reifer die Wachstumsfuge entwickelt ist (11).

#### **1.5.9.6 Neurologische Komplikationen**

Zudem können neurologische Probleme auftreten (19). Im Prinzip kann jeder Nerv am Unterarm betroffen sein, wobei der N. medianus bei Schafffrakturen am häufigsten betroffen ist (19). Nervenläsionen können direkt bei der Frakturursache, im Rahmen der Frakturheilung oder durch eine therapeutische Intervention auftreten (19). Beim Einbringen des radialen TEN kann es beispielsweise zu einer Verletzung des R. superficialis n. radialis kommen (23). Die typischen Nervenläsionen des Unterarms wurden bereits oben beschrieben (1.2.4 Innervation des Unterarms).

Aus diesem Grund sollte die Motorik und Sensorik, genauso wie die Durchblutung bei Unterarmfrakturen immer überprüft werden (19).

Bei bestehenden Störungen der Nervenfunktion ist eine therapeutische Intervention indiziert (19).

### **1.5.9.7 Refrakturen**

Refrakturen stellen eine weitere Komplikation von Frakturen dar (7, 19). Dies kann beispielsweise bei einer zu früh durchgeführten Metallentfernung oder frühzeitig entfernte Ruhigstellung, sowie bei zu früher Belastung vorkommen (23). Aber auch bei unsachgemäß behandelten Grünholzfrakturen kann diese Komplikation auftreten (23). Hier stellt die Konvexe Seite des Knochens eine Sollbruchstelle dar (23). Teilweise wird bei konservativ versorgten Grünholzfrakturen eine Refrakturrate von bis zu 20% bis 35% beschrieben (7, 21). Aus diesen Gründen muss bei Grünholzfrakturen auf das erhöhte Risiko einer Refraktur aufgeklärt werden (21).

Das Risiko einer Refraktur beträgt laut Literatur insgesamt zwischen 1% und 8% (26, 34, 35) und kommt meist innerhalb der ersten zwei Monate nach Gips- bzw. Metallentfernung vor (22, 23).

## **1.6 Refrakturen von Unterarmfrakturen**

Der Unterarm stellt die häufigste Lokalisation für Refrakturen im kindlichen Skelett dar (19).

Refrakturen werden definiert als erneute Frakturen, die dieselbe Lokalisation des betroffenen Knochens wie bei der Erstfraktur aufweisen (34, 36).

Sie können in die frühe und in die späte Form eingeteilt werden (36). Bei der frühen Form von Refrakturen kommt es zu einer erneuten Fraktur des betroffenen Knochens, bei noch nicht vollständig reifem Kallus (36). Sie kommen zeitnah zur Erstfraktur vor (36). Bei der späten Form ist der Knochen bereits vollständig umgebaut und tritt somit zeitlich später auf (36). In der Literatur werden unterschiedliche Zeitangaben für die Definition einer Refraktur angegeben; die Werte liegen hierbei meist bis zu einer Zeit von 18 Monaten nach der initialen Fraktur, jedoch wurden häufig keine genauen Angaben dokumentiert (26, 33-36).

### **1.6.1 Epidemiologie**

In der Literatur variieren die Zahlen für das Auftreten einer Refraktur von Radius und/oder Ulna zwischen 1% und 8% (19, 26, 34, 35).

Im Vergleich zu allen pädiatrischen Frakturen ist der Bereich des Unterarmschafts die häufigste Lokalisation für eine Refraktur (19). Hiervon wiesen bis zu 84% der Refrakturen initial eine Grünholzfraktur auf (19). In der Literatur wird beschrieben, dass diaphysäre Refrakturen bis zu acht Mal häufiger auftreten als

distale Refrakturen (19, 34). Das proximale und mittlere Drittel stellt hierbei die häufigste Lokalisation dar (19).

Laut Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ sind männliche Patienten häufiger als weibliche Patientinnen betroffen (19). Diaphysäre Refrakturen treten bei älteren Kindern um das 12. Lebensjahr am häufigsten auf (19).

Das größte Risiko für das Auftreten einer Refraktur im Bereich des Unterarms liegt laut einem aktuellen „systematic review“ aus dem Jahr 2021 innerhalb von 9 Monaten nach der initialen Fraktur (26). Im Durchschnitt treten Refrakturen des Unterarms nach 6 Monaten nach den initialen Frakturen auf (19).

### **1.6.2 Ätiologie**

Zu den Risikofaktoren einer Refraktur zählen beispielsweise folgende Faktoren:

- Grünholzfrakturen (34, 36)
- Unangemessene Reposition (36)
- Unvollständige knöcherne Ausheilung (34, 36)
- Zu frühe Gipsabnahme (34)
- Früher Beginn von Aktivitäten wie Risikosportarten: beispielsweise Skateboard und Snowboard (19)

Zusätzlich können aber auch Umstände wie ein junges Alter der Kinder, die Lokalisation der Fraktur vor allem im mittleren Schaftbereich oder bleibende Achsenabweichungen Risikofaktoren darstellen (34).

### **1.6.3 Behandlung von Refrakturen**

In der Literatur wird beschrieben, dass sowohl eine konservative als auch operative Methode zur Behandlung einer Refraktur möglich sind (33, 34). Insgesamt sind in der Literatur bisher nicht viele Studien über die optimale Behandlung von Refrakturen veröffentlicht worden.

Grundsätzlich ist die beste Behandlung von Refrakturen die Prävention (19). Es gibt Studien mit sehr guten Resultaten bei der Behandlung von Refrakturen durch konservative Therapiemethoden mittels geschlossener Reposition zur Fehlstellungskorrektur und anschließender Immobilisierung im Gips (19, 34, 37). So wird eine ausreichend lange Zeit zur Ruhigstellung im Gips empfohlen, da Refrakturen im Gips selten auftreten (19). Die Eltern sollten über das Refrakturrisiko aufgeklärt werden (19).

Einige Autoren empfehlen nach einer Refraktur eine operative Vorgehensweise mit innerer Fixierung (19). Die Behandlungsmethode mit ESIN von diaphysären Refrakturen des Unterarms erzielt in der Studie von Weinberg et. al. gute Ergebnisse (33).

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Studiendesign**

Ziel der vorliegenden Studie ist die retrospektive Auswertung und Analyse von allen Patient\*innen (weiblich und männlich) im Kindes- und Jugendalter bis 18 Jahren, die aufgrund von Unterarm-Refrakturen (Radius und/oder Ulna) an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie der Medizinischen Universität Graz im Zeitraum von 2008 bis 2018 behandelt wurden. Diese Daten wurden unter den Gesichtspunkten der Behandlung der Erstfraktur und Refraktur analysiert. Weiters werden die Risikofaktoren für das Auftreten einer Unterarm-Refraktur herausgearbeitet. Anhand der Ergebnisse werden eine optimale Behandlung von Erst- und Refrakturen im Vergleich zu den in der Literatur bereits beschriebenen Vorgehen diskutiert.

#### **2.1.1 Votum der Ethikkommission**

Die Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz bewilligte den gestellten Antrag mit der EK-Nummer 31-296ex 18/19.

#### **2.1.2 Patientenkollektiv**

In das Patientenkollektiv wurden alle weiblichen und männlichen Kinder und Jugendliche im Alter zwischen 0 und 18 Jahren aufgenommen, die im Zeitraum von 2008 bis 2018 an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie der Medizinischen Universität Graz aufgrund von einer Refraktur des Unterarms in ambulanter und/oder stationärer Behandlung waren. Eine Refraktur wurde als eine wiederholte Fraktur einer oder beider Knochen des Unterarms an der gleichen Lokalisation wie bei der Erstfraktur definiert. Die zeitliche Begrenzung für das Auftreten der erneuten Fraktur wurde zwischen 21 und 365 Tage limitiert. Es wurden alle Patient\*innen inkludiert, bei denen ausreichende Informationen zur Erstfraktur und Refraktur zur Verfügung standen. Sie wurden bis zur adäquaten Knochenheilung und Gipsabnahme klinisch und bei Bedarf radiologisch begleitet. Es gab keine signifikanten Lücken in der Datenerhebung.

#### **2.1.3 Ausschlusskriterien**

Zu den Ausschlusskriterien gehörten Patient\*innen mit fehlenden Daten, doppelt oder mehrfach vorkommenden Fallnummern, ein Alter über 18 Jahre, der

Diagnose „Verdacht auf (Re-)Fraktur“ oder „Zustand nach (Re-)Fraktur“, unterschiedliche Armlokalisationen, pathologische Frakturen, Olekranonfrakturen, Radiushalsfrakturen, Condylusfrakturen, Stauchungen und reine Wulstfrakturen.

#### **2.1.4 Datenerhebung**

Die Datenerhebung erfolgte durch das krankenhausinterne Dokumentationssystem, das elektronische Datennetzwerk openMEDOCS des LKH Graz. Hierzu wurden die Daten und Befunde von stationär und ambulant versorgten Patient\*innen mittels Durchsicht der Arztbriefe, Ambulanzkarten und Operationsberichten ermittelt. Es wurden insgesamt 31.747 Fälle von Kindern und Jugendlichen mit einer Fraktur in dem genannten Zeitraum an der Universitätsklinik der Medizinischen Universität Graz dokumentiert. Diese Daten wurden gesichtet und weiter selektiert, sodass insgesamt 7.891 Patient\*innen mit einer Unterarmfraktur identifiziert werden konnten. Hieraus konnte eine Anzahl von 176 Patient\*innen mit einer Refraktur des Unterarms selektiert werden, die durch die oben genannten Exklusionskriterien auf insgesamt 96 Patient\*innen reduziert wurden. Diese wurden in die retrospektive Analyse eingeschlossen.

#### **2.1.5 Methodik**

Die Daten und Befunde wurden aus dem Informationsnetzwerk des LKH Graz openMEDOCS erhoben und in Excel 2019® (Microsoft Corporation, Microsoft Excel [Internet]. 2018, USA) zur weiteren Verwaltung, Verarbeitung und Auswertung exportiert. Es wurden unten aufgelistete Parameter für die Erstfraktur und Refraktur erfasst. Anschließend wurde eine retrospektive Datenanalyse aller in die Studie inkludierter Patient\*innen mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Statistics 21® (IBM Corp. Released 2012. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0 Armonk, NY: IBM Corp) durchgeführt und ausgewertet. Zudem wurden die Röntgenbilder und -befunde der Patient\*innen zur Beurteilung der Frakturart näher analysiert.

Anschließend erfolgte eine Literaturrecherche zum Thema Risikofaktoren für Refrakturen des Unterarms und der optimalen Behandlung von Unterarmfrakturen sowie Refrakturen. Diese Behandlungsoptionen wurden in Relation zur Vorgehensweise der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie in Graz gesetzt.

## 2.2 Statistische Auswertung

Aus dem klinischen Informationsnetzwerk openMEDOCS wurden folgende Zielgrößen zur statistischen Auswertung der Initialfraktur und Refraktur erfasst:

### Hauptzielgrößen:

- Behandlung der Erstfraktur (konservativ, operativ)
- Zeitspanne zwischen Erstfraktur und Refraktur

### Nebenzielgrößen:

- Geschlecht
- Geburtsdatum

### Informationen zur Erstfraktur

- Unfalldatum
  - Alter
  - Unfalljahr
  - Unfallursache
  - Lokalisation im Knochen (nach Drittel aufgeteilt: proximal, diaphysär, distal)
  - Art der Erstfraktur (geschlossen, offen)
  - Klassifikation der Erstfraktur (Radius, Ulna, komplette Fraktur des Unterarms)
    - Grünholzfraktur (ja, nein)
  - Behandlungsmethode
    - operativ, konservativ
    - TEN (ja, nein)
    - Bohrdrähte (ja, nein)
    - Plattenosteosynthese (ja, nein)
    - Implantat (ja, nein)
  - Reposition
    - ja, nein
    - geschlossen, offen
  - Art der Ruhigstellung (keine, UAG = Unterarmgips, OAG = Oberarmgips)
  - Gipsdauer
-

- Erstversorgung (intern, extern)
- Aufenthalt (ambulant, stationär)
- Zeitpunkt der Sportfreigabe

#### Informationen zur Refraktur

- Unfalldatum
- Alter zum Unfallzeitpunkt
- Unfallursache
- Behandlungsmethode (konservativ, operativ)
- Aufenthaltsdauer
- ESIN in situ (bereits entfernt, in situ)
- Reposition
  - ja, nein
  - geschlossen, offen
- OP (ja, nein)
  - TEN (ja, nein)
  - Bohrdrähte (ja, nein)
  - Plattenosteosynthese (ja, nein)
- Art der Ruhigstellung (keine, UAG, OAG)
- Gipsdauer
- Dauer des Metalls in situ
- Komplikationen (nein, ja)
- Re-Refraktur (nein, ja)

Diese Parameter wurden als Basis zur statistischen Analyse der Daten verwendet. Sie wurden in das Statistik-Programm SPSS Statistics 21<sup>®</sup> (IBM Corp. Released 2012. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0 Armonk, NY: IBM Corp) exportiert. Die Parameter wurden mittels deskriptiver und explorativer Datenanalyse ausgewertet. Für die numerischen Daten wurden – abhängig von der Verteilung – Mittelwerte und Standardabweichungen oder Mediane und Quartile berechnet. Die kategorischen Daten wurden als absolute (n) bzw. relative (%) Häufigkeiten dargestellt. Zur Beurteilung der Normalverteilung wurde ein Kolmogorov-Smirnov-Test angewendet. Stichproben zweier unabhängiger Gruppen wurden im Falle einer Normalverteilung mittels T-Tests verglichen. Lag keine Normalverteilung vor, dann wurde der Mann-Whitney-U-Test (MWU-Test)

angewandt. Mittels Kruskal-Wallis-Test und anschließendem Post-hoc-Test (MWU) nach erfolgter Bonferroni Korrektur wurden potentielle Unterschiede mehrerer unabhängiger Stichproben untersucht. Mittels Chi-Quadrat-Test wurden kategoriale Daten verglichen. Die statistische Signifikanz wurde als  $p < 0,05$  festgelegt.

