

Diplomarbeit

**Ist die intramedulläre Marknagelung
als Therapie von
Unterarmschaft-Refrakturen im
Kindesalter geeignet?**

eingereicht von

Florian Amerstorfer

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der gesamten Heilkunde

(Dr. med. univ.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Institut/Klinik für Kinderchirurgie

unter der Anleitung von

Doz. Dr. Annelie-Martina Weinberg

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

Florian Amerstorfer

Danksagungen

Zu aller erst möchte ich mich herzlich bei Frau Univ. Doz. Dr. Annelie-Martina Weinberg für die Betreuung, Unterstützung und Hilfsbereitschaft bedanken. Sie hatte immer ein offenes Ohr, nicht nur bei fachlichen sondern auch bei menschlichen Fragen. Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich in all den Jahren best möglichst unterstützt hat und immer für mich da war.

Weiters möchte ich mich bei meinen Freunden und Freundinnen bedanken, die mir mein Leben in vielerlei Hinsicht bereichert haben.

Zu guter letzt möchte ich mich bei der Medizinischen Universität Graz für die finanzielle Unterstützung in Form eines Förderstipendiums bedanken.

Abstract

Background: One of the complications of forearm shaft fracture is refracture. There are few publications which deal with the special issue of forearm refractures in childhood, however, only little information about the treatment of refractures is given. Many authors reference to good results after conservative treatment. Elastic stable intramedullary nailing (ESIN) displays an alternative method for refracture treatment to cast immobilisation for another five to seven weeks. Operative treatment often leads to open reduction in the most cases due to blocked or narrowed medullary canals. The purpose of this study was to examine if ESIN is an eligible method for forearm shaft refractures and open procedure is necessary at any rate or special operative techniques can lower the rate of open reduction in refractures.

Methods: We retrospectively examined the expense of operative procedure and the intra- and postoperative complications in 21 children with diaphyseal forearm refractures treated with ESIN.

Results: Except from two x-rays, which were not available, all primary fractures were classified as greenstick fractures at least of one bone. In 18 patients (86%) the refracture occurred after conservative, in three fractures (14%) after operative treatment. Mean duration of cast immobilisation was five weeks (4 to 10). Regarding the three operatively treated patients, two suffered refractures while ESIN treatment was still ongoing, in the third patient the nails were removed after 45 days. The refracture occurred after median 90 (30 to 174) days after initial treatment. In 18 cases (86%) closed reduction with nailing was possible, three (14%) required an open reduction. In nine patients (43%) a closed medullary cavity was present; only two (22%) of them needed an open reduction. None of the patients had complications (wound healing, osteomyelitis, rupture of the extensor pollicis longus tendon). Swelling appeared in four patients and paraesthesia of the thumb in one. Free functional movement was achieved in all children.

Long term results: Long term results were examined with questionnaires: No refracture occurred. One patient suffered from meteorosensitivity.

Conclusion: Intramedullary nailing is not only a safe method for forearm fractures, but also for refractures in childhood. ESIN seems to be one choice for treatment in refracture of the forearm, as in 78% the operative reduction can be done in a closed way by means of “tricks and hints”.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeiner Teil	1
1.1	Kindlicher Unterarm	1
1.1.1	Anatomie	1
1.1.2	Funktionelle Anatomie	4
1.1.3	Unterarmkinematik	9
1.1.4	Entwicklung von Ulna und Radius	11
1.2	Frakturen am kindlichen Unterarm	12
1.2.1	Frakturarten	12
1.2.2	Diagnostik	16
1.2.3	Therapie von Unterarmschaftfrakturen	17
1.2.4	Remodelling	21
1.2.5	Nachbehandlung	25
1.2.6	Spätkomplikationen	26
2	Spezieller Teil - Retrospektive Studie	27
2.1	Einleitung	27
2.2	Material und Methoden	29
2.2.1	Elastisch stabile Marknagelung	31
2.3	Ergebnisse	43
2.4	Diskussion	47
3	Zusammenfassung	50

Abbildungsverzeichnis

1.1	Unterarm: Die beiden Knochen, Ulna und Radius sind proximal durch das Articulatio radioulnaris proximalis und distal durch das Articulatio radioulnaris distalis verbunden. Zusätzlich besteht über eine bindegewebige Membran eine weitere Verbindung. Aus Weinberg et al. (2006).	2
1.2	Articulatio cubiti: Der rote Kreis markiert das Articulatio humeroradialis, der schwarze Kreis das Articulatio humeroulnaris und der blaue Kreis das proximale Radioulnargelenk. Modifiziert, aus Weinberg et al. (2006)	4
1.3	FTCC: Der trianguläre fibrocartilaginäre Komplex und seine Bestandteile. Aus Weinberg et al. (2006)	7
1.4	Unterarmkinematik: Die oberen drei Kreise beschreiben die Bewegung des Radius und seine Rotation während der Supination und Pronation, die unteren die der Ulna. Die grauen Linien stellen die Membrana interossea dar. Die mit d markierte Linie zeigt das Ausmaß der lateralen Abduktion der Ulna, wenn der Unterarm von der Supinations- in die Pronationsstellung gebracht wird. Aus Weinberg et al. (2006)	11
1.5	Ossifikationskerne und Epiphysenfugenschluss. Aus Weinberg et al. (2006)	12
1.6	Meta- und Diaphyse: Die Metaphyse definiert sich als das Quadrat (grün) ober- bzw. unterhalb der proximalen und distalen Epiphysenfuge. Dazwischen liegt die Diaphyse.	13
1.7	Salter-Harris-Klassifikation: SH I: Epiphysenlösung, SH II: Epiphysenlösung mit metaphysärem Keil, SH III: Epiphysenfraktur mit epiphysärem Keil, SH IV: Epiphysenfraktur mit epimetaphysärem Keil, SH V: Kompressionsfraktur der Epiphysenfuge. Aus Weinberg et al. (2006)	13

1.8	Unterarmschaftfrakturen-Klassifikation: a vollständige Unterarmfraktur, b Grünholzfraktur, c gebogene Biegungsfraktur, d gestauchte Biegungsfraktur. Aus Weinberg et al. (2006)	14
1.9	Konsolidationsstörung bei einer Grünholzfraktur: Eine Unterarmschaftfraktur mit Abkippung des Radius nach dorsal. An der konkaven Seite kommt es aufgrund erhöhter Druckverhältnisse an dieser Seite (oran-ger Pfeil) zu einem erhöhten Knochenaufbau. Auf der konvexen Seite fehlt diese mechanische Beanspruchung des Knochens und dieser wird daher resorbiert (grüner Pfeil).	15
1.10	Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen: a Anterior-posterior Strahlengang, b seitlicher Strahlengang.	16
1.11	Normales Röntgenbild in 2 Ebenen mit den angrenzenden Gelenken: a a.-p. Aufnahme, b seitliche Aufnahme.	17
1.12	Anlage eines Oberarmgips: a Überzug eines Schlauchverbands über den Unterarm, b Polsterung des Gipses mit Rollwatte und Überzug mit Krepppapier, c/d Anlegen eines Gipses. Zwei Arten von Gipse stehen dafür zur Verfügung: Entweder wird ein herkömmlicher Gips, (weiß und aus Calciumsulfat, siehe Abbildung), oder ein Kunststoffgips (bunt und aus Polyurethanharz) verwendet. Wichtig ist, dass der Gips gut anmodelliert wird; e/f zusätzlich ist darauf zu achten, dass die Finger und der Daumen frei beweglich sind.	19
1.13	Fraktur am diaphysären Übergang: a Eine dia-metaphysäre Über-gangfraktur nach Sturz auf den Arm beim Volleyballspielen, b Das postoperative Röntgenbild zeigt, dass eine adäquate Stabilisierung und Reposition mit ESMN nur bedingt möglich war. Zusätzlich wurde da-her für 2 Wochen eine volare Unterarmschiene angelegt. c Aufgrund des guten Remodellingpotentials am distalen Unterarm kam es zu einer guten Korrektur der postoperativen Achsfehlstellung.	20
1.14	Refraktur nach Plattenosteosynthese: a Eine nach Fahrradsturz ver-sorgte Fraktur mit einer Platte und 4 Schrauben bei einem 13-jährigen Mädchen. b Die Platte wurde nach 10 Monaten entfernt. Man kann die Schraubenlöcher noch erkennen. c Nach 13 Tagen kam es beim Schieben des Kinderwagens zu einer Refraktur.	22

1.15	Schematische Darstellung der Veränderung des Neigungswinkels nach einer distalen Unterarmfraktur in der Remodellingsphase.	24
1.16	Untersuchungsmethode: Die klinische Nachuntersuchung der Pronation und die Supination nach der Neutral-Null-Methode. Hierbei ist es wichtig, dass der Patient den Oberarm am Oberkörper anlegt, damit die Bewegung nicht mit Schulterbewegungen korregiert und so mögliche Einschränkungen übersehen werden können.	25
1.17	Klinische Nachuntersuchung: Verifizierung von Bewegungseinschränkung bei Extension und Flexion im Bereich des Ellbogengelenks nach Unterarmverletzungen.	26
2.1	Titanimplantate: Die elastisch stabilen Markraum Nägel sind in verschiedenen Größen und Farben erhältlich (a). Die Spitze ist schnabelartig gekrümmt, was das Einbringen und Auffädeln der Implantate erleichtert (b). Diese Nägel können intraoperativ bei Bedarf gekürzt werden.	32
2.2	Stahlimplantate: Die Stahlimplantate (a) besitzen eine Öse (b), sodass eine Schraube als Fixation eingebracht werden kann. Der Nachteil dieser Implantate gegenüber den Titannägeln liegt darin, dass diese nicht gekürzt werden können und es daher eine intraoperative Längenmessung erfordert.	32
2.3	Op-Lagerung: Der Patient wird am Rücken und der Arm im rechten Winkel auf einen Armtisch gelagert. Die Verwendung eines solchen Tisches erlaubt es, den Arm je nach Situation besser bewegen zu können.	35
2.4	Radialer Zugang: a Pfriem, b Einbringen des Pfriems 2 cm proximal der Epiphysenfuge radiallyseits, c auf dem intraoperativen Röntgenbild ist eindeutig sichtbar, dass sich die Spitze des Pfriems im Markraum befindet.	36
2.5	Einbringen des Nagels: Der Nagel wird zuerst in den sogenannten T-Griff eingespannt (a). Dabei ist darauf zu achten, dass das schnabelartig verbogene Ende vorne ist. Der Nagel sollte eine Dicke von 2/3 des Markraums aufweisen. Intraoperatives Röntgenbild mit eingebrachtem Nagel im T-Griff (b).	36

2.6	Intraoperative Röntgenbilder: zeigen das Nachvortreiben des Nagels: a zum Frakturspalt, b über die Fraktur, c bis in das Radiusköpfchen.	36
2.7	Ulnare Zugang: a Eröffnen des Markraums mittels Pfriem unter Schonung der Olecranonapophyse. b Das intraoperative Röntgenbild zeigt die Eröffnung des ulnaren Markraums mittels Pfriem bei bereits liegendem radialem Nagel.	37
2.8	Nagelung der Ulna: a - c Deszendierende Schienung der Ulna bis knapp unterhalb der distalen ulnaren Epiphysenfuge.	37
2.9	Op-Kontrollbild: Intraoperatives Übersichtsbild einer versorgten Fraktur mit regelrecht liegenden Marknägeln.	38
2.10	Versorgung der Wunde.	38
2.11	Offener Zugang Radius: Der Hautschnitt erfolgt in leicht flektierter und pronierter Haltung des Arms. Modifiziert, aus Weinberg et al. (2006)	39
2.12	Offener Zugang Radius: Der Musculus abductor pollicis longus und Musculus extensor pollicis brevis werden angeschlungen und können so besser je nach Gebrauch nach distal oder proximal verzogen werden. Modifiziert, aus Weinberg et al. (2006)	39
2.13	Offener Zugang Radius: In der Tiefe liegt der Musculus supinator, durch welchen der Ramus profundus des Nervus radialis läuft und der unbedingt geschont werden muss. Aus Weinberg et al. (2006)	40
2.14	Offener Zugang zum Radius: Um eine sichere Schonung dieses Nervs zu gewährleisten, sollte der Musculus supinator gespalten werden. Aus Weinberg et al. (2006)	41
2.15	Offener Zugang zur Ulna: Hautschnitt erfolgt zwischen Olecranon und Processus styloideus. Aus Weinberg et al. (2006)	41
2.16	Refraktur bei zu dünnen Implantaten: a Das Unfallbild eines 13-jährigen Buben zeigt eine dislozierte komplette Unterarmschaftfraktur nach Verletzung beim Fussballspielen, b Refraktur: Nachdem es initial nicht möglich war, die Fraktur mittels 2.5 mm Titannägel zu versorgen, wurde die Fraktur mittels 1.6 mm Bohrdrähten versorgt. Nach einer Woche kam es zur Refraktur, c ambulantes Kontrollbild: Die Bohrdrähte wurden entfernt und durch 2 mm elastisch stabile Marknägeln ersetzt. Eine gute Kallusbildung ist zu erkennen.	42

2.17 Refraktur bei liegenden Implantaten: a Unfallbild: Vier Monate nach initialer Versorgung mittels ESMN stürzte ein sechs-jähriger Bube im Kindergarten erneut auf den ausgestreckten Arm und brach sich den Arm wiederholt. b Intraoperatives Röntgenbild: Die Fraktur wurde geschlossen reponiert, wobei der ulnare Nagel nachgeschlagen werden musste. Danach wurde die Stabilität überprüft. c Ausheilungsbild: Nach 9 1/2 Monaten wurden die Nägel entfernt	44
2.18 Refrakturmanagement: a Unfallbild: Ein 7-jähriges Mädchen brach sich zwei Monate nach Gipsentfernung den Arm erneut. b Intraoperatives Röntgenbild: Die Fraktur wurde mittels ESMN versorgt. Zu Beginn konnte ein geblockter Markraum festgestellt werden, der mittels Kirschner-Draht Vorbohrung aufgemacht werden konnte und so eine geschlossene Reposition möglich war. c Ausheilungsbild: Neun Monate nach Versorgung zeigte sich eine vollständig konsolidierte Fraktur bei regelrecht liegenden Marknägeln.	46

Tabellenverzeichnis

1.1	Arten der Fehlstellungen und die jeweiligen Korrekturmechanismen. . .	23
2.1	Achsfehlstellungen und Schaftverschiebungen der Frakturen bei den 21 Patienten. seidl.=seitliche Aufnahme, a.-p.=anterior-posterior Aufnahme, v=ventral, d=dorsal, u=ulnar, r=radial, n.v.=nicht verfügbar . .	30
2.2	Vor- und Nachteile der Markraumschienung.	34
2.3	Therapeutisches Vorgehen bei der primären Fraktur und der Refraktur. Bei allen primären Frakturen, außer bei den Patient S.C und A.E, bei denen aufgrund der fehlenden Unfallbilder die Fraktur nicht klassifiziert werden konnte, lag eine Grünholzfraktur vor. Weiters zeigt diese Tabelle, in welchen Fällen ein geblockter Markraum vorlag und welches Vorgehen dabei nötig war.	45

Kapitel 1

Allgemeiner Teil

1.1 Kindlicher Unterarm

1.1.1 Anatomie

Der Unterarm (Antebrachium, Abbildung 1.1) besteht aus zwei Röhrenknochen, der Elle (Ulna) und der Speiche (Radius), wobei der kürzere Radius lateral und die längere Ulna medial liegt. Zwischen diesen beiden Knochen befindet sich im Spatium interosseum antebrachii die Membrana interossea antebrachii, die am Margo interosseus beider Knochen ansetzt. Elle und Speiche artikulieren mit ihren proximalen Enden mit dem Oberarmknochen (Humerus) und bilden das Ellbogengelenk (Articulatio cubiti). Am distalen Ende bildet der Radius alleine mit den Handwurzelknochen das Handgelenk (Articulatio Manus) (Platzer, 1999).

Radius (Speiche)

Der Radius wird in eine proximale Epiphyse, den Knochenschaft (Diaphyse) und eine distale Epiphyse eingeteilt. Jeweils zwischen Epi- und Diaphyse befindet sich die Metaphyse.

An der Extremitas proximalis befindet sich das Caput radii mit der Fovea articularis, welche die Gelenkspfanne bildet und mit dem Capitulum humeri in Verbindung steht. Die seitliche Drehfläche am Caput radii wird Circumferentia articularis genannt. Sie ist vom Ligamentum anulare umschlungen und an der Drehbewegung zwischen Radius und Ulna im proximalen Radioulnargelenk (Articulatio radioulnaris proximalis) beteiligt (Rauber und Kopsch, 1998).

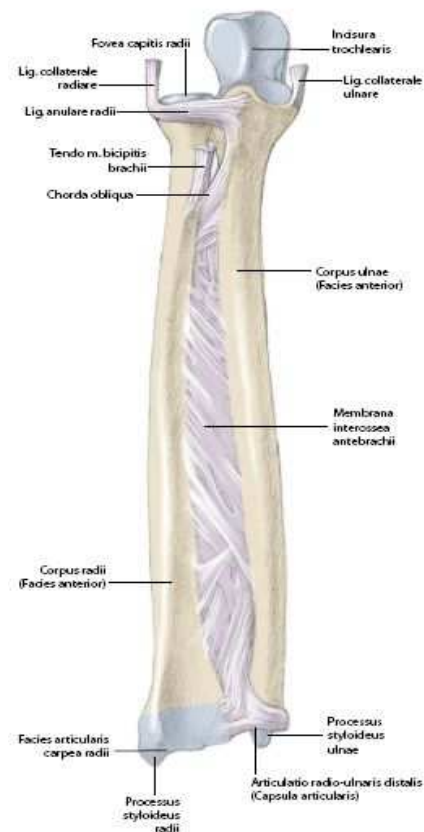


Abbildung 1.1: Unterarm: Die beiden Knochen, Ulna und Radius sind proximal durch das Articulatio radioulnaris proximalis und distal durch das Articulatio radioulnaris distalis verbunden. Zusätzlich besteht über eine bindegewebige Membran eine weitere Verbindung. Aus Weinberg et al. (2006).

Der Bereich zwischen dem Radiuskopf und dem Radiuschaft wird Collum radii genannt. Zwischen diesem und dem Radiuschaft findet sich am medialen Rand die Tuberositas radii, die dem Musculus biceps brachii als Ansatz dient. Nach distal setzt sich der Radius in seinem Corpus fort. Der Querschnitt in diesem Abschnitt ist proximal rundlich, weiter distaler jedoch nahezu dreikantig mit einem nach medial gerichteten Margo interosseus, einem nach ventral gerichteten Margo anterior und einem nach dorsal gerichteten Margo posterior. Aufgrund dieser Ränder ergeben sich auch drei Flächen am distalen Radiuschaft: Facies anterior, Facies posterior und Facies lateralis (Waldeyer, 2003). In der Mitte der Facies lateralis findet man die Tuberositas pronatoria. Diese dient als Ansatzpunkt für den Musculus pronator teres.

Die Extremitas distalis zeigt sich als eine unregelmäßige viereckige Struktur. An ihr befindet sich die Crista suprazyloidea mit dem Processus styloideus, dorsalseitig imponieren verschieden deutlich ausgeprägte Rinnen – Sulci tendineum musculorum extensorum –, in denen mehrere Sehnen der Extensoren verlaufen. In diesem Bereich kann man eine prominente Vorwölbung – Tuberculum dorsale radii (Lister) – tasten. Die distale Gelenksfläche des Radius – Facies articularis carpalis – ist elliptisch-konkav gekrümmt und steht mit dem Os lunatum und Os scaphoideum in Verbindung.

Ulna (Elle)

Die Ulna besitzt eine Extremitas proximalis, einen Corpus oder Schaft und eine Extremitas distalis.

Betrachtet man das proximale Ende der Elle von hinten, so imponiert eine haakenförmige Struktur, das Olecranon. An ihm setzt die Sehne des Musculus triceps brachii an. Von vorne sieht man auf die zwei proximalen Gelenksflächen der Ulna. Die Incisura trochlearis artikuliert mit der Trochlea humeri, und die Incisura radialis ulnae steht mit der Circumferentia articularis radii in gelenkigem Kontakt. Auch ist auf der Vorderseite der Processus coronoideus erkennbar. Von der Incisura radialis zieht die Crista musculus supinatoris nach distal, die als Ursprungsort des Musculus supinator dient. Auf der gegenüberliegenden Seite findet man die Tuberositas ulnae, den Ansatzpunkt des Musculus biceps brachii.

Der Corpus der Ulna ist im Querschnitt dreieckig und besitzt wie der Radius drei Flächen: Facies anterior, Facies posterior und Facies medialis. An der Facies anterior befindet sich ein kleines Loch, das Foramen nutricium. Ebenfalls besitzt die Ulna einen Margo interosseus, an dem die Membrana interosseus ansetzt.

Das Caput ulnae bildet die Extremitas distalis. Dort findet man den Processus styloideus ulnae, der das Caput ulnae nach distal und an der gegenüberliegenden Seite des Processus die Circumferentia articularis überragt. Die letztgenannte Struktur bildet mit der Incisura ulnaris radii eine gelenkige Verbindung (Rauber und Kopsch, 1998; Platzer, 1999; Waldeyer, 2003).

1.1.2 Funktionelle Anatomie

Um die Umwendbewegung am Unterarm in ihrer Funktion und Biomechanik genau verstehen zu können, bedarf es einer genaueren Betrachtung der dabei beteiligten Gelenke und Verbindungen. Folgende finden wir am Unterarm:

1. Articulatio cubiti

Die beteiligten Gelenksflächen am Ellbogengelenk (Abbildung 1.2) sind Trochlea und Capitulum humeri, Incisura trochlearis und radialis ulnae, sowie Fovea und Circumferentia articularis radii. Dieses Gelenk wird einerseits durch eine Knochen-, andererseits durch eine Bandverbindung gesichert. Erstere ist durch ein zangenförmiges Umfassen der Trochlea humeri durch die Incisura trochlearis ulnae gegeben, letztere durch das Ligamentum anulare radii und die Ligamenta collateralia (Platzer, 1999). Das gesamte Ellbogengelenk wird von einer schlaffen Gelenkskapsel (Capsula articularis) umgeben. Muskelfasern der Oberarmmuskeln strahlen in diese ein und straffen bei Bewegung des Unterarms die Kapsel, um eine Einklemmung zu verhindern. Das Ellbogengelenk setzt sich aus den folgenden drei Gelenken (Articulatio composita), die eine gemeinsame Gelenkskapsel besitzen, zusammen (Waldeyer, 2003):