### **2.3 Datenschutz**

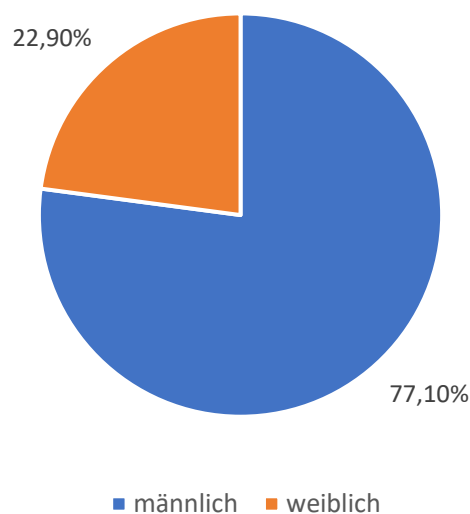
Alle Patient\*innen wurden mit einer fortlaufenden Nummer codiert (pseudonymisiert). Die ausgewerteten Daten wurden mit diesem Code versehen und in einer Tabelle von Excel 2019<sup>®</sup> (Microsoft Corporation, Microsoft Excel [Internet]. 2018, USA) auf einem Computer mit Zugriffsbeschränkung an der Univ.-Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie gespeichert und anschließend ausgewertet. Nur autorisierte Personen hatten Zugriff auf die Originaldaten.

### 3 Ergebnisse – Resultate

Insgesamt wurden aus 7.891 Patient\*innen mit Unterarmfrakturen 96 Patient\*innen mit einer Refraktur des Unterarms im Zeitraum von 2008 bis 2018 in die retrospektive Analyse inkludiert. Dies ergibt eine Refrakturrate von 1,2%.

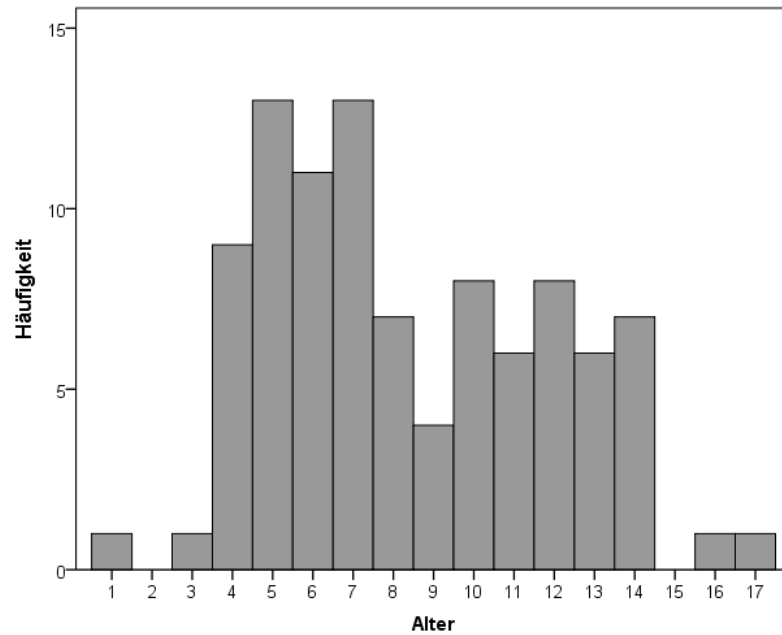
#### 3.1 **Alter und Geschlecht**

Bei der Begutachtung der Geschlechtsverteilung wurden im Rahmen der Studie 74 (77,1%) männliche und 22 (22,9%) weibliche Kinder bzw. Jugendliche gefunden (**Abbildung 24**).



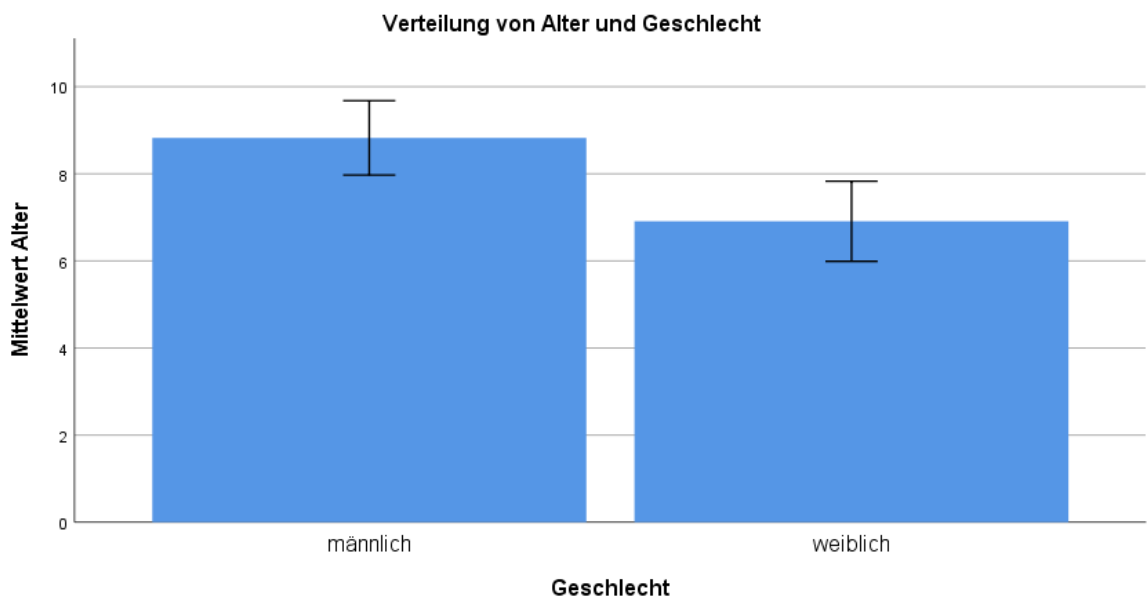
**Abbildung 24: Geschlechtsverteilung**

Das durchschnittliche Alter unserer Patient\*innen ergab bezüglich der Erstfraktur einen Mittelwert von  $8,4 \pm 3,5$  Jahren (Median 7,5 Jahre, Spanne 1-17 Jahre). Es zeigte sich eine Häufung von Patient\*innen mit einem Alter von 5 bis 7 Jahren (**Abbildung 25**).



**Abbildung 25:** Häufigkeitsverteilung des Alters bei Unterarmfrakturen

Das durchschnittliche Alter der weiblichen Patientinnen betrug  $6,2 \pm 2,2$  Jahre (Spanne 4-12 Jahre) während bei den männlichen Patienten ein Durchschnittsalter von  $8,8 \pm 3,7$  Jahre (Spanne 1-17 Jahre) ermittelt wurde. Dieser Altersunterschied zwischen den Geschlechtern war statistisch signifikant ( $p=0,031$ , MWU-Test) (Abbildung 26).



**Abbildung 26:** Verteilung von Alter und Geschlecht

### 3.2 Unfallursachen

Die Unfallursachen wurden in verschiedene Kategorien eingeteilt. So wurden 39 (40,6%) der Erstfrakturen, die im Verlauf eine Refraktur aufwiesen durch einen Sturz ausgelöst. Insgesamt 24 (25%) der initialen Frakturen waren bedingt durch Sportunfälle. 18 (18,8%) Frakturen entstanden durch Spielplatzunfälle, inklusive Trampolinunfällen. 13 (13,5%) Frakturen wurden durch einen Unfall mit einem Fortbewegungsmittel verursacht und 2 (2,1%) durch nicht näher definierte Ursachen.

Es konnte ein geschlechtsabhängiger Unterschied in den Unfallursachen festgestellt werden ( $p=0,023$ , Chi-Quadrat-Test). Die häufigste Unfallursache stellte ein Sturz dar. Während bei den Jungen sportliche Aktivitäten an zweiter Stelle kamen, waren es bei den Mädchen Unfälle auf dem Spielplatz. Die Ergebnisse der detaillierten Untersuchung der Unfallursachen aufgeteilt nach Geschlecht sind in **Tabelle 4** dargestellt.

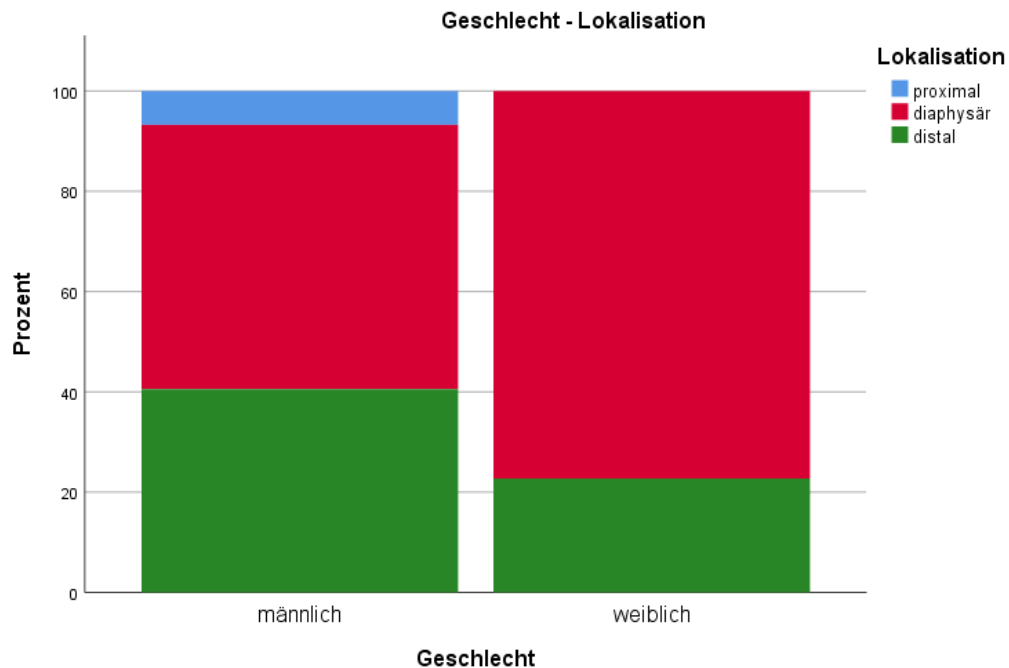
Geschlecht	Sturz	Sport	Spielplatz	Fortbewegungsmittel	Andere Ursachen	Gesamt
Weiblich	10 (45,4%)	2 (9,1%)	6 (27,3%)	2 (9,1%)	2 (9,1%)	22 (100%)
Männlich	29 (39,2%)	22 (29,7%)	12 (16,2%)	11 (14,9%)	0 (0%)	74 (100%)

**Tabelle 4:** Unfallursachen der Erstfrakturen nach Geschlecht

### 3.3 Lokalisation

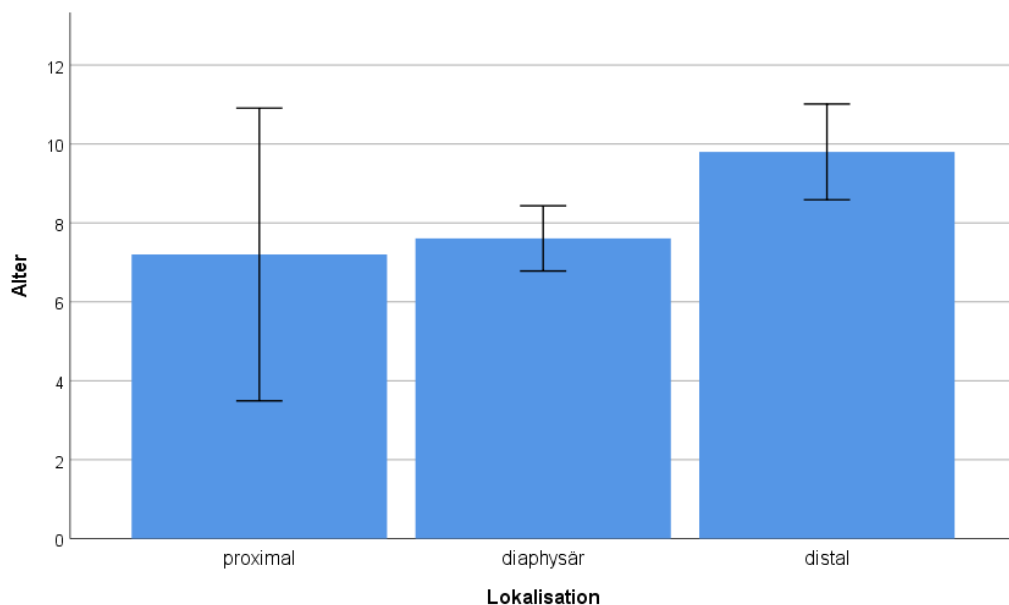
Die Auswertung der Frakturlokalisierung des betroffenen Knochens zeigte insgesamt 56 Frakturen (58,3%) im diaphysären Bereich, 35 (36,5%) im distalen Anteil und 5 (5,2%) im proximalen Anteil des Unterarms.