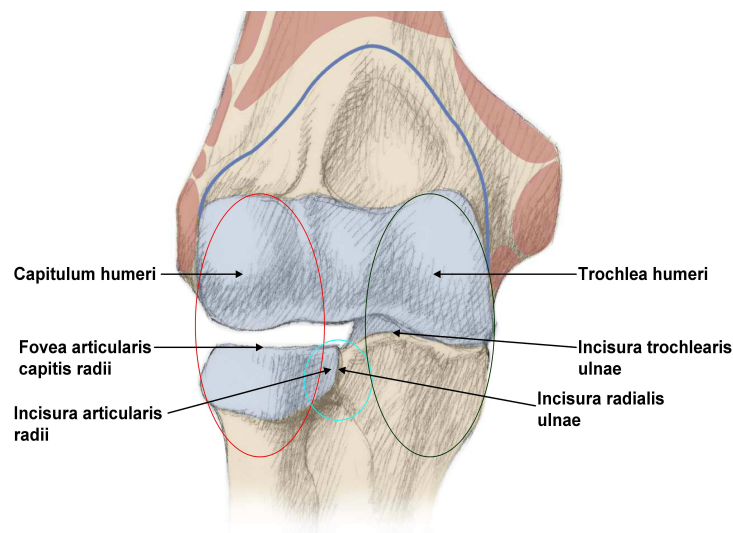


Abbildung 1.2: Articulatio cubiti: Der rote Kreis markiert das Articulatio humeroradialis, der schwarze Kreis das Articulatio humeroulnaris und der blaue Kreis das proximale Radioulnargelenk. Modifiziert, aus Weinberg et al. (2006)

- **Articulatio humeroulnaris:** Diese gelenkige Verbindung wird von der an der Ulna proximal befindlichen *Incisura trochlearis ulnae* und der distal am Humerus befindlichen *Trochlea humeri* gebildet. Die *Trochlea* hat die Form einer Sanduhr, wobei der mediale (*ulnare*) Kegel länger ist als der laterale (*radiale*), sodass es bei einer Beugung und Streckung zu einer Verschiebung der Unterarmknochen nach medial bzw. lateral kommt.
Bei diesem Gelenk handelt es sich um ein reines Scharniergelenk (*Ginglymus*) mit nur einem Grad der Bewegungsfreiheit (Rauber und Kopsch, 1998). Die Extension und Flexion des Unterarmes wird um eine Querachse, die senkrecht zur Bewegungsebene steht, durchgeführt. Diese Achse verläuft knapp unterhalb der beiden Epikondylen. Bei voller Streckung ist eine Beugung von ungefähr 160° möglich (Sobotta, 2000).
- **Articulatio humeroradialis:** Beim Humeroradialgelenk steht das *Capitulum humeri* und die *Fovea articularis capitis radii* in Verbindung. Das *Capitulum humeri* gleicht einer Kugel, die *Fovea articularis radii* einem Teller, wobei ulnar die sichelförmige *Lunula obliqua* erscheint (Platzer, 1999).
Anatomisch handelt es sich bei diesem Gelenk um ein Kugelgelenk (*Articulatio sphaeroidea*), das normalerweise drei Freiheitsgrade besitzt. Da aber der Radius vom *Ligamentum anulare radii* an die Ulna gefesselt ist und dadurch die Bewegung eingeschränkt wird, besitzt diese Gelenksverbindung nur zwei Freiheitsgrade. Einerseits wird über eine Querachse zusammen mit dem Humeroulnargelenk die Beugung und Streckung des Unterarms durchgeführt, andererseits ist das Humeroradialgelenk an der Pronation und Supination um eine durch das *Capitulum radii* und *Processus styloideus* schräg verlaufende Achse mitbeteiligt (Waldeyer, 2003).
- **Articulatio radioulnaris proximalis:** Dieses wird von der *Incisura radialis ulnae*, der *Circumferentia articularis radii* und dem *Ligamentum anulare radii* gebildet. Erstere hat die Form eines Rhomboides oder Dreieckes und ist leicht konkav. In ihr bewegt sich die *Circumferentia articularis*, welche vom kräftigen ca. 1 cm breiten Band, dem *Ligamentum anulare radii*, umfasst wird. Ebenso wie das *Caput radii* wird das Ringband im Erwachsenenalter nach distal schmaler und erscheint daher trichterförmig (Waldeyer, 2003).

Das PRUJ wird hauptsächlich von zwei Bändern stabilisiert: dem Ligamentum anulare radii und dem Ligamentum collaterale radii. Neben diesen beiden gibt es noch weitere Bänder, die aber eine untergeordnete Rolle bei der Stabilisierung spielen (LaStayo und Lee, 2006).

Funktionell ist das proximale Radioulnargelenk (PRUJ) ein Rad- oder Zapfengelenk (*Articulatio trochoidea*). Dieses Gelenk besitzt einen Freiheitsgrad und ist an der Pronation und Supination des Unterarms beteiligt.

2. *Articulatio radioulnaris distalis*

Hinsichtlich seiner Funktion handelt es sich beim distalen Radioulnargelenk (DRUJ) um ein Radgelenk. In diesem stehen das *Caput ulnae* und die *Incisure ulnaris radii* in gelenkiger Verbindung und ermöglichen eine Rotationsbewegung des Radius um die Ulna (Platzer, 1999). Die Achse hierfür verläuft durch den *Processus styloideus ulnae*. Das *Articulatio radioulnaris distalis* wird durch einen kollagenreichen Knorpel, den *Discus articularis*, und durch die *Membrana interossea* stabilisiert. Kommt es zu einer Verletzung einer dieser Strukturen, muss mit einer Instabilität im DRUJ und damit auch mit Funktionseinschränkungen in der Umwendbewegung des Unterarms gerechnet werden (Stuart et al., 2000). Bei der Pronation und Supination kommt es zu einem Zusammenspiel von Ellbogengelenk und Handgelenk, sodass dieser Bewegungsablauf auch als eine geschlossene kinematische Kette bezeichnet werden kann (Weinberg et al., 2006).

3. *Articulatio manus*

Das Handgelenk setzt sich wiederum aus zwei Gelenken zusammen:

- ***Articulatio radiocarpalis***

Bei dieser gelenkigen Verbindung von distalem Radius, *Discus articularis* - triangulärer fibrocartilaginärer Komplex - und proximaler Handwurzelreihe handelt es sich um ein Eigelenk (*Articulatio elipsoidea*).

Dieses Gelenk weist zwei Freiheitsgrade auf und ist vielachsig. Die konvexe - von *Os scaphoideum*, *Os lunatum* und *Os triquetrum* gebildet, wobei letzterer erst bei einer Ulnarduktion der Hand mit dem Radius in Kontakt kommt - und konkave Gelenksfläche erlaubt eine kreisende Bewegung

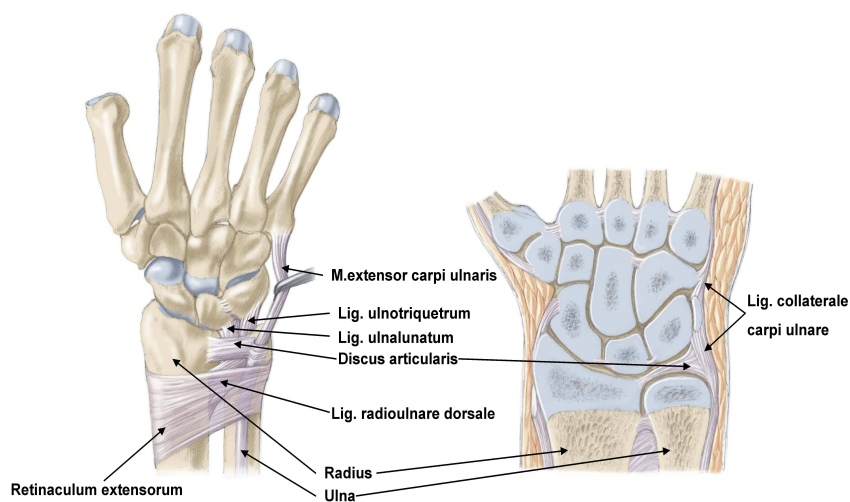


Abbildung 1.3: FTCC: Der trianguläre fibrocartilaginäre Komplex und seine Bestandteile. Aus Weinberg et al. (2006)

der Hand (Platzer, 1999). Die Bänder, die das Handgelenk stabilisieren, liegen vor allem intrakapsulär (Weinberg et al., 2006). Die Gelenkkapsel ist dünn, vor allem dorsalseitig, und schlaff. Zusätzlich wird sie durch das Einstrahlen von etlichen Bändern gestrafft und verstärkt. Der trianguläre fibrocartilaginäre Komplex (FTCC, Abbildung 1.3) besteht aus einem kollagenreichen Knorpel, dem Diskus, und Bändern - den distalen radioulnaren Bändern, den ulnarpalen Bändern (Lig. Ulnolunatum, Lig. Ulnaotriquetrum) und dem M. extensor carpi ulnaris-. Dieser Komplex trennt die Articulatio radioulnares distalis von der Articulatio radiocarpalis. Er dient einerseits als Kraftüberträger von den Handwurzelknochen auf die Ulna, stabilisiert die beiden oben genannten Gelenke und ist an der Bewegung der Hand beteiligt (Nakamura et al., 1996; Watanabe et al., 2005). Die Kraftübertragung erfolgt zu 80% über den Radius, 20% entfallen auf die Ulna. Betrachtet man diese im Ellbogengelenk, so findet eine annähernd gleiche Kraftübertragung (43% vs. 57%) im Humeroulnar- bzw. Humeroradialgelenk statt (LaStayo und Lee, 2006).

- Articulatio mediocarpalis: Diese zum Handgelenkt gehörige Verbindung von proximaler und distaler Handwurzelreihe steht nicht in direktem Kontakt mit den Unterarmknochen.

Sie ist auch nicht direkt an der Unterarmumwendbewegung beteiligt. Die proximale Handwurzelreihe ist im Gegensatz zur distalen Handwurzelreihe beweglich. Letztere sind mit straffen Bändern untereinander fixiert (Platzer, 1999).

4. Membrana interossea antebrachium (MIA)

Hierbei handelt es sich um eine kontinuierliche bindegewebige Knochenverbindung zwischen Ulna und Radius, bestehend aus einem sehnigen, einem membranösen Anteil, und einem dorsal gelegenen proximalen interosseären Bandes (PIOB) (Nakamura et al., 2000; Shaken et al., 1997; Nakamura et al., 1999). Die MIA hat ihren Ursprung am Radius und zieht zur Ulna (McGinley und Kozin, 2001). Ihre Fasern verlaufen von proximal lateral nach distal medial (Platzer, 1999).

Sowohl der distale, als auch der proximale Anteil der Membran besteht aus einem eher dünnen, membranösen Teil mit weniger starken Faserzügen. Im mittleren Drittel befindet sich das zentrale Band, weiter distal davon schließen sich akzessorische Bänder an (Shaken et al., 1997). Am weitesten proximal gelegen findet man das PIOB, das jedoch nicht bei jedem Menschen angelegt sein muss (Shaken et al., 1997; McGinley und Kozin, 2001). Die Dicke der Membrana interossea ändert sich je nach Ursprung, Ansatz und Stelle (McGinley et al., 2004).

Jede diese zuvor genannten Strukturen sind für die Funktion der Membrana interossea wichtig. Einerseits ist diese für die Stabilität der beiden Unterarmknochen verantwortlich (Birbeck et al., 1997; Nakamura et al., 1999; Stuart et al., 2000), verbindet Radius und Ulna und verhindert eine Verschiebung derselben in longitudinaler Richtung (Weinberg et al., 2006; McGinley et al., 2004), andererseits dient die MIA als Ansatzpunkt für die Flexoren- und Extensoren-muskulatur der Finger und Daumen (Nakamura et al., 2000; Hollister et al., 1994). Neben der Stabilisierung des proximalen Radioulnargelenks durch das PIOB (McGinley et al., 2004), ist der distale Anteil der Membrana interossea an der Stabilisierung des DRUJ beteiligt (Stuart et al., 2000; Kihara et al., 1995). Weiters überträgt und verteilt sie auftretende Kräfte auf den Radius und auf die Ulna und ist an der Unterarmrotationsbewegung beteiligt (Nakamura et al., 1999).

Nakamura et al. (1999) beschreibt in seiner in vivo Magnetresonanz-Studie, dass die Membran zwischen Ulna und Radius im MR Bild als schwaches Signal sichtbar ist. Diese Struktur zeigt sich in Neutral-Null-Stellung in gespannter Form, jedoch kommt es zu einer Veränderung dieser während der Supination- und Pronationbewegung. Diese Formveränderung betrifft vor allem den membranösen Anteil im mittleren Drittel der Membran. Im Gegensatz dazu bleibt die Form im sehnigen Anteil der Membran während der Umwendbewegung größtenteils unverändert. Zusätzlich zeigten Nakamura und Koautoren in dieser Studie auf, dass es zu einer Änderung des interosseären Raumes während der Unterarmrotation kommt. Maximale Raumgröße wurde in leichter Supinationsstellung gefunden, während es sowohl bei Supination als auch Pronation zu einer deutlichen Einengung des interosseären Raumes kam.

Erst durch eine genaue Zusammenarbeit der oben genannten Gelenke, Knochen und der interosseären Membran ist ein alltäglicher Gebrauch des Unterarms gewährleistet (Tillmann, 1978; Weinberg et al., 2001). Die Bewegung der oberen Extremität stellt eine komplexe Abfolge dar, die es zu verstehen gilt, da es durch Frakturen am Unterarm oder angeborenen Fehlbildungen zu einer Störung der Pro- und Supination kommen kann (Tynan et al., 2000). Kennt man die jeweiligen Einflussfaktoren, kann und muss diese Erkenntnis in die Therapie miteinfließen.

1.1.3 Unterarmkinematik

Historie

Schon Mitte des 18. Jahrhunderts begann man mit der Erforschung der komplexen Umwendbewegung am Unterarm und der Bewegung der beteiligten anatomischen Strukturen. Lange Zeit wurde auf den Universitäten gelehrt, dass der Radius während der Unterarmumwendbewegung halbkreisförmig um die Ulna rotiert, wobei die Ulna sich dabei nicht bewegt und einen fixen Punkt darstellt (Dwight, 1884). Mittels biomechanischen Analysen versuchte man die genauen Bewegungsabläufe des Radius sowie der Ulna während der Supination und Pronation zu verstehen (Dwight, 1884; Lecomte, 1874). Duchenne (1949) war jedoch einer der ersten Untersucher, der bei seinen Analysen eine Rotationsbewegung der Ulna feststellen konnte und eine Hypothese diesbezüglich aufstellte. Mit Befestigung einer Stange an der Ulna konnte er

eine halbkreisbogenförmige Bewegung der Ulna um den Radius darstellen.

Seine Hypothese wurde jedoch anfangs nicht ernst genommen, aber nur wenige Jahre später konnten Heiberg (1884) und im selben Jahr auch Dwight (1884) ähnliche Bewegungen der Ulna bei ihren Untersuchungen beschreiben.

Die ersten wichtigen Untersuchungen zu der Thematik der Ulnabewegung während der Unterarmrotation lieferten Mitte des 20. Jahrhundert Ray et al. (1951). Um mögliche Rotationsbewegungen des Humerus ausschließen zu können, fixierten sie diesen mit Nägeln in einem eigens dafür konstruierten Apparat. Danach wurden doppelt belichtete Röntgenbilder während der Pro- und Supination gemacht. Dabei wurde festgestellt, dass die Achse, um die die Umwendbewegung durchgeführt wurde, variiert werden konnte. Mit ihren Versuchen konnten sie eine Abduktionsbewegung während der Pronation und eine Adduktionsbewegung der Ulna während der Supination feststellen.

State-of-the-Art

Neuere Forschungsergebnisse zu dieser Thematik bekräftigten die in der älteren Literatur gefundenen Hypothesen bezüglich der Bewegung der Ulna. Weinberg et al. (2001) versuchten in ihrer Studie mit Zuhilfenahme eines Kernspintomographen einerseits das Ausmaß der lateralen Abduktion der Ulna während der Unterarmrotation zu bestimmen, andererseits den Grund für die laterale Abduktion zu erforschen. Bis zu diesem Zeitpunkt war nicht geklärt, ob diese Bewegung in der *Articulatio humeroulnaris* stattfindet oder durch eine Rotation des Humerus hervorgerufen wird. Die Autorin konnte in ihrer Studie zeigen, dass die Ulna eine halbkreisförmige Bewegung durchführt, jedoch konnte anhand dieser Studie nicht gezeigt werden, was der Grund dieser lateralen Abduktion war, da der Humerus bei den Versuchspersonen nicht gut genug fixiert werden konnte.

Aufgrund dessen wurden von der Autorin weitere Untersuchungen durchgeführt (Kasten et al., 2004). In der Studie von 2004 (Abbildung 1.4) standen Kadaver der oberen Extremität zur Verfügung. Hierbei konnte der Humerus mittels Kirschner Drähten adäquat fixiert werden und so Rotationsbewegungen des Oberarms ausgeschlossen werden.

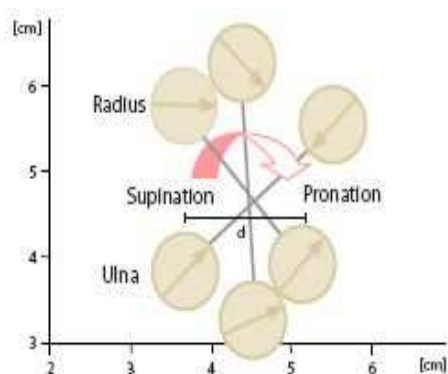


Abbildung 1.4: Unterarmkinematik: Die oberen drei Kreise beschreiben die Bewegung des Radius und seine Rotation während der Supination und Pronation, die unteren die der Ulna. Die grauen Linien stellen die Membrana interossea dar. Die mit d markierte Linie zeigt das Ausmaß der lateralen Abduktion der Ulna, wenn der Unterarm von der Supinations- in die Pronationsstellung gebracht wird. Aus Weinberg et al. (2006)

Zusammenfassung

Bei der Unterarmumwendbewegung handelt es sich um eine komplexe Bewegung, bei der mehrere Strukturen beteiligt sind. Bei dieser Bewegung rotiert der Radius um die Ulna, währenddessen diese eine laterale Abduktion durchführt. Aber erst diese Bewegung macht es uns Menschen möglich, die Hände im alltäglichen Leben nützlich zu gebrauchen (Kapandji, 2001; Weinberg et al., 2001). Im Computerzeitalter ist es von zentraler Bedeutung, die Hand zu pronieren, um die Tastatur zu benutzen. Verletzungen und die daraus resultierenden Einschränkungen in der Umwendbewegung des Unterarms können sozioökonomische Folgen haben und müssen vermieden werden.

1.1.4 Entwicklung von Ulna und Radius

Die Verknöcherung des Unterarms (Abbildung 1.5) beginnt von einem primären Ossifikationskern aus und startet in der 8. Schwangerschaftswoche. Die sekundären Ossifikationskerne der distalen radialen und distalen ulnaren Physe treten später, in der erstgenannten bei Mädchen im 5. Lebensmonat und bei Jungen kurz danach, in der zweitgenannten bei beiden Geschlechtern im 6. Lebensjahr, auf. Etwa zur gleichen Zeit erscheint das sekundäre Ossifikationszentrum des proximalen Radius, drei Jahre später das der proximalen Ulna. Zum Wachstumsabschluss und Verschluss

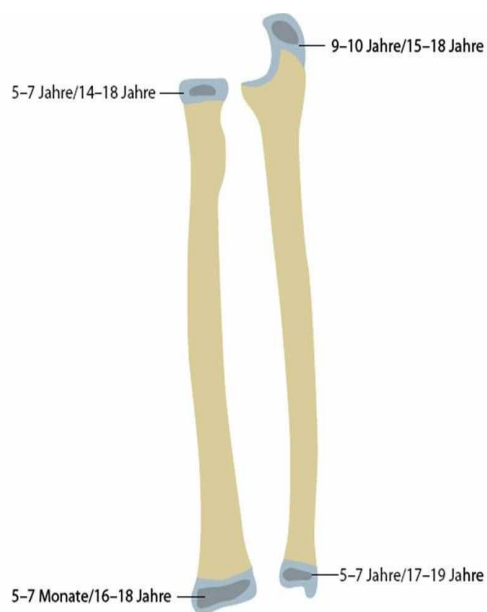


Abbildung 1.5: Ossifikationskerne und Epiphysenfugenschluss. Aus Weinberg et al. (2006)

der Epiphysenfugen in den beiden proximalen Fugen und in der distalen radialen Wachstumsfuge kommt es zwischen dem 15. und 18. Lebensjahr. Die distale ulnare Wachstumsfuge verknöchert zwischen dem 17.-19. Lebensjahr (Weinberg et al., 2006).

1.2 Frakturen am kindlichen Unterarm

1.2.1 Frakturarten

Grundsätzlich können am Unterarm je nach Lokalisation die Frakturen in epi-, meta- oder diaphysäre Brüche und in Frakturen am metadiaphysären Übergang differenziert werden (Abbildung 1.6).

Zu den epiphysären bzw. intraartikulären Frakturen zählen die reinen Gelenksfrakturen (Salter-Harris III und IV, Abbildung 1.7) und die Übergangsfrakturen. Davon zu unterscheiden sind die Epiphysenlösungen (Salter Harris I) mit und ohne metaphysären Keil (Salter-Harris II). Diese Frakturarten werden auch als extraartikuläre Frakturen bezeichnet. Weiters findet man an der Metaphyse Stauchungs-, Biegungs- und vollständige Frakturen.



Abbildung 1.6: Meta- und Diaphyse: Die Metaphyse definiert sich als das Quadrat (grün) ober- bzw. unterhalb der proximalen und distalen Epiphysenfuge. Dazwischen liegt die Diaphyse.

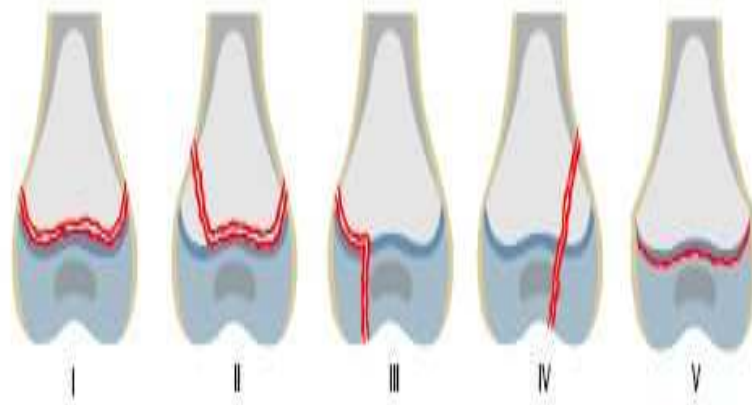


Abbildung 1.7: Salter-Harris-Klassifikation: SH I: Epiphysenlösung, SH II: Epiphysenlösung mit metaphysärem Keil, SH III: Epiphysenfraktur mit epiphysärem Keil, SH IV: Epiphysenfraktur mit epimetaphysärem Keil, SH V: Kompressionsfraktur der Epiphysenfuge. Aus Weinberg et al. (2006)

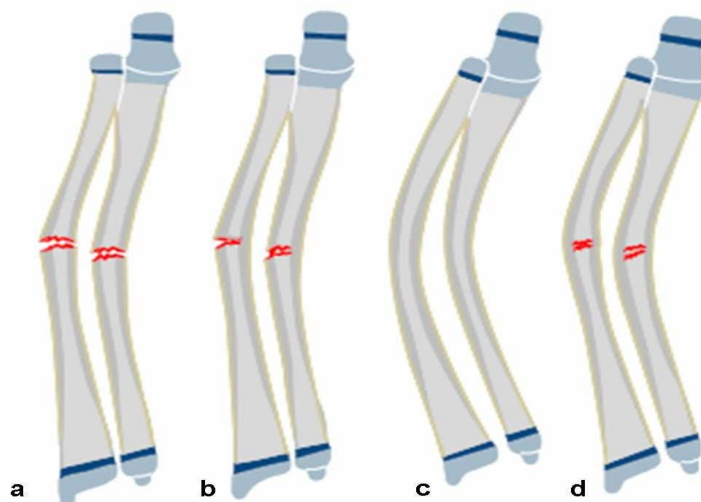


Abbildung 1.8: Unterarmschaftfrakturen-Klassifikation: a vollständige Unterarmfraktur, b Grünholzfraktur, c gebogene Biegungsfraktur, d gestauchte Biegungsfraktur. Aus Weinberg et al. (2006)

Bei Frakturen am Unterarmschaft (Abbildung 1.8) können die vollständigen von den inkompletten Frakturen unterschieden werden. Je nach Frakturverlauf differenziert man bei Ersteren die Schräg- (Frakturverlauf $> 30^\circ$), Quer- bzw. Torsion (Frakturverlauf $< 30^\circ$) und Trümmerfrakturen. Die Biegungsfrakturen können bis zum 5. Lebensjahr in eine gestauchte und gebogene Form oder in die Grünholzfrakturen eingeteilt werden (Laer et al., 2007). Unterarmschaftfrakturen finden sich im Kindesalter in etwa 10% (Schmittenebecher, 2005). Innerhalb der Diaphyse nimmt die Häufigkeit der Knochenbrüche von proximal nach distal stark zu.