Bei der Unterteilung der Frakturen nach Geschlecht wurde kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Lokalisation der Frakturen gefunden ( $p=0,095$ , Chi-Quadrat-Test) (**Abbildung 27**). Es konnten 39 (52,7%) der Frakturen im diaphysären, 30 (40,5%) im distalen und 5 (6,8%) im proximalen Anteil bei den männlichen Patienten gefunden werden. Im Vergleich dazu wiesen die weiblichen Kinder und Jugendlichen 17 (77,3%) Frakturen in der Diaphyse und 5 (22,7%) im distalen Unterarm auf. Proximale Refrakturen des Unterarms traten bei den weiblichen Patientinnen nicht auf.



**Abbildung 27:** Geschlechtsverteilung der Knochenlokalisierung

Das durchschnittliche Alter bei proximalen Frakturen lag bei  $7,2 \pm 4,1$  Jahren (Median 7 Jahre, Spanne 1-11 Jahre), bei diaphysären Frakturen bei  $7,6 \pm 3,1$  Jahren (Median 7 Jahre, Spanne 4-17 Jahre) und bei distal lokalisierten Frakturen bei  $9,8 \pm 3,6$  Jahren (Median 10 Jahre, Spanne 3-16 Jahre) (**Abbildung 28**).



**Abbildung 28:** Altersverteilung der Knochenlokalisierung der Erstfrakturen

Es zeigten sich signifikante Unterschiede beim Alter und der Lokalisation der Fraktur ( $p=0,009$ , Kruskal-Wallis-Test). Bei den paarweisen Vergleichen der Lokalisation der Frakturen hinsichtlich des Alters der Patient\*innen war ein

signifikanter Unterschied zwischen diaphysären und distalen Frakturen zu erkennen ( $p=0,008$ , MWU-Test nach Bonferroni Korrektur). So waren die Patient\*innen mit einer distalen Fraktur älter als Patient\*innen mit einer diaphysären Fraktur. Bei den Vergleichen diaphysärer und proximaler ( $p=1,000$ , MWU-Test nach Bonferroni Korrektur), sowie proximaler und distaler Frakturen ( $p=0,590$ , MWU-Test nach Bonferroni Korrektur) war jedoch kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Alters ersichtlich.

### 3.4 Art der Fraktur

Es wurden 94 (97,9%) geschlossene Erstfrakturen und 2 (2,1%) initial offene Frakturen untersucht.

### 3.5 Betroffene Knochen des Unterarms

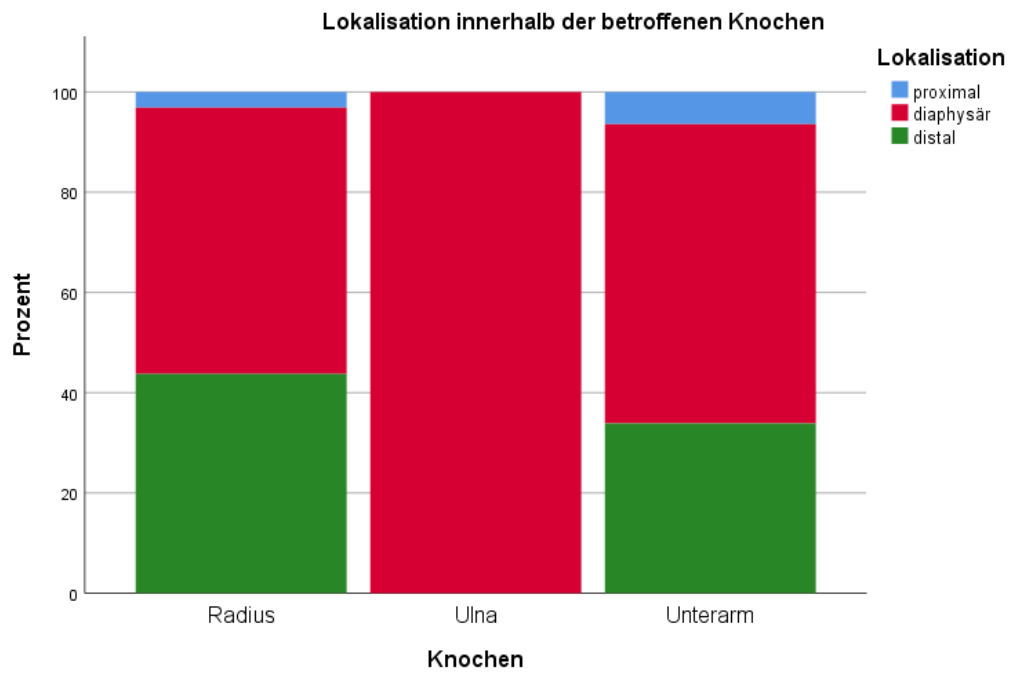
Bei 62 Patient\*innen (64,6%) lag eine Unterarmfraktur (Radius und Ulna) vor. Ein Drittel der Frakturen waren ( $n=32$ ; 33,3%) Radiusfrakturen und 2 (2,1%) waren isolierte Frakturen der Ulna.

Bei der Betrachtung der betroffenen Knochen nach Geschlecht bestand kein signifikanter Unterschied ( $p=0,713$ , Chi-Quadrat-Test). Eine detaillierte Geschlechtsverteilung der Frakturen ist in **Tabelle 5** zu finden.

Geschlecht	Radius	Ulna	Unterarm	Gesamt
Weiblich	8 (36,4%)	0 (0%)	14 (63,6%)	<b>22 (100%)</b>
Männlich	24 (32,4%)	2 (2,7%)	48 (64,9%)	<b>74 (100%)</b>

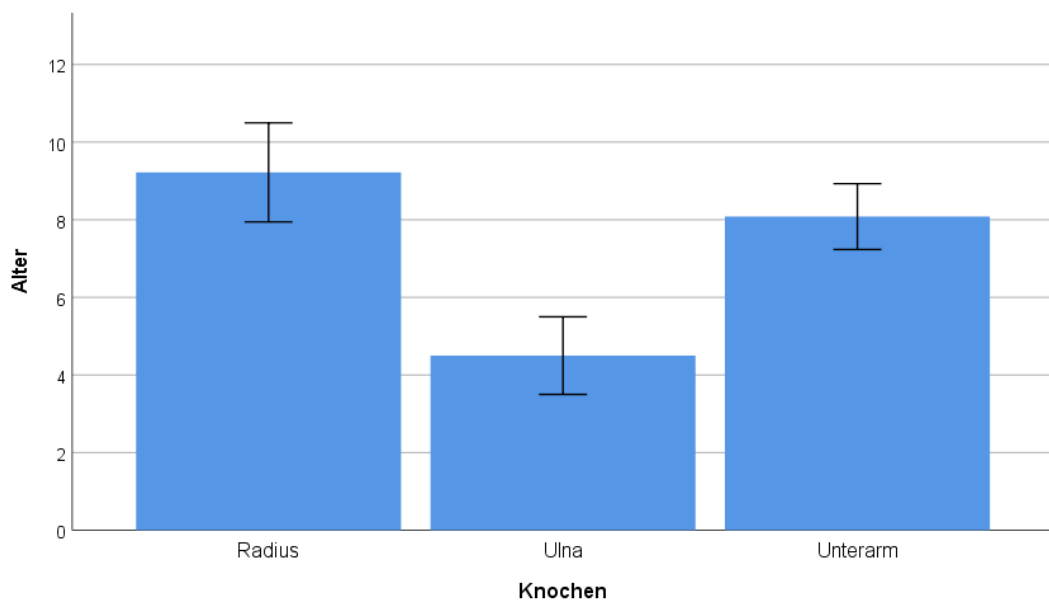
**Tabelle 5:** Geschlechtsverteilung der betroffenen Knochen

Bei genauer Betrachtung der Frakturlokalisierung innerhalb des betroffenen Knochens war kein signifikanter Unterschied zu finden ( $p=0,622$ , Chi-Quadrat-Test) (**Abbildung 29**). So waren am Radius 17 (53,1%) Frakturen im diaphysären, 14 (43,8%) im distalen und 1 (3,1%) am proximalen Bereich lokalisiert. An der Ulna waren nur 2 (100%) Frakturen im Bereich der Diaphyse zu finden. Bei der kompletten Unterarmfraktur (Radius und Ulna) ergaben 37 (59,6%) eine diaphysäre, 21 (33,9%) eine distale und 4 (6,5%) eine proximale Lokalisation an den betroffenen Knochen (**Abbildung 29**).



**Abbildung 29:** Lokalisation innerhalb der betroffenen Knochen

Bei der Altersverteilung der Frakturen von Radius, Ulna und des kompletten Unterarms wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden (Mittelwerte  $9,2 \pm 3,6$  Jahre vs.  $4,5 \pm 0,7$  Jahre vs.  $8,1 \pm 3,3$  Jahre;  $p=0,070$ , Kruskal-Wallis-Test) (**Abbildung 30**).

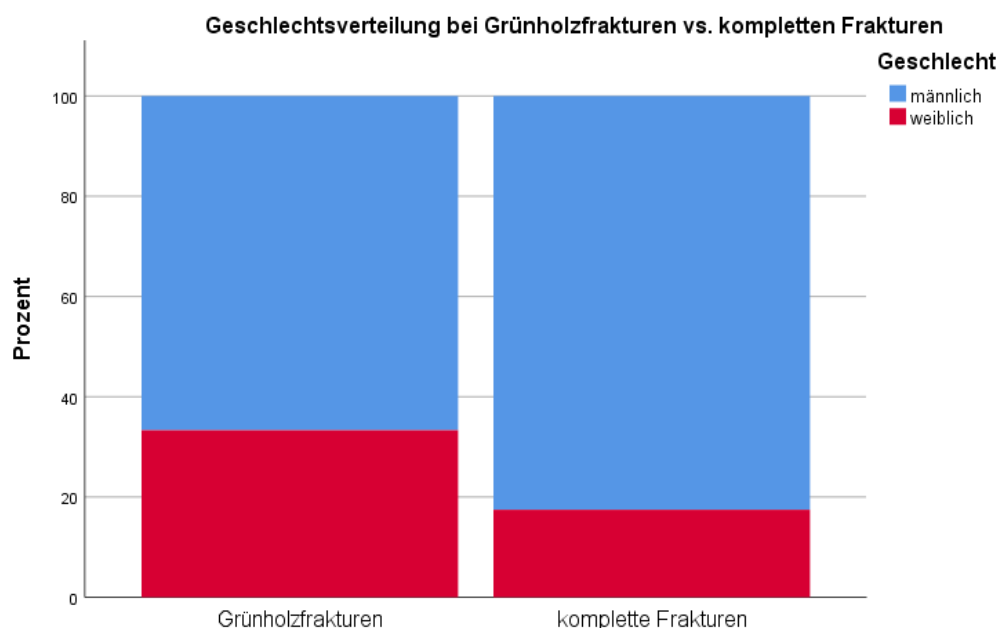


**Abbildung 30:** Altersverteilung der betroffenen Knochen der Erstfrakturen

### 3.6 Grünholzfrakturen

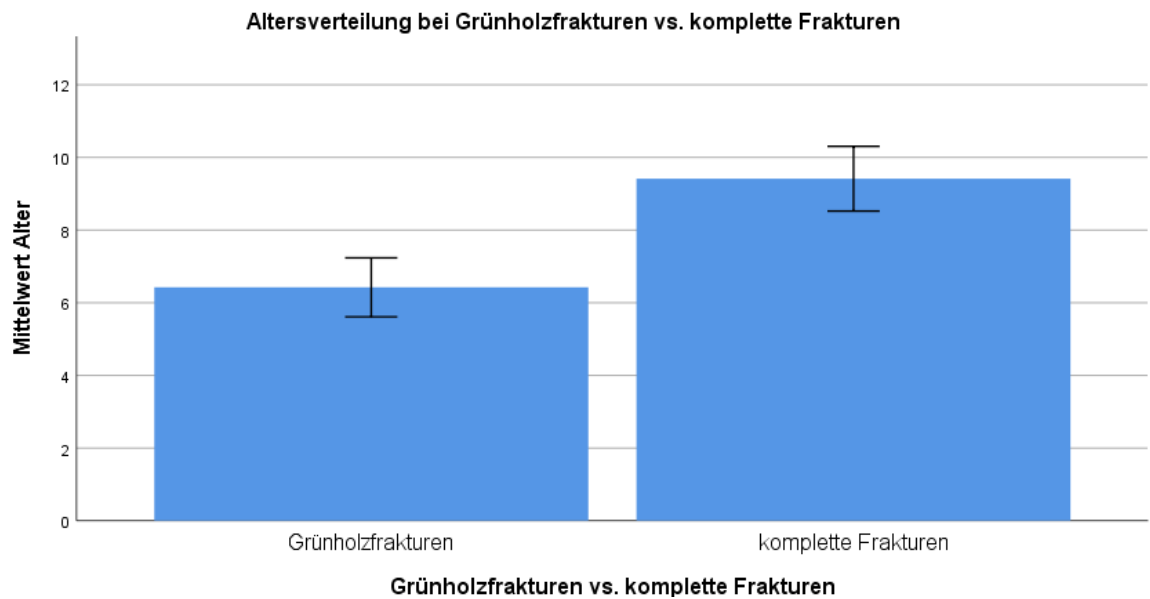
33 (34,4%) der Erstfrakturen wurden radiologisch als Grünholzfrakturen diagnostiziert. Die restlichen 63 (65,6%) Patient\*innen wiesen eine komplette Fraktur der betroffenen Knochen auf.

Bei der Geschlechtsverteilung von Grünholzfrakturen und kompletten Frakturen des Unterarms ergab sich, wie in **Abbildung 31** zu erkennen, kein signifikanter Unterschied ( $p=0,079$ , Chi-Quadrat-Test). So wiesen 22 (66,7%) männliche Patienten und 11 (33,3%) weibliche Patientinnen eine Grünholzfraktur auf. Eine komplette Fraktur der Knochen wurde bei 52 (82,5%) männlichen und bei 11 (17,5%) weiblichen Studienteilnehmer\*innen identifiziert.



**Abbildung 31:** Geschlechtsverteilung bei Grünholzfrakturen vs. kompletten Frakturen der Erstfrakturen

Die Patient\*innen mit einer Grünholzfraktur waren signifikant jünger als die Patient\*innen mit einer vollständigen Fraktur der Knochen (Median bei Grünholzfrakturen  $6 \pm 3$  vs. komplette Frakturen  $10 \pm 6$ ,  $p < 0,001$ , MWU-Test) (**Abbildung 32**).

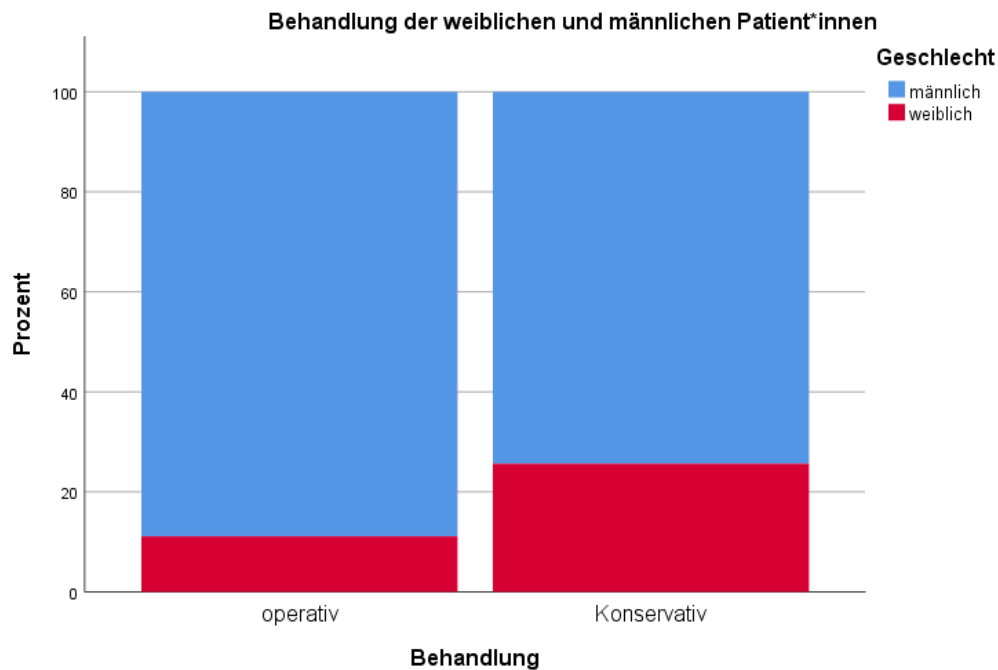


**Abbildung 32:** Altersverteilung bei Grünholzfrakturen vs. komplette Frakturen der Erstfrakturen

### 3.7 Behandlung der Erstfrakturen

Bei 78 (81,2%) Kindern und Jugendlichen erfolgte bei der Erstfraktur eine konservative Behandlung. 18 (18,8%) Patient\*innen wurden operativ versorgt. Hierbei kamen verschiedene Osteosyntheseverfahren zur Stabilisierung zur Verwendung. 16 (16,7%) der Patient\*innen wurden mit ESIN versorgt. Bei insgesamt 2 (2,1%) Patienten wurde eine operative Stabilisierung durch das Anbringen einer Osteosyntheseplatte erzielt. Bei einem dieser jungen Patienten (1%) wurde aufgrund des Frakturtyps eine Kombination aus einer Plattenosteosynthese und Bohrdrähten (PIN) zum Erreichen einer adäquaten Stabilität durchgeführt. Ein Fixateur externe wurde bei dem inkludierten Patienten\*innenkollektiv nicht angewandt.

Beim Vergleich der Geschlechtsverteilung konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich operativer oder konservativer Behandlung der Erstfraktur festgestellt werden ( $p=0,186$ ; Chi-Quadrat-Test) (**Abbildung 33**). 16 (21,6%) der insgesamt 74 männlichen Studienteilnehmer\*innen und 2 (9,1%) der 22 weiblichen Patientinnen wurden operativ versorgt. Konservativ wurden 58 (78,4%) männliche und 20 (90,9%) weibliche Patient\*innen behandelt.



**Abbildung 33:** Übersicht über die prozentuale Verteilung der Behandlung der Erstfrakturen

### 3.8 Reposition

Eine Reposition der Erstfraktur wurde bei insgesamt 64 (66,7%) Patient\*innen vorgenommen. Hierbei wurde bei insgesamt 62 (96,9%) Kindern bzw. Jugendlichen eine geschlossene Reposition und bei 2 (3,1%) eine offene Reposition durchgeführt.

Es ergaben sich keine Altersunterschiede bei Behandlung und Reposition ( $p=0,788$ , T-Test). So zeigte sich ein Mittelwert des Alters bei reponierten Frakturen von  $8,5 \pm 3,3$  Jahren vs. konservativ versorgten Frakturen von  $8,3 \pm 3,8$  Jahren.

### 3.9 Immobilisation

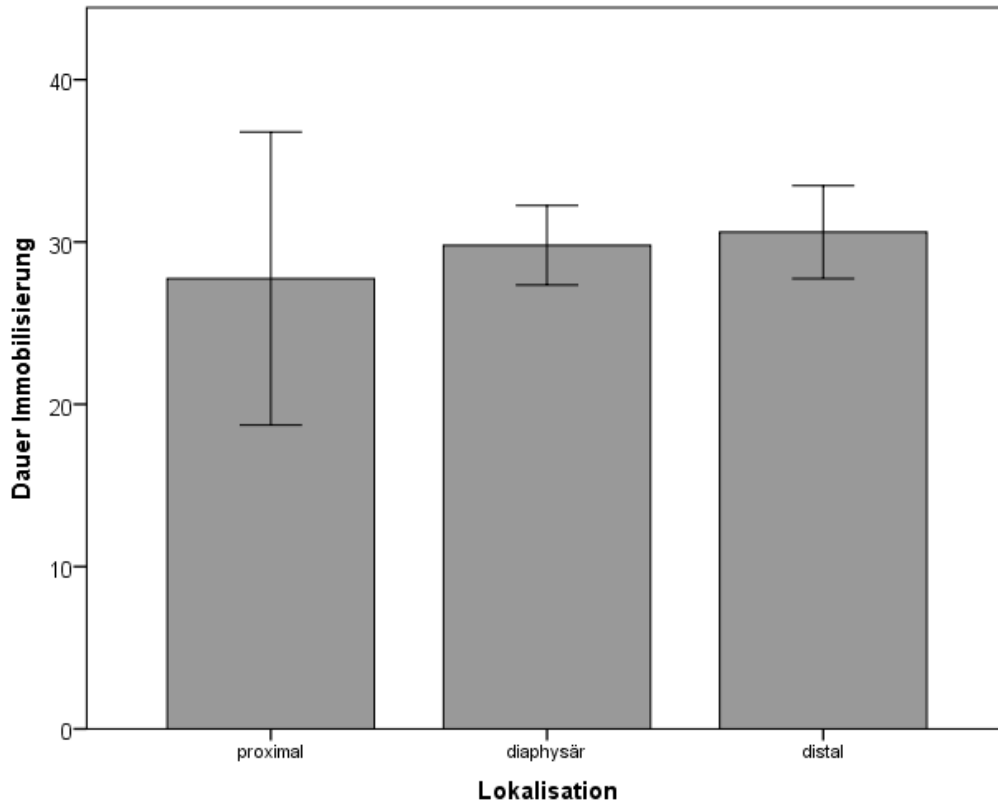
Insgesamt erhielten 81 (84,4%) Patient\*innen eine Ruhigstellung. Hierbei wurden insgesamt 45 (54,9%) Frakturen am diaphysären Anteil, 33 (40,2%) Frakturen am distalen und 4 (4,9%) Frakturen am proximalen Drittel identifiziert. Bei 62 (64,6%) Patient\*innen wurde initial ein Oberarmgips und bei 19 (19,8%) ein Unterarmgips angebracht. 15 (15,6%) Unterarmfrakturen wurden ohne Gips behandelt. Diese Patient\*innengruppe erhielt operativ eine Stabilisierung mittels ESIN.

Die durchschnittliche Ruhigstellung ergab eine Zeitdauer von  $30 \pm 8,1$  Tagen (Spanne 7-56 Tage).

Bei der genaueren Betrachtung der Dauer der Immobilisierung in Bezug auf die Frakturlokalisierung zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei proximalen,

diaphysären und distalen Frakturen (Mittelwerte  $27,8 \pm 9$  Tage vs.  $29,8 \pm 8,1$  Tage vs.  $30,6 \pm 8,2$  Tage;  $p=0,762$ , Kruskal-Wallis-Test) (**Abbildung 34**).

Bei Grünholzfrakturen zeigte sich keine signifikant längere Immobilisierung als bei komplett frakturierten Knochen (Mittelwerte  $28,7 \pm 5,9$  Tage vs.  $30,2 \pm 10$  Tage,  $p=0,477$ , T-Test).



**Abbildung 34:** Dauer der Immobilisation der Erstfraktur in Bezug auf die Knochenlokalisierung

### 3.10 Hospitalisation

Es wurden bei der Erstfraktur insgesamt 71 Patient\*innen (74%) ambulant und 25 (26%) stationär behandelt.

### 3.11 Sportverbot

Die Sportfreigabe nach der Erstfraktur erfolgte durchschnittlich nach  $52 \pm 20,1$  Tagen (Median 48 Tage, Spanne 24-150 Tage).