Für das therapeutische Vorgehen ist es zusätzlich von wichtiger Bedeutung, ob es sich um eine stabile oder instabile Fraktur handelt: Handelt es sich um einen dislozierten Bruch beider Knochen und liegt eine Fragmentverschiebung größer als eine halbe Schaftbreite vor, so ist diese Fraktur als instabil anzusehen. Im Gegensatz dazu spricht man von einer stabilen Fraktur, wenn es zu einem Bruch nur eines Knochens kommt, eine Grünholzfraktur oder eine Verschiebung des distalen Bruchstücks von maximal $1/4$ der Schaftbreite vorliegt. Weiters ist es wichtig, dass die diaphysären Frakturen von den metaphysären getrennt werden, da diese ein unterschiedliches Remodellingpotential aufweisen, was in der Therapie berücksichtigt werden muss (Weinberg et al., 2006).

Die Grünholzfrakturen müssen bei der Versorgung gesondert berücksichtigt werden. Mit etwa 30-50% stellen an der Diaphyse die Grünholzfrakturen die häufigste Frakturart dar (Weinberg et al., 2006). Eine Grünholzfraktur definiert sich dadurch, dass auf der konvexen Seite des Knochens die Kortikalis durchbrochen ist, auf der konkaven Seite die Kortikalis intakt bleibt (Noonan und Price, 1998). Dies hat eine Konsolidationsstörung mit einer erhöhten Refrakturrate zur Folge (Abbildung 1.9). Die Refrakturrate ist umso höher, desto geringer die Kallusbildung ausfällt. Dies ist vor allem bei geringfügigen Abweichungen die Folge, die jedoch kaum Funktionsdefizite nach sich ziehen. Dem gegenüber kommt es bei großen Achsabweichungen zu einer besseren Kallusausbildung und Stabilität der Fraktur. Einerseits bedingt dies ein niedrigeres Refrakturpotential, andererseits ist in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit von Bewegungseinschränkungen höher. Diesem ganzen kann man jedoch bei der

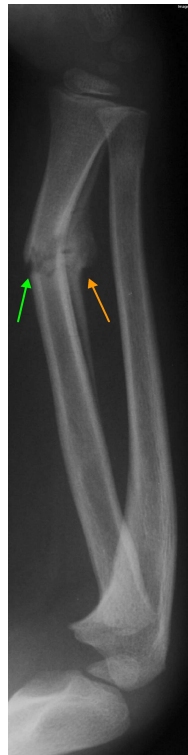


Abbildung 1.9: Konsolidationsstörung bei einer Grünholzfraktur: Eine Unterarmfraktur mit Abkippen des Radius nach dorsal. An der konkaven Seite kommt es aufgrund erhöhter Druckverhältnisse an dieser Seite (orangener Pfeil) zu einem erhöhten Knochenaufbau. Auf der konvexen Seite fehlt diese mechanische Beanspruchung des Knochens und dieser wird daher resorbiert (grüner Pfeil).

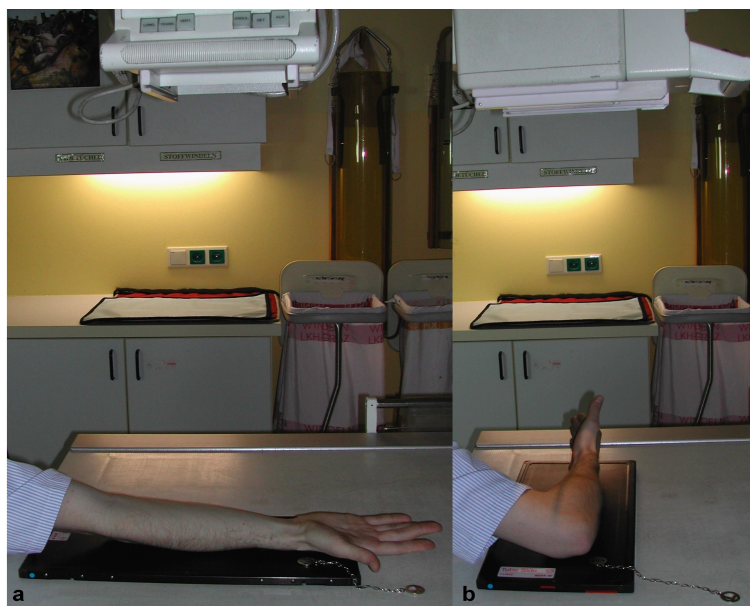


Abbildung 1.10: Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen: a Anterior-posterior Strahlengang, b seitlicher Strahlengang.

Behandlung entgegenwirken, wenn die intakte Kortikalis durchbrochen wird (Blount, 1967). Dadurch kommt es zu einer adäquaten Kallusbildung beidseits und die Gefahr der Refraktur wird erheblich vermindert.

1.2.2 Diagnostik

Für die bildgebende Diagnostik sind Aufnahmen in anterior-posterior (a.-p.) und seitlicher Ebene obligat (Abbildung 1.10). Die beiden Röntgenbilder sollten in einem 90° Winkel zueinander aufgenommen werden, um eine Achsfehlstellung am Unterarm exakt darstellen zu können. Hierbei ist darauf zu achten, dass sowohl das Ellbogen- als auch das Handgelenk abgebildet sind, um Galeazzi- und Monteggiafrakturen nicht zu übersehen (Abbildung 1.11).

Bei Galeazzifrakturen handelt es sich um eine Radiuschaftfraktur mit einer Luxation der Ulna im distalen radioulnaren Gelenk. Hingegen spricht man von einer Monteggiafraktur, wenn eine Ulnafraktur in Kombination mit einer Radiuskopfluxation vorliegt (Laer et al., 2007; Noonan und Price, 1998).

Bei der klinischen Untersuchung des Armes zeigen sich meist schmerzhafteste Bewegungseinschränkungen, Schwellungen, sowie Deformitäten des Unterarms bei stark



Abbildung 1.11: Normales Röntgenbild in 2 Ebenen mit den angrenzenden Gelenken: a a.-p. Aufnahme, b seitliche Aufnahme.

dislozierten Frakturen als Symptome. Bei schweren Verletzungen kann es bei Gefäß- oder Nervenschädigung zu Durchblutungsstörungen bzw. Sensibilitätsausfällen kommen. Die Verifizierung der Bewegungseinschränkungen erfolgt anhand der Neutral-Null-Methode.

1.2.3 Therapie von Unterarmschaftfrakturen

Grundsätzlich stehen für die Versorgung von diaphysären Unterarmfrakturen zwei Therapiemöglichkeiten zur Verfügung: die konservative und die operative Therapie (Weinberg et al., 2001). Welches Vorgehen gewählt wird hängt primär von der Stabilität und vorliegenden Achsabweichung ab. Zusätzlich muss die Frakturlokalisierung und das damit verbundene Spontankorrekturpotential berücksichtigt werden. Ziel der jeweiligen Therapie ist es, mögliche Funktionsdefizite in der Unterarmumwendbewegung zu vermeiden. Blockierende Einschränkungen in der Umwendbewegung des Unterarms, die sich nicht mehr korrigieren, sind am Unterarmschaft bei einer Achsabweichung von $< 10^\circ$ zu erwarten.

Konservative Therapie

Die Mehrzahl der Frakturen am Unterarm bei Kindern kann geschlossen reponiert und mit Gips behandelt werden (Weinberg et al., 2001; Fernandez et al., 2005; Huber et al., 1996; Richter et al., 1998; Flynn und Waters, 1996; Luhmann et al., 1998). Hierbei müssen stets die Möglichkeiten der Spontankorrektur und die Korrekturgrenzen in das Behandlungskonzept miteinbezogen werden.

Indikation für ein konservatives Vorgehen stellen vor allem stabile Frakturen dar, sofern diese nicht über dem Maß der zu tolerierenden Achsabweichung liegen. Am Unterarmschaft werden bei Kindern bis zum 10. Lebensjahr Abweichungen bis 10° akzeptiert, am distalen Unterarm sogar größere Abweichungen (Weinberg et al., 2006; Pugh, 2000).

Eine weitere Indikation für die konservative Frakturversorgung stellen die Refrakturen am Unterarmschaft dar. Die Literatur berichtet über gute bis sehr gute Ergebnisse nach konservativ therapierten Refrakturen. Die Reposition erfolgt sowohl bei diaphysären, als auch bei metaphysären Unterarmfrakturen am Aushang unter Bildwandlerkontrolle (Weinberg et al., 2006). Eine Reposition muss immer unter Schmerzmedikation erfolgen. Ist für die konservative Therapie eine Anästhesie nötig, sollte dies in Operationsbereitschaft durchgeführt werden (Weinberg et al., 2006; Laer et al., 2007). Zur Ruhigstellung eignet sich ein Oberarmgips, der für 3 bis 4 Wochen belassen wird. Danach kann bei einer weiteren Ruhigstellung auf einen Unterarmgips umgestellt werden (Schlickenwei und Oberle, 2005). Bei der Anlage des Gipses (Abbildung 1.12) ist besonders auf die Drei-Punkt-Abstützung und dem Aufspannen des intraossären Raumes zu achten. Der Arm wird, mit Ausnahme von volaren Achsenfehlstellungen - hier wird die Supinationsstellung bevorzugt - in der Neutralstellung des Unterarms ruhig gestellt (Weinberg et al., 2006).