### 3.12 Ergebnisse der Auswertungen zur Refraktur

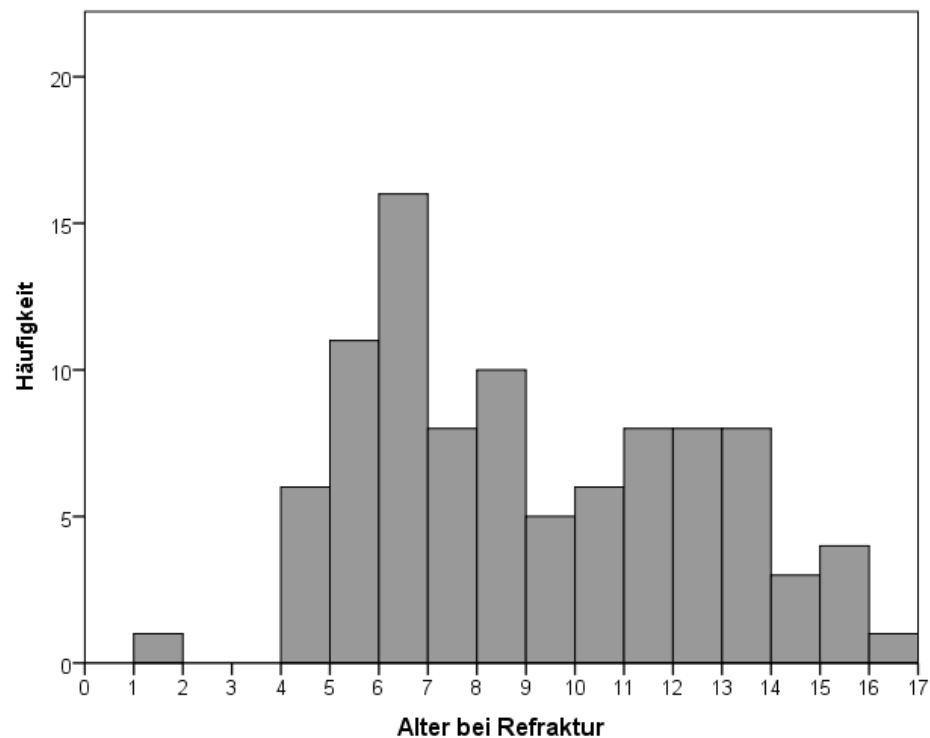
#### 3.12.1 Zeit zur Refraktur

Die Refraktur erfolgte nach durchschnittlich  $97,4 \pm 71,3$  Tagen (Median 77,5 Tage, Spanne 23-339 Tage).

Es zeigte sich, dass die Zeit zur Refraktur bei Grünholzfrakturen nicht signifikant länger oder kürzer war als bei vollständigen Frakturen (Mittelwert  $91,1 \pm 62,8$  Tagen vs.  $100,8 \pm 75,6$  Tagen,  $p=0,530$ , T-Test).

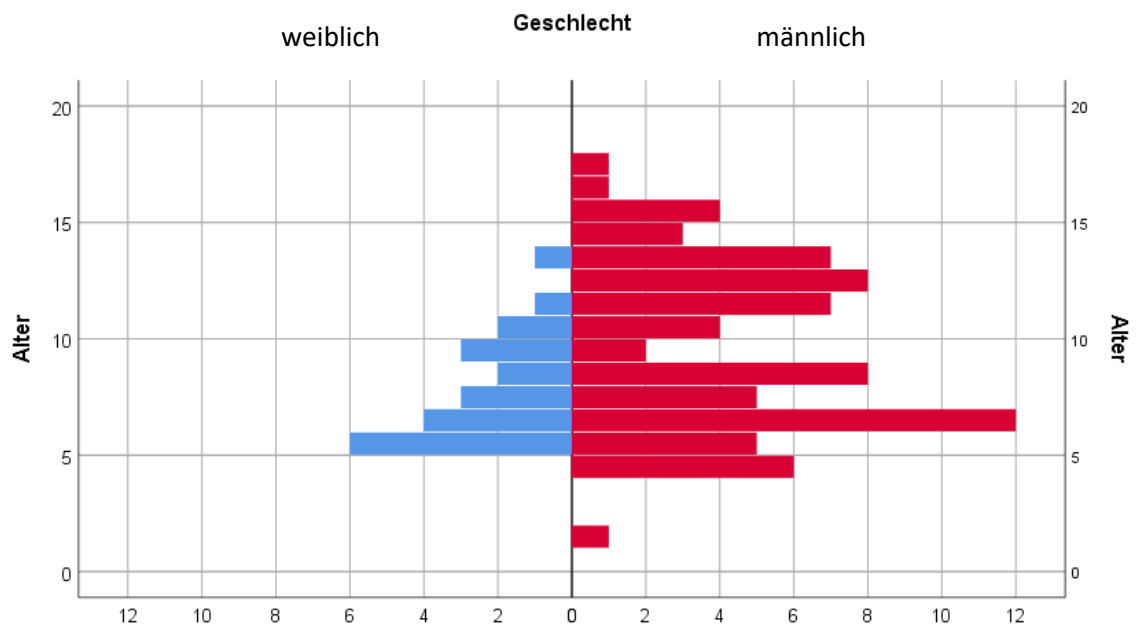
### 3.12.2 Alter und Geschlecht bei der Refraktur

Das Alter der Kinder und Jugendlichen mit einer Refraktur lag im Durchschnitt bei  $9,2 \pm 3,5$  Jahren (Median 8,4 Jahre, Spanne 1,9-17,6 Jahre) (**Abbildung 35**). So ergibt sich eine Häufung im Alter von 6 bis 7 Jahren.



**Abbildung 35:** Häufigkeit des Alters bei der Refraktur

Die Altersverteilung der Geschlechter beim Auftreten der Refraktur ist in **Abbildung 36** genauer dargestellt.



**Abbildung 36:** Geschlechtsabhängige Altersverteilung bei der Refraktur

### 3.12.3 Unfallursache Refraktur

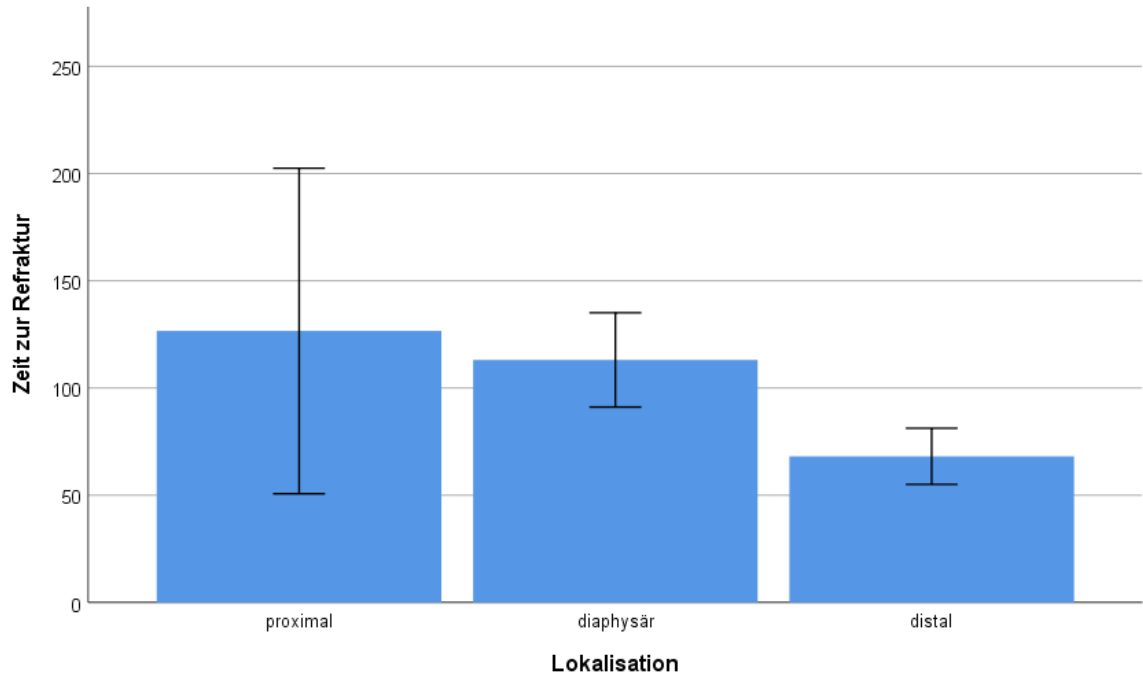
Die Unfallursachen der Refrakturen wurden nach dem gleichen Schema wie bei den initialen Frakturen eingeteilt. So wurden 49 (51%) Refrakturen, wie bereits bei den Initialfrakturen, ebenfalls am häufigsten durch einen Sturz verursacht. 19 (19,8%) der Refrakturen entstanden bei Sportunfällen und 16 (16,7%) durch Unfälle mit einem Fortbewegungsmittel. Durch Unfälle auf Spielplätzen wurden insgesamt 3 der 96 (3,1%) Refrakturen ausgelöst und bei 9 (9,4%) wurden weitere Ursachen aufgezeichnet.

### 3.12.4 Verschiedene Parameter in Bezug auf die Zeit zur Refraktur

Die Behandlung der initialen Fraktur (operativ vs. konservativ) zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Zeit zur Refraktur (Mittelwert 139,8 Tage  $\pm$  99,5 Tage vs. 87,6Tage  $\pm$  59,7 Tage;  $p=0,054$ , MWU-Test).

Bei der Zeit zur Refraktur in Bezug auf die Lokalisation im Knochen konnte ein signifikanter Unterschied ermittelt werden ( $p=0,006$ , Kruskal-Wallis-Test) (**Abbildung 37**). So zeigte sich, dass proximale Unterarm-Refrakturen nach einem längeren Intervall auftraten als diaphysäre bzw. distale Unterarm-Refrakturen (Median 123  $\pm$  99 Tagen vs. 87,5  $\pm$  93 Tagen vs. 58  $\pm$  47 Tagen) (**Abbildung 37**). Bei genauerer Untersuchung der einzelnen Knochenabschnitte wurde der signifikante Unterschied zwischen den distalen und diaphysären Refrakturen

festgestellt ( $p=0,010$ , MWU-Test nach Bonferroni Korrektur). Im Gegensatz hierzu wiesen die Vergleiche von distalen und proximalen ( $p=0,116$ , MWU-Test nach Bonferroni Korrektur) sowie diaphysären und proximalen ( $p=1,000$ , MWU-Test nach Bonferroni Korrektur) Refrakturen keinen signifikanten Unterschied auf.



**Abbildung 37:** Knochenlokalisierung und Zeit zur Refraktur

Eine notwendige Reposition zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Zeit zur Refraktur (Mittelwert reponierte Frakturen  $105 \pm 80,6$  Tage vs. nicht reponierte Frakturen  $82,2 \pm 44,7$  Tage;  $p=0,078$ , T-Test).

### 3.12.5 Behandlung der Refraktur

Die Refrakturen der Kinder und Jugendlichen wurden wie auch die Erstfrakturen einerseits konservativ und andererseits operativ versorgt. 49 (51%) wurden mittels operativer und 47 (49%) mittels konservativer Therapie behandelt. So ist eine statistisch signifikante Zunahme der operativen Versorgung der Refrakturen im Vergleich zu den Erstfrakturen zu erkennen (49 Patient\*innen vs. 18 Patient\*innen,  $p<0,05$ , Chi-Quadrat-Test).

### 3.12.6 Immobilisation der Refraktur

Insgesamt wurden 53 (55,2%) Patient\*innen bei ihrer Refraktur mit einem Gips ruhiggestellt. 39 (40,6%) der Unterarm-Refrakturen wurden mittels Oberarmgips und 14 (14,6%) mittels Unterarmgips versorgt. 43 (44,8%) erhielten keine Immobilisierung, da mittels operativer Behandlung eine ausreichende Stabilität

erreicht wurde (n=41) bzw. sich beim Auftreten der Refraktur noch Osteosynthesematerial in situ befand (n=2).

Die Dauer der Immobilisierung bei der Refraktur betrug durchschnittlich  $33,7 \pm 10,5$  Tage (Median 35 Tage, Spanne 7-58 Tage).

### **3.12.7 Metall in situ beim Auftreten der Refraktur**

18 (18,7%) Patient\*innen mit einer Refraktur wurden bei der ersten Verletzung operativ mit ESIN versorgt. Bei 13 (13,5%) Patient\*innen war beim Auftreten der Refraktur das Osteosynthesematerial noch in situ. Bei 5 (5,2%) Patient\*innen wurde das Osteosynthesematerial bereits vor dem Auftreten der Refraktur entfernt.

### **3.12.8 Reposition der Refraktur**

Bei insgesamt 72 (75%) Patient\*innen wurde eine Reposition der Refraktur vorgenommen. Bei 61 (84,7%) dieser Refrakturen erfolgte eine geschlossene Reposition und bei 11 (15,3%) war eine offene Reposition erforderlich. Die restlichen 24 (25%) Patient\*innen wurden ohne Reposition behandelt.

Von den Patient\*innen mit liegenden Osteosynthesematerial bei der Refraktur, entschied man sich bei 3 (3,1%) Patienten für eine Entfernung der ESIN und anschließender konservativer Behandlung mit Oberarmgips. 2 (2,1%) andere Patient\*innen wurden mittels geschlossener Reposition behandelt und alle Weiteren (n=8; 8,3%) erhielten eine Entfernung und anschließende Neueinbringung von ESINs.

### **3.12.9 Operative Behandlungsmethoden**

Bei der operativen Therapiemethode wurden am häufigsten (n=44, 45,8%) ESIN eingebracht. Eine Stabilisierung mittels Osteosyntheseplatte war bei 6 (6,3%) Kindern bzw. Jugendlichen notwendig und eine Fixierung mit perkutanen Bohrdrähten wurde bei 4 (4,2%) Patient\*innen vorgenommen. Bei 5 (5,3%) der operativ versorgten Patient\*innen wurde eine Kombination der genannten Behandlungsmethoden angewandt.

Die Entfernung des Osteosynthesematerials erfolgte im Durchschnitt nach  $317,3 \pm 129,6$  Tagen (Spanne 29-758 Tage).

### **3.12.10 Komplikationen der Refrakturen**

Komplikationen traten bei 11 (11,4%) der Patient\*innen auf. Diese waren eine intraoperative Teildurchtrennung des R. superficialis n. radialis, die Bildung einer Knochenzyste, die Bildung einer Exostose im Bereich der Membrana interossea antebrachii und N. medianus-Läsion, die Perforation eines PINs, eine verzögerte Frakturheilung und eine sekundäre Dislokation. Bei 5 (5,2%) der Kinder und Jugendlichen erfolgte in weiterer Folge eine Re-Refraktur.

Bei 3 (3,1%) der Studienteilnehmer\*innen mit einer Komplikation befand sich das Osteosynthesematerial in situ. Diese wurden bei der Refraktur mit Entfernung des Metalls und Anlage eines Oberarmgips behandelt. Bei 2 (2,1%) dieser Patient\*innen kam es im weiteren Verlauf zu einer Re-Refraktur.

## **4 Diskussion**

Ziel der vorliegenden Arbeit war die retrospektive Auswertung und Analyse von Patient\*innen im Kindes- und Jugendalter, die aufgrund von Unterarm-Refrakturen an der Medizinischen Universität Graz behandelt wurden. Anhand der gewonnenen Ergebnisse werden nun die Risikofaktoren für das Auftreten einer Refraktur und die optimale Behandlung im Vergleich zu den in der Literatur bereits beschriebenen Vorgehen diskutiert.

### **4.1 Diskussion und Vergleich mit der Literatur**

#### **4.1.1 Patient\*innenkohorte**

Im Zeitraum von 2008 bis 2018 wurde eine Gesamtzahl von 31.747 Kinder und Jugendliche mit einer Fraktur an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie behandelt, die auf 7.891 Patient\*innen mit einer Unterarmfraktur reduziert wurden. Diese Patient\*innen wurden weiter selektiert, sodass eine Anzahl von 176 Kindern und Jugendlichen mit einer Refraktur des Unterarms identifiziert wurden. Durch weitere Exklusionskriterien konnten schließlich insgesamt 96 Studienteilnehmer\*innen in die retrospektive Analyse inkludiert werden. In der Literatur bieten Vergleichsstudien meist kleinere Kohorten (n= 6-63) (33-36, 38), sodass ein eingeschränkterer Einblick im Vergleich zu den Ergebnissen der aktuellen Studie vorliegt. Auch die verwendeten Zeiträume in diesen Studien waren, mit Ausnahme der Studie von Tisosky et. al. mit einem vergleichsweise ähnlichen Zeitraum von 10 Jahren, meist kürzer gewählt (34-36, 38).

#### **4.1.2 Refrakturrate**

Frakturen des Unterarms gehören zu den häufigsten Frakturen im Kindes- und Jugendalter (19, 26). Bei den meisten dieser Frakturen kommt es zu einer komplikationslosen Ausheilung der Verletzung, jedoch kann es als Komplikation zu einer Refraktur kommen (26). In der Literatur wird das Auftreten von Refrakturen mit einer Rate von ca. 1% bis 8% beschrieben (26, 34, 38). Bei unseren Ergebnissen ergab sich bei 7.891 Patient\*innen mit einer Fraktur des Unterarms eine Refrakturrate von 1,2% (n=96). Dieser Wert liegt im unteren Bereich der bisher in der Literatur angegebenen Refrakturraten.

### **4.1.3 Zeit zur Refraktur**

Das Auftreten der Refraktur erfolgte in der aktuellen Studie nach  $97,4 \pm 71,3$  Tagen. Dies deckt sich mit dem Mittelwert der Refrakturzeit der Studie von Tisosky et. al. mit 95,6 Tagen (34). In dieser Vergleichsstudie wurden insgesamt 36 Patient\*innen mit Unterarm-Refrakturen (Radius und Ulna) von 2000 bis 2010 im Hinblick auf den Einfluss verschiedener Faktoren auf Refrakturen untersucht (34). In der Literatur wurde ein erhöhtes Risiko für eine Refraktur 2 Monate nach der Gipsabnahme beschrieben (22, 23). Wird hierbei die Gipsdauer beachtet, so stellt sich ein sehr ähnliches Ergebnis wie in unserer Studie dar. Laut dem systematischen Review von Bhanushali et. al. aus dem Jahr 2021 kam es nach einem Median von 5 Monaten (Range 1-8 Monaten) zu einer Refraktur (26). In der Vergleichsstudie von Baitner et. al. von 2007 traten Refrakturen des Unterarms im Durchschnitt nach 6 Monaten auf (39). Bould und Bannister (1999) gaben eine Refrakturzeit im Median von 8 Wochen nach der Gipsabnahme an (35).

In der vorliegenden Studie traten Refrakturen bei Grünholzfrakturen im Vergleich zu vollständig frakturierten Knochen nicht früher oder später nach der Erstfraktur auf. Weinberg et. al. ermittelten in ihrer Studie von 2008 mit 21 Patient\*innen mit Grünholzfrakturen eine Zeit zur Refraktur mit ca. 90 Tagen (33). Dieser Zeitraum korreliert mit der Refrakturzeit unserer Studie.

Insgesamt lässt sich ein erhöhtes Risiko für das Auftreten einer Refraktur nach ungefähr 3 Monaten schlussfolgern.

### **4.1.4 Geschlecht und Alter**

In dem systematischen Review von Bhanushali et. al wurde von einigen Studien beschrieben, dass das Geschlecht keinen Effekt auf das Auftreten von Refrakturen aufweist (26). In unserer Studie ist ersichtlich, dass die männliche Studiengruppe häufiger eine Refraktur erleidet als weibliche Kinder und Jugendliche. So waren 77,1% der Patient\*innen männlich und 22,9% weiblich, die sich einer Unterarmfraktur mit nachfolgender Refraktur zugezogen haben. Jedoch wurde kein Vergleich hinsichtlich der Geschlechtsverteilung bei Unterarm-Frakturen ohne nachfolgende Refraktur gezogen. In den verwendeten Vergleichsstudien überwog bei den Unterarmfrakturen auch stets der Anteil der männlichen Studienteilnehmer (Tisosky et. al. 29 von 36 (34); Bould und Bannister 65% (35); Baitner 76% (39), Weinberg et. al. 15 von 21 (33), Waters et. al. Verhältnis 3:1 (19) ). Der

systematische Review von Bhanushali et. al. aus dem Jahr 2021 bestätigte unser Studienergebnis (26). Han et. al. kamen in ihrer Analyse über die Behandlung von Refrakturen mit ESIN auch zu dem Schluss, dass das männliche Geschlecht ein Risikofaktor für das Auftreten einer Unterarm-Refraktur darstellt (38). Oft wurde dies damit begründet, dass Jungen aktiver sind und hierdurch ein erhöhtes Risiko für eine erneute Fraktur besteht (36, 38).

Bei einer Spanne von 1 bis 18 Jahren ergab unsere Auswertung des Alters der Erstfraktur einen Mittelwert von 8,4 Jahren mit einer Häufung zwischen 5 bis 7 Jahren. Viele publizierte Studien wählten ein Patient\*innenkollektiv jünger als 16 Jahren aus (26, 34, 35). Park et. al. wählten sogar ein Alter unter 15 Jahre für ihre Analyse (36). So ergab das Alter der Studienteilnehmer\*innen in diesen Studien im Schnitt ein geringeres Alter mit den Mittelwerten von ca. 5 bis 9 Jahren beim Auftreten der Frakturen (34-36, 39). Somit liegt unser Ergebnis im oberen Grenzbereich, aber innerhalb der Mittelwerte des in anderen Studien ermittelten Alters. Dies ist womöglich durch die größer gewählte Altersspanne mit auch älteren Patient\*innen in unserer Studie erklärbar.

Im Vergleich hierzu ergab das Alter der Refrakturen in der vorliegenden Studie einen Mittelwert von 9,2 Jahren mit einer Häufung von 6 bis 7 Jahren. Die Vergleichsstudie von Park et. al. wies ein geringeres Alter von 6 Jahren und 8 Monaten bei Refrakturen auf, wobei bei dieser Studie, wie bereits erwähnt, das Alter auf unter 15 Jahren beschränkt wurde (36).

Im Durchschnitt wiesen in unserer Studie die weiblichen Patientinnen ein jüngeres Alter bei der Erstfraktur und auch der Refraktur auf als die männlichen. Hieraus lässt sich schließen, dass Mädchen in jüngeren Jahren (Mittelwert 6,2 Jahre) gefährdeter für eine Fraktur mit nachfolgender Refraktur sind. Auf der anderen Seite weisen Buben im höheren Alter (Mittelwert 8,8) ein erhöhtes Risiko für eine Refraktur auf. Dies wurden bisher in keiner Vergleichsstudie beschrieben.

#### **4.1.5 Unfallursachen**

In unserer retrospektiven Analyse wurde als häufigste Ursache sowohl für eine Erstfraktur als auch für Refraktur ein Sturzgeschehen bei beiden Geschlechtern dokumentiert (vgl. **Tabelle 4**), was sich mit der rezenten Literatur deckt (26, 35, 38, 39). Der Sturz auf den ausgestreckten Arm wurde als typische Unfallursache beschrieben (19).

Jedoch bestand bei den weiteren Ursachen ein Unterschied zwischen den Geschlechtern (vgl. **Tabelle 4**). Bei den Buben wurden sportliche Aktivitäten und bei den Mädchen Unfälle auf dem Spielplatz als zweithäufigste Unfallursache der Erstfrakturen identifiziert. Dies lässt möglicherweise auf die risikoreicheren Aktivitäten von Buben schließen (36, 38).

#### **4.1.6 Lokalisation**

Zur genaueren Lokalisation der Frakturen bzw. Refrakturen wurde der Unterarm in der vorliegenden Analyse in Drittel eingeteilt. In der Literatur wurde beschrieben, dass diaphysäre Frakturen des Unterarms ein erhöhtes Risiko für das Auftreten einer Refraktur aufweisen (26, 34, 35, 38, 40). Auch in unserer retrospektiven Analyse konnte die Assoziation der Lokalisation mit dem Auftreten der Refraktur nachgewiesen werden. So kam es unabhängig vom Geschlecht bei 58,3% der untersuchten Patient\*innen zu einer Refraktur bei initialer Fraktur der Diaphyse. Dieses Ergebnis bestätigt die Studie von Tisosky et. al., hier waren 78% der Refrakturen im Bereich der Diaphyse lokalisiert (34). Sie erklärten dieses Phänomen, wie auch Bould und Bannister, durch eine größere muskuläre Zugkraft und langsamere Heilung als beispielsweise in der Metaphyse (34, 35). So könnte eine längere Immobilisierung bei Frakturen der Diaphyse möglicherweise das Risiko einer Refraktur senken (34, 35). Im Gegensatz dazu lokalisierten Baitner et. al. in ihrer Studie von 2007 mit 63 Patient\*innen über 8 Jahre lediglich 30% der Refrakturen im mittleren Schaft (39). Die meisten Refrakturen befanden sich in dieser Studie im distalen Unterarm (62%) (39).