Da es nach jeder Verletzung zu einer Schwellung kommt, ist es wichtig, dass der Gips bis zur Abschwellung gespalten getragen wird, um Druckstellen und mögliche Komplikationen zu vermeiden. Zusätzlich ist es von Vorteil, den Gips zu polstern (Weinberg et al., 2006). Der gespaltene Gips kann nach einer Woche geschlossen werden. Zudem sollte zu dieser Zeit ein Kontrollröntgen zur Stellungskontrolle durchgeführt werden, da gerade Grünholzfrakturen, abgekippte Frakturen und instabile Frakturen zu sekundären Dislokationen neigen (Weinberg et al., 2006). Ist nach einem Kontrollröntgen eine Fehlstellung zu beobachten, sollte eine Gipskeilung erfolgen

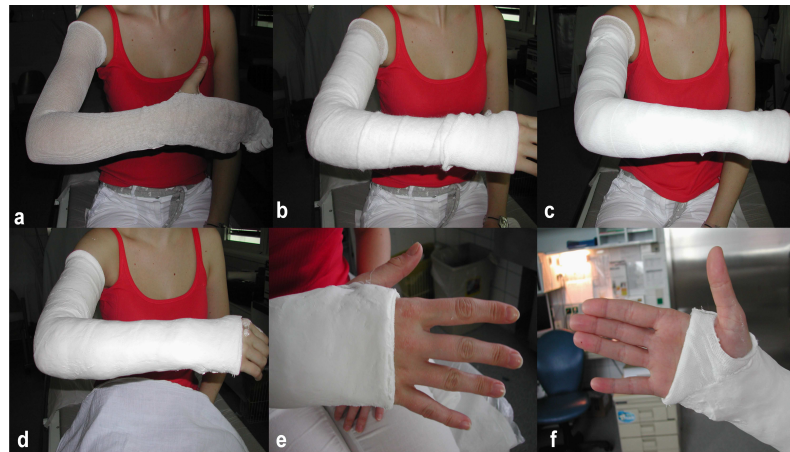


Abbildung 1.12: Anlage eines Oberarmgips: a Überzug eines Schlauchverbands über den Unterarm, b Polsterung des Gipses mit Rollwatte und Überzug mit Krepppapier, c/d Anlegen eines Gipses. Zwei Arten von Gipse stehen dafür zur Verfügung: Entweder wird ein herkömmlicher Gips, (weiß und aus Calciumsulfat, siehe Abbildung), oder ein Kunststoffgips (bunt und aus Polyurethanharz) verwendet. Wichtig ist, dass der Gips gut anmodelliert wird; e/f zusätzlich ist darauf zu achten, dass die Finger und der Daumen frei beweglich sind.

um die Fehlstellung zu korrigieren und nachfolgende Funktionsdefizite zu vermeiden (Weinberg et al., 2006; Schlickenwei und Oberle, 2005).

Der Gips kann nach adäquater Konsolidierung entfernt werden. Dies ist gegeben, wenn mindestens drei von vier Kortikales überbaut sind. Danach kann der Patient mit Bewegungsübungen anfangen. Aufgrund der langen Immobilisation des Armes ist mit einem Verlust an Muskelmasse zu rechnen.

Neben der sekundären Dislokation und einem möglichen Wechsel des Therapieverfahrens, stellen Refrakturen eine besondere Komplikation in der konservativen Versorgung von Unterarmfrakturen dar. In der Literatur wird eine Refrakturrate von 5 bis 13% bei konservativ behandelten Unterarmfrakturen angegeben (Bould und Bannister, 1999; Gruber und Laer, 1979; Schwarz, 1996). Als mögliche Gründe werden Konsolidationsstörungen nach Grünholzfrakturen, inadäquate Reposition und vorzeitiges Gipsentfernen diskutiert (Bould und Bannister, 1999).

Operative Therapie

Die Inzidenz der operativen Therapie nahm in den letzten Jahren stark zu (Weinberg et al., 2001). Dies hat einerseits damit zu tun, dass Funktionsdefizite, vor allem die der Pronation, nicht mehr akzeptiert werden, andererseits unsere kulturellen Ansprüche die definitive Versorgung der Fraktur postuliert. Nach definitiver Versorgung ist keine Nachreposition in Narkose erforderlich. Neben der intramedullären Osteosynthese stehen noch zwei weitere operative Verfahren zur Auswahl: die Plattenosteosynthese und der Fixateur externa. Beide werden jedoch heutzutage nur mehr in Ausnahmefällen zur Therapie herangezogen (Fernandez et al., 2005):

1. Marknagelung (ESMN): Die elastisch stabile Marknagelung stellt bei richtiger Durchführung, eine komplikationsarme und gute Methode für die Osteosynthese von Schaftfrakturen am Vorderarm dar (Schmittenebecher, 2005; Lascombes et al., 2006). Die Vorteile, Operationstechnik sowie mögliche Komplikationen dieser Methode werden im Kapitel Material und Methoden genauer beschrieben.
2. Plattenosteosynthese: Seit der Einführung der intramedullären Marknagelung ist man von der Versorgung von Unterarmfrakturen mittels Platten weitestgehend abgekommen. Nur mehr in Ausnahmefällen kommt die Verplattung zum Einsatz. So bietet sie bei Frakturen am dia-metaphysären Übergang, die mit

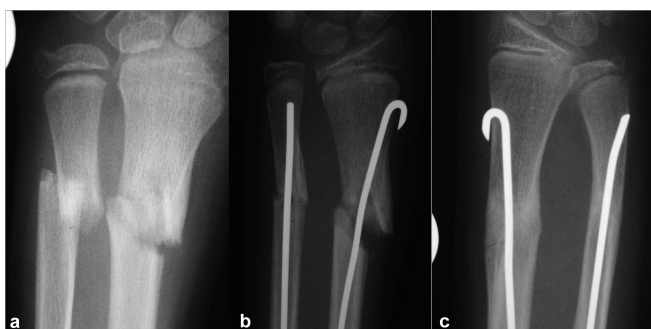


Abbildung 1.13: Fraktur am diametaphysären Übergang: a Eine dia-metaphysäre Übergangfraktur nach Sturz auf den Arm beim Volleyballspielen, b Das postoperative Röntgenbild zeigt, dass eine adäquate Stabilisierung und Reposition mit ESMN nur bedingt möglich war. Zusätzlich wurde daher für 2 Wochen eine volare Unterarmschiene angelegt. c Aufgrund des guten Remodellingpotentials am distalen Unterarm kam es zu einer guten Korrektur der postoperativen Achsfehlstellung.

der Markraumschienung teilweise nur schwer stabilisiert werden können, eine gute Frakturversorgung (Abbildung 1.13). Zudem wird bei Jugendlichen mit bereits geschlossenen Epiphysenfugen die Indikation zur Plattenosteosynthese in Kombination mit der intramedullären Marknagelung gestellt (Weinberg et al., 2006; Laer et al., 2007).

Die Zugänge für die Plattenosteosynthese des Radius und der Ulna sind mit dem der offenen Reposition bei Marknagelung ident (siehe Kapitel Material und Methoden). Nachdem bis zum Knochen vorpräpariert wurde, wird das Frakturhämatom entfernt und die Platte ausgewählt. Die Länge sollte so gewählt werden, dass auf jedem Frakturfragment drei Schrauben verankert werden können (Fernandez et al., 2005). Nach der Plattenfixierung ist es wichtig, dass die Pro- und Supination des Unterarms getestet wird, da die Platten diese verhindern können. Ein weiterer Nachteil der Plattenosteosynthese ist, dass es gehäuft zu Refrakturen (Abbildung 1.14) kommen kann (Fernandez et al., 2005; Laer et al., 2007; McLean et al., 2007). Als Gründe für Refrakturen nach Plattenosteosynthese werden in der Literatur erstens die fehlende Stimulation für die Kallusentwicklung aufgrund der starren Platten, zweitens die Minderdurchblutung des Periosts, drittens die Osteolyse der Knochenkortex und viertens die Knochenrevaskularisation mit vorübergehender Knochenschwäche genannt (Schuind et al., 1991).

3. Fixateur externa: Die dritte Möglichkeit der operativen Frakturversorgung stellt die Behandlung mittels Fixateur externe dar. Nach Laer et al. (2007) findet diese Behandlungsmethode bei Schräg-, Keil- oder Mehretagenfrakturen an langen Röhrenknochen ihre Anwendung. Der Einsatz des Fixateur externe am Unterarm ist jedoch begrenzt, wobei als mögliche Indikation eine isolierte Radiuschaftfraktur im distalen Drittel diskutiert wird (Laer et al., 2007). Eine Anwendung der externen Frakturversorgung ist bei offenen Frakturen, sowie Frakturen mit Weichteilschädigung gegeben (Laer et al., 2007; Schlickenwei und Oberle, 2005).

1.2.4 Remodelling

Der Heilungsprozess einer Fraktur kann grundsätzlich in drei Phasen eingeteilt werden. Nachdem es zu einem Bruch gekommen ist und Blutgefäße dabei verletzt wurden, entsteht ein Hämatom. Entzündungszellen und Fibroblasten wandern in das verletzte

Gebiet ein und es kommt zur Formation des Hämatoms, aus dem sich dann später der Kallus entwickelt (Entzündungsphase). Mit dem Beginn der Kallusbildung startet die Reparationsphase, in der sich das Hämatom zu einem “provisorischen” Kallus umformt. An diesem Prozess sind unter anderem Chondroblasten, Osteoblasten und Angioblasten beteiligt. Dieser neu gebildete “Knochen” füllt den Frakturspalt aus und stabilisiert die Fraktur vorübergehend. Erst in der letzten Phase, der Remodellingsphase, kommt es zur Bildung des neuen “qualitativen” Knochens, der wieder die herkömmliche Stabilität eines normalen Knochens aufweist (Wilkens, 2005). Weiters kommt es in dieser Phase zu Korrekturen der verschiedenen Achsabweichungen und Knochenverkürzungen (Korrekturmechanismen). Diese Remodellingsphase kann Monate bis Jahre dauern. Bei der Spontankorrektur kann man ein direktes Korrekturpotential, welches bei der primären Knochenheilung zur Geltung kommt, von einem indirekten abgrenzen. Bei letzterem spielt die physiologische Veränderung des Knochens eine wesentliche Rolle. Zusätzlich unterscheidet man Korrekturen (Tabelle 1.1) einer Seit-zu-Seit Verschiebung, einer Verkürzung, einer Achsenfehlstellung (Varus/Valgus, Ante-/Rekurvatur) und eines Rotationsfehlers (Weinberg et al., 2006; Laer und Hasler, 2000).

Das Spontankorrekturpotential ist von einigen Faktoren abhängig: Von wichtiger Bedeutung ist zum einen das Alter des Kindes. Bis zum 10. Lebensjahr findet man ein



Abbildung 1.14: Refraktur nach Plattenosteosynthese: a Eine nach Fahrradsturz versorgte Fraktur mit einer Platte und 4 Schrauben bei einem 13-jährigen Mädchen. b Die Platte wurde nach 10 Monaten entfernt. Man kann die Schraubenlöcher noch erkennen. c Nach 13 Tagen kam es beim Schieben des Kinderwagens zu einer Refraktur.

Fehlstellungen	Korrekturmechanismen
Seit-zu-Seit Verschiebung	direkte, gezielte periostal/endostale Korrektur
Verkürzungsfehlstellung	direkte, ungezielte rein epiphysäre Korrektur
Achsenknicken, des (Varus/Valgus, Ante-/rekurvation)	direkte gezielte, kombinierte periostal/epiphysäre Korrektur
Rotationsfehler	indirekte, ungezielte Korrektur im Rahmen physiologischer Detorsionsvorgänge

Tabelle 1.1: Arten der Fehlstellungen und die jeweiligen Korrekturmechanismen.

gutes Korrekturpotentials einer Fraktur (Weinberg et al., 2006; Laer, 2001). Zum anderen ist die Epiphysenfugen zu 75% an dem Remodelling beteiligt (Wilkens, 2005). Die Korrektur einer Abweichung ist maßgeblich von der nächstgelegenen Epiphysenfuge abhängig: *“Je hochprozentiger die Fuge am Längenwachstum des jeweiligen Knochens beteiligt ist, desto länger lebt sie und desto länger können Korrekturen in deren Nähe stattfinden. Je niedrigprozentiger eine derartige Fuge beteiligt ist, desto kürzer lebt sie und desto weniger lange können Korrekturen um sie herum stattfinden”* (Laer und Hasler, 2000).

Friberg (1979) zeigte in seiner Studie (Friberg, 1979), dass es zu einer Veränderung des Neigungswinkels der Epiphysenfuge kommt (Abbildung 1.15). Diese Möglichkeit der Korrektur durch die Wachstumsfuge hängt von der Größe der anfänglichen Abweichung ab: Je größer diese Abweichung, desto erheblicher und schneller ist die Fähigkeit der Korrektur. In manchen Fällen, bei denen die primäre Abweichung sehr gering war, kam es zu keiner Veränderung des Neigungswinkels (Friberg, 1979).