In unserer Studie ergab die Verteilung des Alters hinsichtlich der Knochenlokalisierung, dass Kinder und Jugendliche mit proximalen ( $7,2 \pm 4,1$  Jahre) und diaphysären ( $7,6 \pm 3,1$  Jahre) Frakturen jünger waren als mit distal lokalisierten Frakturen ( $9,8 \pm 3,6$  Jahre). Dies deckt sich nicht mit der gängigen Lehrmeinung; in Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ wurde beschrieben, dass proximale Frakturen eher ältere Patient\*innen betreffen (19).

Die Frakturen waren bei der Betrachtung der Verteilung innerhalb der Knochen gleichmäßig über Radius, Ulna und kompletten Unterarm zu finden und wiesen keine Unterschiede hinsichtlich des Geschlechts oder Alters auf.

In der aktuellen Studie konnte ein Bezug der Knochenlokalisierung und der Zeit zur Refraktur festgestellt werden. So traten Refrakturen im distalen Unterarm am frühesten auf, gefolgt von diaphysären und schließlich proximalen Frakturen. Dies

könnte bei der konservativen Therapie eine Rolle spielen; je distaler die Fraktur lokalisiert ist, desto kürzer ist anscheinend eine Ruhigstellung notwendig.

Die meisten Patient\*innen mit einer nachfolgenden Refraktur wiesen unabhängig von Geschlecht und Alter eine kombinierte Fraktur des Radius und der Ulna auf (64,6%). Auch Baitner et. al. erzielten das Ergebnis, dass komplette Unterarmfrakturen (49%) am häufigsten mit einer Refraktur assoziiert sind (39).

#### **4.1.7 Grünholzfrakturen**

Die kindlichen Grünholzfrakturen wiesen laut Literatur ein erhöhtes Refraktur-Risiko auf (26, 33). Dies wurde meist mit einer ungleichmäßigen Heilung und somit einer Störung der Konsolidierung erklärt (33). In der aktuellen Studie konnte dies nicht bestätigt werden. Hier wiesen geschlechtsunabhängig insgesamt 65,6% der Erstfrakturen eine komplette Fraktur der Knochen und nur 34,4% eine Grünholzfraktur auf. In der Studie von Bould und Bannister konnten bei 78% der Initialfrakturen eine Grünholzfraktur diagnostiziert werden, jedoch konnte hierbei keine Signifikanz festgestellt werden (35). So wurde in der Literatur immer wieder die Assoziation von Grünholzfrakturen mit Refrakturen diskutiert und unterschiedliche Ergebnisse erzielt (26, 35, 36). Möglicherweise können auch verbleibende Angulationen bei Grünholzfrakturen das erhöhte Risiko für Refrakturen erklären (26).

Grünholzfrakturen und komplette Unterarmfrakturen zeigten in unseren Ergebnissen eine relativ gleichmäßige Geschlechtsverteilung, sodass keines der Geschlechter ein erhöhtes Risiko für eine Grünholzfraktur aufweist.

Dennoch konnte anhand der Ergebnisse festgestellt werden, dass Patient\*innen mit Grünholzfrakturen und nachfolgender Refraktur signifikant jünger waren als Patient\*innen mit vollständigen Frakturen (Median 6 vs. 10).

#### **4.1.8 Vorgehen bei der Behandlung der Erstfrakturen**

Die meisten Kinder und Jugendlichen konnten bei der Erstfraktur mittels konservativer Methode behandelt werden. Nur 18 (18,8%) Patient\*innen wurden operativ versorgt. Die Studie von Bould und Bannister kam zu einem ähnlichen Ergebnis (35). Hier wurden 88% der Erstfrakturen konservativ mittels Gips und 12% mittels operativer Methode versorgt (35). In der operativen Gruppe trat in dieser Studie nur eine Refraktur auf (35). Zudem ergab sich in der vorliegenden Analyse kein Unterschied hinsichtlich des Alters oder des Geschlechts gegenüber der

jeweiligen Therapiemethode. Hinsichtlich des therapeutischen Vorgehens bei der Erstfraktur konnte kein Einfluss auf die Refraktur festgestellt werden.

Mit Hilfe einer geschlossenen Reposition konnte bei den meisten dislozierten Erstfrakturen eine achsengerechte Stellung erzielt werden. Lediglich bei zwei Patienten war eine offene Reposition notwendig. Auch in der Literatur wurden ähnliche Angaben publiziert. So ist bei dislozierten Unterarmfrakturen meist eine geschlossene Reposition möglich (34, 39). In der aktuellen Studie konnten keine Altersunterschiede hinsichtlich der Durchführung einer Reposition gefunden werden. In Bezug auf die Zeit zur Refraktur zeigte die Durchführung einer Reposition keinen Einfluss.

Zur operativen Behandlung von Frakturen des Unterarms wurde bevorzugt die intramedulläre Nagelung angewendet. Dieses Verfahren wird im Kindesalter aufgrund von guten Resultaten und geringer Komplikationsrate bei Schaftfrakturen verwendet (33, 41).

Eine operative oder konservative Behandlung bei der Erstfraktur zeigte in unserer Analyse keinen Einfluss auf die Zeit zur Refraktur. Insgesamt ist derzeit jedoch ein zunehmender Trend in Richtung operativer Frakturbehandlung zu erkennen (41).

Die durchschnittliche Ruhigstellung im Oberarm- oder Unterarmgips ergab in der aktuellen Studie eine Zeitdauer von ca. 30 Tagen. Es zeigte sich kein Unterschied in der Frakturlokalisation (proximal, diaphysär und distal) und der Gipsdauer. Auch Grünholzfrakturen wurden, anders als erwartet, nicht signifikant länger immobilisiert als vollständige Frakturen. Die Zeitdauer der Immobilisierung zeigte in den Vergleichsstudien der Literatur eine Spanne von ungefähr 3 bis 11 Wochen (26, 35, 36). Zur konservativen Behandlung von diaphysären Frakturen wurde eine Ruhigstellung über 6 Wochen empfohlen, um ein möglichst geringes Refrakturrisiko zu erzielen (26, 35). Eine Ruhigstellung, v.a. bei mittleren Schaftfrakturen unter 6 Wochen, war mit einem erhöhtem Refrakturrisiko assoziiert (35). Diese Studie wählte Patient\*innen jünger als 16 Jahre aus, jedoch wurde bei der Angabe dieses Ergebnisses kein genaueres Alter aufgeführt (5). Eine Immobilisierung von 6 Wochen oder länger erscheint in unseren Augen für junge Kinder zu lange. In den Studien von Tisosky et. al. und Han et. al. wurden nach der Gipsabnahme eine weitere Ruhigstellung in einer Schiene bis zur kompletten Konsolidierung vorgeschlagen (34). Dieses Vorgehen scheint im Hinblick auf die

Zeit zur Refraktur sinnvoll, jedoch in der Praxis nicht leicht anwendbar zu sein. Es ist schwierig, Kinder und Jugendliche ohne Beschwerden weiterhin Sport zu verbieten (35). So erscheint eine Aufklärung der Eltern, v.a. der männlichen Patienten, als sinnvoll (35).

Durchschnittlich erfolgte die Entfernung des Osteosynthesematerials in der vorliegenden Studie nach 317 Tagen. In dem Review von Bhanushali et. al. wurde in zwei Studien eine Entfernung der intramedullären Nägel frühestens nach 6 Monaten und der Osteosyntheseplatten nach frühestens 12 Monaten empfohlen (26). Das Vorgehen der Univ.-Klinik der Kinder- und Jugendchirurgie in Graz ist ähnlich; bei Kindern unter 12 Jahren wird der ESIN oder die Osteosyntheseplatte nach 6 Monaten und ab einem Alter von 13 Jahren nach 12 Monaten entfernt. Kirschner-Drähte werden in der Regel je nach Alter und Frakturdurchbauung nach 3 bis 5 Wochen entfernt.

#### **4.1.9 Sportfreigabe**

Die Sportfreigabe nach der Erstfraktur lag im Schnitt bei ca. 52 Tagen und somit noch vor dem durchschnittlichen Auftreten einer Refraktur nach ca. 97 Tagen. Im Vergleich wurde eine Rückkehr zur Aktivität in der Studie von Tisosky et. al. erst nach 3 Monaten empfohlen (34). Eine längere Sportrestriktion, vor allem von risikoreichen Sportarten, könnte eine Refraktur vorbeugen.

#### **4.1.10 Vorgehen bei der Behandlung von Refrakturen**

Die Behandlung von Refrakturen bei Kindern und Jugendlichen wurde in der Literatur bisher nicht häufig beschrieben.

In der aktuellen Analyse war bei 75% der Kinder und Jugendlichen eine Reposition der Refraktur notwendig. Insgesamt wurde bei Refrakturen häufiger eine Reposition vorgenommen als bei den Erstfrakturen. Auch war häufiger eine offene Reposition im Vergleich zur Erstfraktur erforderlich (11 vs. 2 Patient\*innen).

Refrakturen können erfolgreich konservativ als auch operativ behandelt werden, zu diesem Ergebnis kamen auch Waters et. al. (19, 34). In der vorliegenden Studie wurden 48,9% konservativ und 51% der Refrakturen operativ behandelt. Hieraus ist zu erkennen, dass bei Refrakturen signifikant häufiger ein operativer Therapieweg gewählt wurde als bei Erstfrakturen. Baitner et. al. erwähnten in ihrer Studie auch einen Trend zur vermehrten operativen Intervention bei Refrakturen (39). Sie

erhielten, im Gegensatz zu der vorliegenden Studie, jedoch kein signifikantes Ergebnis (39).

Bei operativer Behandlung von Refrakturen wurde bevorzugt zur operativen Behandlungsmethode die Anlage von ESINs angewendet, teilweise waren auch Osteosyntheseplatten und Bohrdrähte notwendig. In der Studie von Weinberg et. al. wurde die Methode der intramedullären Nagelung zur Behandlung von Refrakturen diskutiert (33). Dieses Verfahren stellte darin sowohl für Frakturen und Refrakturen eine gute Behandlungsmethode dar (33).

Eine Immobilisierung im Gips wurde bei 53 Patient\*innen mit Refrakturen durchgeführt. Die Zeit der Immobilisierung war mit einem Mittelwert von ca. 33,7 Tagen, im Schnitt um ca. 4 Tage länger als bei der Erstfraktur.

#### **4.1.11 Osteosynthesematerial in situ**

Auch bei Patient\*innen mit osteosynthetisch behandelten Erstfrakturen kam es zum Auftreten einer Refraktur. In unserer Studie wurden 13 (13,5%) Kinder bzw. Jugendliche mit Osteosynthesematerial in situ identifiziert. Hieraus ist zu schließen, dass Osteosynthesematerial keinen vollkommenen Schutz vor dem Auftreten einer Refraktur bietet. In der Literatur wird die Rate für das Auftreten von Refrakturen mit Osteosynthesematerial in situ als niedrig beschrieben (37). Therapeutisch können gebogene Marknägel mit dem Knochen reponiert werden, wenn hierdurch eine adäquate Achsenstellung erzielt werden kann (19). Jedoch wurden bei diesem Verfahren auch Instabilitäten und Brüche der Nägel beschrieben (19, 37). Aus diesem Grund wurde teilweise eine zusätzliche Gipsanlage empfohlen (37). In unserer Studie wurde bei den inkludierten Patient\*innen eine Entfernung der verbogenen ESIN mit erneuter Marknagelung, ein konservatives Vorgehen mittels Gips oder eine Reposition bei liegenden Osteosynthesematerial durchgeführt. Diese Möglichkeiten werden teilweise auch in der Literatur beschrieben, jedoch wird meist nur das Auftreten einer Refraktur mit Osteosynthesematerial in situ aufgezeigt ohne auf das weitere Vorgehen einzugehen (33, 38, 42). Daher gibt es bisher keine Richtlinie für das weitere Vorgehen in den oben genannten Situationen (37).

In der vorliegenden Analyse wurden zwei Patienten mit einer Erstfraktur im Unterarm mittels Osteosyntheseplatte behandelt. Bei einem dieser Patienten war zudem eine offene Reposition erforderlich. Bei dem selben Patienten kam es zur Refraktur mit Metall in situ. Dieses wurde bei der weiteren Behandlung entfernt und der Patient mittels ESIN behandelt. McLean et. al. beschrieben in ihrer Fallstudie

vom Jahr 2006 mit 4 Patient\*innen bei initialen diaphysären Unterarmfrakturen, die mit Osteosyntheseplatten behandelt wurden, eine erfolgreiche Versorgung der Refraktur mittels ESIN (19, 40). Ein Unterschied zur vorliegenden Studie stellte die Zeit zur Refraktur dar, denn diese trat in der Vergleichsstudie zwischen einem und drei Jahren nach der Initialfraktur auf (40).