Weiters ist die Lokalisation der Fraktur für den Grad der Spontankorrektur von Bedeutung: So findet sich im Vergleich zur Metaphyse, die ein gutes Korrekturpotential besitzt, an der Diaphyse eine geringe Fähigkeit des Remodellings (Wilkens, 2005; Vorlat und De Boeck, 2003). Die Diaphyse ist mit 25% nur mit einem geringen Anteil am Remodelling beteiligt. Der Korrekturmechanismus folgt an der Diaphyse dem Gesetz nach Wolff (Wilkens, 2005; Pfeifer et al., 2004): Aufgrund der Achsenverhältnis kommt es zu einem erhöhten Druck bei Beanspruchung des Knochens auf

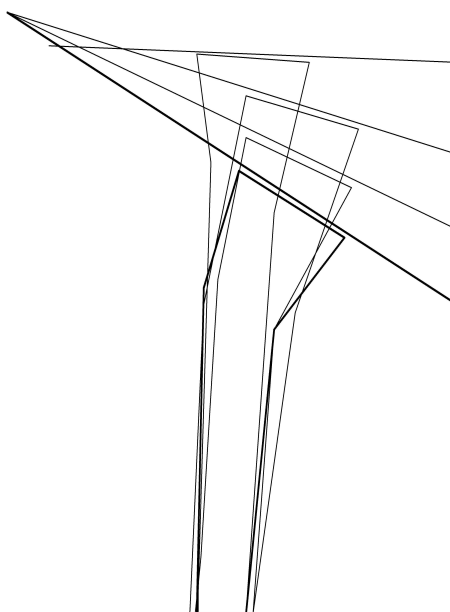


Abbildung 1.15: Schematische Darstellung der Veränderung des Neigungswinkels nach einer distalen Unterarmfraktur in der Remodellingsphase.

der konkaven Seite, wodurch die Anlage eines neuen Knochens begünstigt wird.

Im Gegensatz dazu kommt es auf der konvexen Seite zu einer minderen Druckbelastung, sodass der Knochen an dieser Seite resorbiert wird (Wilkins, 2005; Cochran, 1998).

Bei jeder Achsenabweichung, die den interössaeren Raum einengt und eine Achsenfehlstellung von $< 10^\circ$ aufweist, sind Funktionsdefizite zu erwarten. Diese blockierenden Fehlstellungen korrigieren sich nicht mehr. Dies sind vor allem Fehlstellungen des Radius nach ulnar und volar, sowie Achsenfehlstellungen der Ulna nach volar oder radial (Weinberg et al., 2001). Weiters führen proximal gelegene Frakturen, vor allem die proximal des Kreuzungspunktes von Ulna und Radius liegen, häufig zu Einschränkungen und Blockaden bei Pro- und Supination (Schmittbecher, 2005).

Zu guter Letzt wird das Korrekturpotential von dem Bewegungsgrad des nächstgelegenen angrenzenden Gelenks beeinflusst (Laer und Hasler, 2000). Umso mehr Freiheits- und Bewegungsgrade dieses Gelenk besitzt, desto größer ist der zu erwartende Korrekturmechanismus in den möglichen Bewegungsebenen des Gelenks und vice versa (Laer und Hasler, 2000).



Abbildung 1.16: Untersuchungsmethode: Die klinische Nachuntersuchung der Pronation und die Supination nach der Neutral-Null-Methode. Hierbei ist es wichtig, dass der Patient den Oberarm am Oberkörper anlegt, damit die Bewegung nicht mit Schulterbewegungen korrigiert und so mögliche Einschränkungen übersehen werden können.

1.2.5 Nachbehandlung

Je nach Therapieverfahren gestaltet sich die Nachbehandlung unterschiedlich. Bei konservativ behandelten Frakturen wird der Oberarmgips bis zur Frakturüberbauung belassen. In der Regel ist das zwischen 3 bis 5 Wochen (Schmittbecher, 2005; Schlickenwei und Oberle, 2005). Wird der Gips während der Behandlung brüchig oder locker, wird dieser getauscht. Eine radiologische Kontrolle erfolgt am 5. bis 8. Tag, um bei möglichen sekundären Abkippen frühzeitig intervenieren zu können, und in der 3. bis 4. Woche zur Erhebung der Konsolidierung.

Operativ versorgte Frakturen benötigen keine Stellungskontrolle am 7. postoperativen Tag, da diese nicht sekundär dislozieren können. Da in den meisten Fällen keine zusätzliche Ruhigstellung am Unterarm nötig ist, können die Patienten je nach Schmerzintensität mit Bewegungsübungen anfangen. Die Nägel verbleiben zwischen 6 bis 8 Monate, um mögliche Refrakturen verhindern zu können, hingegen werden Platten erst nach 8 bis 12 Monaten postoperativ entfernt. Alle Patienten werden bis zum Erlangen der freien Unterarmbeweglichkeit nachkontrolliert (Abbildungen 1.16 und 1.17). Ist diese nicht gegeben, werden die Betroffenen alle 6 Monate ambulant einberufen und die Funktion geprüft. Kommt es zu keiner Besserung, muss frühzeitig eine Therapie diesbezüglich eingeleitet werden (Weinberg et al., 2006; Schlickenwei und Oberle, 2005).

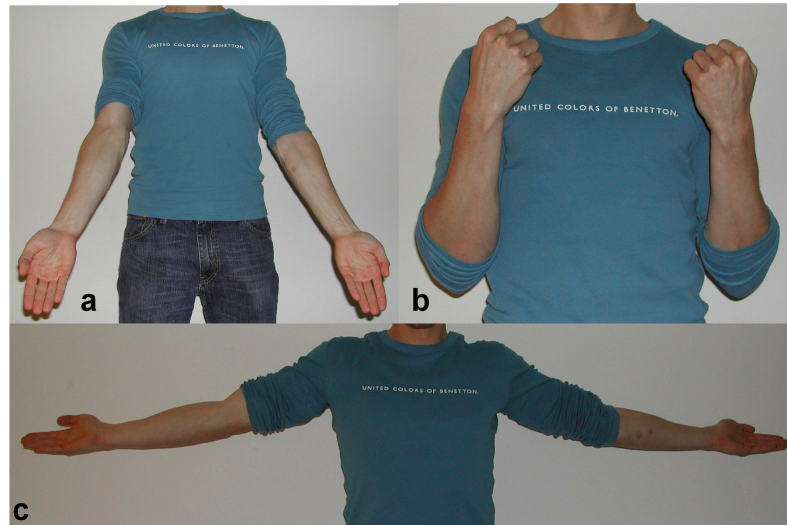


Abbildung 1.17: Klinische Nachuntersuchung: Verifizierung von Bewegungseinschränkung bei Extension und Flexion im Bereich des Ellbogengelenks nach Unterarmverletzungen.

1.2.6 Spätkomplikationen

Wachstumsstörungen im Sinne einer hemmenden oder stimulativen Wachstumsstörung haben, im Gegensatz zur unteren Extremität, am kindlichen Unterarm klinisch keine Bedeutung. Als Folge einer Fraktur kann es zu einer Verlängerung eines Knochens kommen, jedoch werden diese im Laufe des Wachstums problemlos korrigiert (Laer et al., 2007).

Wichtige Spätkomplikationen, die einer frühzeitigen Intervention bedürfen, sind blockierende Einschränkungen der Pro- und Supination. Solche Defizite besitzen ein sehr schlechtes Spontankorrekturpotential und führen häufig zu bleibenden Funktionseinschränkungen (Weinberg et al., 2006).

Kapitel 2

Spezieller Teil - Retrospektive Studie

2.1 Einleitung

Unterarmfrakturen zählen neben den Fingerfrakturen zu den häufigsten Verletzungen im Kindesalter (Rodriquez, 2005; Rockwood et al., 1984). Die Inzidenz nahm in den letzten Jahren stetig zu, was mit der Zunahme an Rasanisportarten wie Inlineskaten und Snowboarden zu begründen ist (Khosla et al., 2003; Heller et al., 1996). Die Häufigkeit der Verletzungen variiert sehr stark mit der Lokalisation. Die typische Lokalisation von Unterarmbrüchen im Kindesalter ist die distale Metaphyse am Vorderarm, Frakturen am diaphysären Unterarm machen nur 15% aus.

Für die Versorgung der Schaftfrakturen am Unterarm stehen die konservative und die operative Therapie zur Verfügung (Hertlein et al., 2000; Weinberg et al., 2001). Unabhängig davon, welche Methode gewählt wird, steht die korrekte anatomische Wiederherstellung und Vermeidung von Funktionsdefiziten an oberster Priorität. Die Mehrzahl der Frakturen können sehr gut mittels Gipsimmobilisation behandelt werden, da Kleinkinder ein sehr gutes Remodellingspotential besitzen und deshalb nicht um jeden Preis eine achsengerechte Stellung erzwungen werden muss (Richter et al., 1998). Natürlich sind aber auch dem Spontankorrekturmechanismus Grenzen gesetzt, sodass bei zu großen Fehlstellungen oder Frakturen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit sekundär dislozieren, ein operatives Vorgehen gewählt werden sollte (Richter et al., 1998). Zudem können auch relativ kleine Fehlstellungen, vor allem die, die

den interosseären Raum einengen, zu Einschränkungen in der Umwendbewegung des Unterarms führen (Weinberg et al., 2001). Obwohl minimale Einschränkungen, vor allem die der Pronation, gut mit der Schulter kompensiert werden können, werden diese heutzutage nicht mehr akzeptiert. Um diese Defizite zu verhindern bietet sich die elastisch stabile Marknagelung (ESMN) als geeignetes operatives Verfahren an (Lascombes et al., 2006; Mittal et al., 2004). Seit der Einführung der ESMN durch die Nancy Gruppe in den 70iger Jahren hat sich die Therapie von diaphysären Unterarmfrakturen stark geändert, da ab diesem Zeitpunkt eine kindergerechte Methode zur Verfügung stand (Lascombes et al., 2006). Die Inzidenz an operative versorgten Unterarmschaftfrakturen nahm stark zu und die zuvor verwendeten Platten werden nur mehr in Ausnahmefällen zur Frakturversorgung im Kindesalter herangezogen.

Neben der sekundären Dislokation stellen Refrakturen am Unterarmschaft eine relativ häufige Komplikation in der konservativen Frakturversorgung dar. Die Refrakturnrate bei konservativer Behandlung beträgt 5 bis 13% (Bould und Bannister, 1999; Gruber und Laer, 1979). Aus der Literatur kann entnommen werden, dass Refrakturen häufiger nach Grünholzfrakturen zu beobachten sind, da diese immer mit Konsolidationsstörungen bei der Frakturheilung einhergehen. Wird bei der Behandlung die noch intakte Kortikalis nicht durchbrochen, kommt es zu einer fehlenden Überbauung an dieser Stelle (Laer, 2001).