#### **4.1.12 Komplikationen**

Nach einer Refraktur kam es bei 11 (11,5%) Patient\*innen zu Komplikationen, wobei bei 5,2% (n=5) im Verlauf eine Re-Refraktur festgestellt wurde. 3 dieser Patient\*innen wurden mittels Oberarmgips nach der Refraktur mit liegenden Osteosynthesematerial behandelt. So erscheint dieser Behandlungsweg bei Refrakturen mit Osteosynthesematerial in situ nicht als zielführend.

In Rockwood and Wilkins' „Fractures in Children“ wurde das Auftreten einer Wachstumsstörung bei distalen Unterarmfrakturen von 4 - 50% beschrieben, welche bei keinem unserer Patienten festgestellt wurde (19).

#### **4.2 Limitationen**

Insgesamt wurde in der vorliegenden Studie keine Vergleichsgruppe zur Risikostratifizierung untersucht.

Die Zeit zur Refraktur wurde auf 21 bis 365 Tage beschränkt. So wurden alle Patient\*innen die früher oder später eine Refraktur erlitten aus dieser Studie ausgeschlossen.

Wie Bould und Bannister waren auch wir nicht in der Lage zu prüfen, ob die Refrakturen aufgrund einer inkompletten Konsolidierung entstanden sind (35). Dieser Risikofaktor wird in einigen Studien diskutiert (26, 34, 36). Auch die Hypothese, dass eine verbleibende Achsabweichung ein Risikofaktor darstellt oder nicht, wurde in dieser Analyse nicht näher untersucht. Individuelle Unterschiede wie Gewicht, Knochendichte, verschiedenes Aktivitätsniveau und weitere biologische Risikofaktoren wurden ebenfalls nicht näher analysiert.

Um die Auswirkung oben genannter Faktoren zu klären, bedarf es weitere Untersuchungen sowie Studien.

Wulstfrakturen wurden in dieser retrospektiven Analyse nicht berücksichtigt, da es sich um Stauchungsfrakturen und somit stabile Frakturen handelt (19). Folglich wurden Wulstfrakturen von der vorliegenden Studie ausgeschlossen.

Insgesamt ergaben sich keine signifikanten Lücken in den Daten der Studiengruppe. Die Studienteilnehmer\*innen wurden vom Tag der Erstvorstellung der Initialfraktur bis zu einer ausreichenden klinische Frakturstabilität begleitet. Die meisten Patient\*innen haben sich nach dem Behandlungsabschluss nicht erneut vorgestellt, sodass davon ausgegangen wurde, dass keine Komplikation nach der Refraktur auftrat.

### **4.3 Schlussfolgerung**

Frakturen des Unterarms sind eine der häufigsten Verletzungen im Kindes- und Jugendalter und werden am häufigsten durch einen Sturz ausgelöst (19). Refrakturen im Wachstumsalter kommen mit einer Rate von 1-8% selten vor und werden in der Regel durch ein weiteres Trauma wie einem Sturz verursacht (19, 26, 34, 38). In der vorliegenden Studie wurde eine Refrakturrate von 1,2% ermittelt. Das Risiko für das Auftreten einer Refraktur besteht vor allem innerhalb der ersten Monate nach der initialen Fraktur, mit einem erhöhtem Risiko nach 3 Monaten.

Die Identifikation von Risikofaktoren kann beim Management von Frakturen und somit zur Reduzierung von Refrakturen führen. Zusammenfassend wurden das männliche Geschlecht, ein Alter zwischen 5 und 7 Jahren, komplette Unterarmfrakturen (Radius und Ulna) und diaphysäre Frakturen als Risikofaktoren für eine Refraktur ermittelt. Grünholzfrakturen hatten in dieser Studie kein erhöhtes Risiko für eine Refraktur. Es zeigte sich jedoch, dass Patient\*innen mit einer Grünholzfraktur und nachfolgender Refraktur jünger waren als Patient\*innen mit vollständigen Frakturen.

Prävention stellt die effektivste Therapie einer Refraktur dar (19). So sollten die Eltern über die Risikofaktoren von Refrakturen aufgeklärt werden und eine adäquate Behandlung durchgeführt werden. Das Ziel der Behandlung von Unterarmfrakturen ist das Erreichen einer vollständigen Heilung mit anatomischer und funktioneller Wiederherstellung. Grundsätzlich können Erstfrakturen und Refrakturen konservativ und operativ behandelt werden. Eine ausreichend lange Immobilisierung (beispielsweise länger als 6 Wochen) bei diaphysären Frakturen könnte möglicherweise das Risiko einer Refraktur senken. Außerdem erscheint eine kürzere Immobilisierung bei distalen Frakturen im Vergleich zu diaphysären und proximalen Frakturen als ausreichend. Zudem kann eine abnehmbare Schiene bis zur kompletten Konsolidierung sinnvoll sein. Eine Sportrestriktion sollte unbedingt eingehalten werden, hier werden ca. 3 Monate im Hinblick auf die Zeit zur Refraktur

empfohlen. Bei Refrakturen mit liegendem Osteosynthesematerial ist eine Reposition und Wechsel des Osteosynthesematerials eine zielführende Methode. Für eine optimale Behandlung von Refrakturen könnten zukünftig noch weitere Studien genauere Ergebnisse liefern.

## **5 Literaturverzeichnis**

1. Ulfig N, Brand-Saberi B. Kurzlehrbuch Embryologie. 3 ed. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag KG; 2017.
2. Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Prometheus LernAtlas der Anatomie - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. 5 ed. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag KG; 2018.
3. Matussek J. Kinderorthopädie und Kindertraumatologie. Regensburg: Springer Verlag; 2013.
4. Streicher J, Pretterklieber ML. Waldeyer - Anatomie des Menschen - Bewegungsapparat. In: Anderhuber F, Pera F, Streicher J, editors. Waldeyer - Anatomie des Menschen. 19 ed. Berlin/Boston: de Gruyter GmbH & Co. KG; 2012. p. 95-426.
5. Lüllmann-Rauch R, Asan E. Taschenlehrbuch Histologie. 5. ed. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag KG; 2015.
6. Wurzinger LJ. Duale Reihe Anatomie - Teil E Obere Extremität - Unterarm und Hand. Anatomie. 3 ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2014. p. 477-520.
7. von Laer L, Kraus R, Linhart WE. Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. 6 ed. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag KG; 2013.
8. Paulsen F, Waschke J. Sobotta - Atlas der Anatomie des Menschen. 23 ed. München: Elsevier GmbH Urban & Fischer Verlag; 2010.
9. Wurzinger LJ. Duale Reihe Anatomie - Teil E Obere Extremität - Schulter, Oberarm und Ellbogen. Anatomie. 3 ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2014. p. 437-76.
10. Platzer W. Taschenatlas Anatomie - Band 1 Bewegungsapparat. 11. ed. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag KG; 2013.
11. Fernandez FF, O. E. Klassifikation von Frakturen im Kindesalter. Trauma und Berufkrankheit Supplement 3. 2010 27. Feb. 2010.
12. Baierlein SA, Slongo T. Frakturklassifikationen - Frakturen im Kindes- und Jugendalter - Allgemeiner Teil. Frakturklassifikationen. 1. ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2011. p. 172 - 5.
13. Baierlein SA. Frakturklassifikationen - Grundlagen - AO-Einteilung. Frakturklassifikationen. 1. ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2011. p. 6

14. Monsell F, Sepulveda D. Classification of children's fractures [22.08.2021]. Available from: <https://surgeryreference.aofoundation.org/orthopedic-trauma/pediatric-trauma/further-reading/classification-of-childrens-fractures>.
15. Baierlein SA. Frakturklassifikationen - Frakturen im Kindes- und Jugendalter - Spezieller Teil. Frakturklassifikationen. 1. ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2011. p. 175 - 84.
16. Slongo T, L. A, Group APC. AO Pediatric Comprehensive Classification of Long-Bone Fractures (PCCF). Switzerland: AO Foundation; 2010.
17. Levine R.H., Foris L.A., Nezwik T.A., M. W. Salter Harris Fractures. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. 2022.
18. Kamphaus A, Rapp M, Wessel LM, Buchholz M, Massalme E, Schneidmüller D, et al. LiLa-Klassifikation für Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter. Der Unfallchirurg: Springer Verlag; 2013.
19. Waters PM, Skaggs DL, Flynn JM. Rockwood and Wilkins' Fractures in Children. 9. ed. Philadelphia, USA: Wolters Kluwer; 2020.
20. Little JT, Klionsky NB, Charturvedi A, Soral A, Charturvedi A. Pediatric Distal Forearm and Wrist Injury: An Imaging Review. RadioGraphics. 2014;34:472-90.
21. Kertai M, Reingruber B. Frakturen des Unterarms beim Kind. Trauma Berufskrankheit Supplement 1. 2015 14. Sept. 2013.
22. Dietz HG, Illing P, Schmittenebecher PP, Slongo T, W. SD. Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie. Heidelberg: Springer Medizin Verlag GmbH; 2011.
23. Hefti F. Kinderorthopädie in der Praxis. 3. ed: Springer Verlag 2015.
24. Largiadèr Felix, Saeger Hans-Detlev, Keel M, Bruns C. Checkliste Chirurgie. 11 ed. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag KG; 2016.
25. Reiser M, Kuhn F, Debus J. Duale Reihe Radiologie. 4. ed. Stuttgart, Deutschland: Georg Thieme Verlag KG; 2017.
26. Bhanushali A, Axelby E, Patel P, Abu-Assi R, Ong B, Graff C, et al. Re-fractures of the paediatric radius and/or ulna: A systematic review. Royal Australasian College of Surgeons. 2022;92:666-73.
27. Henne-Bruns D. Duale Reihe Chirurgie. 4 ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2012.
28. Birgit O. Traumatologie. Pädiatrische Radiologie für MTRA/RT. 1. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2010. p. 96-105.

29. Sorantin E. Unterschiede Erwachsene - Kinder. Pädiatrische Radiologie für MTRA/RT. 1. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2010. p. 1-6.
30. Vogl TJ, Wetter A, Schneidmüller D. Radiologische Diagnostik. In: Marzi I, editor. Kindertraumatologie. 2. ed: Springer-Verlag GmbH; 2010. p. 37-47.
31. Worel AM, Slongo T. Behandlungsprinzipien. In: Marzi I, editor. Kindertraumatologie. 2. ed: Springer-Verlag GmbH; 2010. p. 49-74.
32. Ploss C, Marzi I. Unterarm. In: Marzi I, editor. Kindertraumatologie. 2. ed: Springer-Verlag GmbH; 2010. p. 185-204.
33. Weinberg AM, Amerstorfer F, Fischerauer EE, Pearce S, Schmidt B. Paediatric diaphyseal forearm refractures after greenstick fractures: operative management with ESIN. *Injury Elsevier*. 2009;40:414-7.
34. Tisosky AJ, Werger MM, McPartland TG, Bowe JA. The Factors Influencing the Refracture of Pediatric Forearms. *J Pediatr Orthop*. Oct.-Nov. 2015;35:677 - 81.
35. Bould M, Bannister GC. Refractures of the radius and ulna in children. *Injury Elsevier*. 1999;30:583-6.
36. Park HW, Yang IH, Joo SY, Park KB, Kim HW. Refractures of the Upper Extremity in Children. *Yonsei Medical Journal*, Seoul, Korea. 2007;48:255 - 60.
37. van Egmond P.W., van der Sluijs H.a., van Royen B.J., R. S. CASE REPORT Refractures of the paediatric forearm with the intramedullary nail in situ. *BMJ Publishing Group*. 2013.
38. Han B, Wang Z, Li Y, Xu Y, Cai H. Risk factors for refracture of the forearm in children treated with elastic stable intramedullary nailing. *International Orthopaedics - Springer Verlag*. 2018;43:2093-7.
39. Baitner AC, Perry A, Lalonde FD, Bastrom TP, Pawelek J, Newton PO. The Healing Forearm Fracture - A Matched Comparison of Forearm Refracture. *Pediatric Orthopaedics*. Oct.-Nov. 2007;27:743-7.
40. McLean C, Adlington H, Houshian S. Paediatric forearm refractures with retained plates managed with flexible intramedullary nails. *Injury*. 2007;38(8):926-30.
41. Poutoglidou F, Metaxiotis D, Kazas C, Alvanos D, Mpeletsiotis A. Flexible intramedullary nailing in the treatment of forearm fractures in children and adolescents, a systematic review. *J Orthop*. 2020;20:125-30.

42. Rousset M, Mansour M, Samba A, Pereira B, Canavese F. Risk factors for re-fractures in children with diaphyseal fracture of the forearm treated with elastic stable intramedullary nailing. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology* - Springer-Verlag France. 2015.