Bezüglich der Refrakturen findet man eine ganze Menge an Literatur, die sich mit der Frage beschäftigen, wann eine Refraktur auftritt, was die Ursachen sind und wie Refrakturen verhindert werden können (Bould und Bannister, 1999; Litton und Adler, 1963; Rosson und Shearer, 1991; Schwarz, 1996; Seyffarth, 1996). Jedoch findet man kaum Literatur, die sich mit der Frage der Therapie von Refrakturen auseinandersetzt. Einige Autoren berichten über gute Resultate nach konservativer Therapie (Schwarz, 1996). Eine wiederholte Ruhigstellung mit Gips für weitere 3 bis 5 Wochen oder die operative Therapie mittels Plattenosteosynthese werden als therapeutische Möglichkeiten genannt (Laer et al., 2007). Bisher gibt es jedoch noch keine Literatur dazu, ob die elastisch stabilen Marknagelung als operative Methode für die Behandlung von Refrakturen am diaphysären Unterarm geeignet ist. Mit dieser Methode können bei Unterarmschaftfrakturen sehr gute Ergebnisse erzielt werden und ist, bei richtiger Durchführung, ein komplikationsarmes Verfahren. Ziel dieser Studie ist es, zu zeigen, dass dieses Verfahren auch bei Refrakturen am Unterarmschaft angewandt werden kann. Im Unterschied zu herkömmlichen Frakturen liegt bei

Refrakturen häufig ein geblockter Markraum vor. Dies kann zu intraoperativen Komplikationen führen und eine geschlossene Reposition unmöglich machen. Ein offenes Vorgehen ist nötig, um die Fraktur mittels intramedullären Nägel zu stabilisieren, was eine zusätzliche Narbe am Unterarm zur Folge hat. In dieser Studie wird der operative Aufwand und das operative Vorgehen, ob ein geschlossenes oder offenes Verfahren notwendig war, analysiert. Zusätzlich sollte festgestellt werden, ob die intramedulläre Marknagelung eine geeignete Methode für die Therapie von Refrakturen am diaphysären Unterarm ist.

2.2 Material und Methoden

Es wurde eine retrospektive Analyse - der mittels elastisch stabiler Marknagelung (ESMN) versorgten - Unterarmschaft Refrakturen zwischen 2000 und 2006 an der Kinderchirurgie im Universitätsklinikum Graz durchgeführt.

Folgende Parameter wurden untersucht: das Geschlecht, das Alter bei Unfall, die Unfallursache und der Frakturtyp sowohl bei den primären Frakturen, als auch bei den Refrakturen, die operative Therapie mittels elastisch stabiler Marknagelung (geschlossenes oder offenes Verfahren) und ihre intra- und postoperativen Komplikationen und die Langzeitresultate.

Die Daten für diese retrospektiven Analysen wurden einerseits aus den stationären Dokumenten und Operationsberichten entnommen, andererseits aus den Dokumenten der ambulanten Kontrollen. Für die Beurteilung der Frakturklassifikation, Achsenabweichungen und der Frakturkonsolidation, wurden die Röntgenbilder der Patienten herausgesucht, abphotographiert und analysiert. Die Diaphyse des Unterarms wurde in ein proximales, mittleres und distales Drittel eingeteilt. Die Beurteilung der Unterarmumwendbewegung wurde bei den Patienten während des ambulanten Follow-ups durchgeführt.

Operationsindikation: Die Unfallbilder zeigten, abgesehen von einem verlorenen Unfallbild der Refraktur, bei den 20 Patienten entweder eine Achsenabweichung $> 10^\circ$ oder eine Schaftdislokation $> 1/3$ des Schaftes, sodass die Indikation zur Operation gestellt werden konnte (Tabelle 2.1).

		Achse		Schaft	
Patient	Alter	Radius seitl.	Radius a.p.	Radius seitl.	Radius a.p.
B.Z.	12	35v	-	-	-
D.D	10	30v	15r	-	-
P.G.	10	20v	-	1/3	1/2
H.G.	14	25d	-	-	-
C.M.	11	30v	-	1/2	1/3
R.L.	12	20d	20u	1/3	-
P.L.	6	n.v.	30r	n.v.	1/3
S.D.	7	15d	15r	-	-
W.M.	10	10d	10u	1/2	1/3
S.C.	6	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
K.M.	5	20d	5r	-	-
P.F.	8	20d	-	-	-
H.M.	4	30d	5u	-	-
K.S.	7	25d	-	-	-
A.E.	7	30d	-	-	-
Z.M.	7	20d	10r	-	-
M.T.	5	15d	10u	1/3	1/2
S.Chr.	6	20v	n.v.	-	n.v.
B.J.	5	35d	-	-	-
S.S.	6	n.v.	20v	n.v.	-
K.M.	2	20v	n.v.	1	n.v.

Tabelle 2.1: Achsfehlstellungen und Schaftverschiebungen der Frakturen bei den 21 Patienten. seitl.=seitliche Aufnahme, a.-p.=anterior-posterior Aufnahme, v=ventral, d=dorsal, u=ulnar, r=radial, n.v.=nicht verfügbar

Tipps und Tricks: Bei Vorhandensein eines geblockten Markraums wurde folgende spezielle Operationstechnik durchgeführt, um ein offenes Vorgehen zu vermeiden: Nach dem Öffnen des Markraums mittels Pfriem, wird ein gespitzter Kirschner-Draht in den Markraum eingeführt und bis zum Frakturspalt vorgeschoben. Durch Rotieren des Drahtes kann der geblockte Markraum eröffnet werden. Der Kirschner-Draht kann danach, muss aber nicht zwingend, entfernt und durch einen elastisch stabilen Marknagel ersetzt werden.

Nachbehandlung: Nach der Operation wurden alle Patienten sowohl klinisch, als auch radiologisch nachuntersucht. Das klinische Follow-up wurde bis zum Zeitpunkt der Metallentfernung durchgeführt. Nach der Metallentfernung wurde bei allen Patienten abschließend eine klinische und radiologische Untersuchung durchgeführt. Wurden hierbei keine funktionellen Defizite beobachtet, endete die Nachkontrolle.

Langzeitresultate: Die Langzeitresultate wurden mittels Fragebögen untersucht. Folgende Parameter wurden dabei geprüft: das Auftreten einer Re-Refaktur oder einer anderen Verletzung an derselben Stelle. Das Vorhandensein von Schmerzen oder Wetterfühligkeit. Zusätzlich wurden die Patienten über ihre Sportaktivitäten befragt, ob sie Sport betreiben, wenn ja welchen Sport und ob sich ihre sportliche Aktivität aufgrund der Unterarmfraktur und Refaktur geändert hat. Diese Fragebögen wurden entweder per Telefon oder per Brief durchgeführt.

2.2.1 Elastisch stabile Marknagelung

Allgemein

Die intramedulläre Marknagelung erfreut sich in den letzten Jahren immer mehr an Beliebtheit. Zum ersten Mal wurde die Marknagelung mittels elastisch stabiler Marknägel bei einem Kind mit Vitamin D resistenter Rachitis in Nancy 1977, Frankreich, durchgeführt (Hunter, 2005). Es wurde versucht die Fraktur mit langen dünnen Nägeln, die in den Markraum eingebracht wurden, zu stabilisieren. Diese Art der Knochenosteosynthese wurde anfänglich bei Verletzungen des Femurschaftknochens angewendet. Dabei konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden und die Technik wurde später auf die Versorgung von Unterarmfrakturen ausgeweitet (Lascombes et al., 1990).

Ziel ist es, durch frakturfernes (metaphysär) Einbringen von Implantaten die Bruchfragmente nach geschlossener Reposition aufzufädeln, die korrekte Anatomie

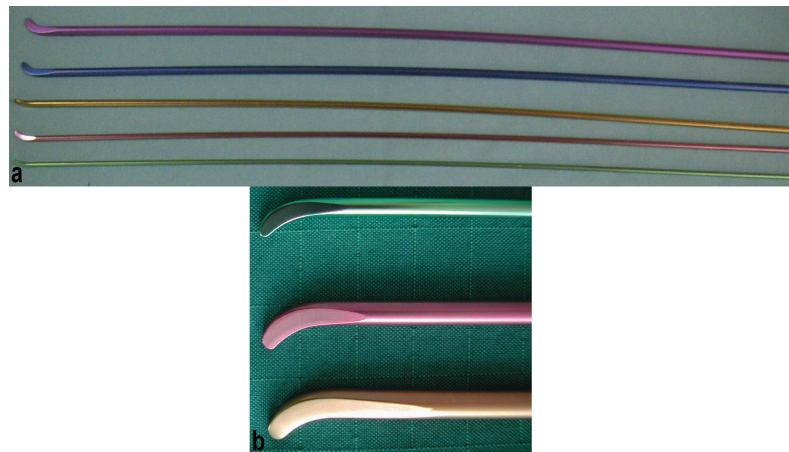


Abbildung 2.1: Titanimplantate: Die elastisch stabilen Markraum Nägel sind in verschiedenen Größen und Farben erhältlich (a). Die Spitze ist schnabelartig gekrümmt, was das Einbringen und Auffädeln der Implantate erleichtert (b). Diese Nägel können intraoperativ bei Bedarf gekürzt werden.

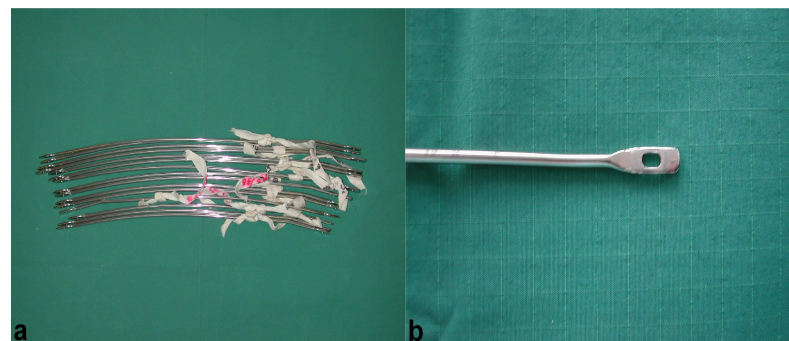


Abbildung 2.2: Stahlimplantate: Die Stahlimplantate (a) besitzen eine Öse (b), sodass eine Schraube als Fixation eingebracht werden kann. Der Nachteil dieser Implantate gegenüber den Titannägeln liegt darin, dass diese nicht gekürzt werden können und es daher eine intraoperative Längenmessung erfordert.

wieder herzustellen und durch eine gegenläufige Drei-Punkt-Abstützung eine physiologische Aufspannung des interossären Raumes zu gewährleisten, um mögliche Funktionsdefizite der Umwendbewegung zu verhindern (Lascombes et al., 2006; Schlickenwei und Salm, 2001; Schmittenbecher, 2001). Als Implantate kommen elastisch stabile Markraum-Nägel (Abbildung 2.1), Stahlimplantate mit Ösen (Abbildung 2.2) oder Kirschnerdrähte bei sehr kleinen Kindern zum Einsatz.

In den meisten Fällen ist ein geschlossenes Verfahren möglich. Hierbei handelt es

sich um einen sehr Weichteil schonenden Eingriff, da nur zwei kleine Zugänge benötigt werden, um die Nägel einzubringen.

Kann die Fraktur jedoch nicht geschlossen reponiert werden, muss auf einen offenen Vorgang umgestiegen werden (Schmittenebecher, 2005; Lascombes et al., 1990; Schmittenebecher, 2001). Grund dafür kann einerseits ein geblockter oder eingegengter Markraum nach Refraktur, andererseits, bei stark dislozierten Frakturen, ein Weichteilinterponat sein (Lascombes et al., 1990). Bei beiden wird oberhalb der Fraktur ein Hautschnitt gesetzt und die Fraktur freigelegt, um den Burch unter Sicht zu reponieren.

Vor- und Nachteile

Ein sehr großer Vorteil der intramedullären Marknagelung liegt darin, dass postoperativ je nach Schmerzintensität relativ schnell eine Wiederaufnahme der Beweglichkeit ohne Gipsimmobilisation gewährleistet ist (Lascombes et al., 2006; Hahn et al., 1997). Gerade bei Schulkindern ist dies sehr förderlich, da es zu weniger Versäumnissen in der Schule kommt.

Zudem bietet die elastisch stabile Markraumschienung noch weitere Vorteile, aber auch einige Nachteile (Tabelle 2.2; Lascombes et al., 2006; Fernandez et al., 2005; Hahn et al., 1997; Cullen et al., 2006; Haasbeek und Cole, 1995; Pugh, 2000). Der größte Nachteil liegt in der Notwendigkeit einer zweiten Operation, um die Nägel wieder zu entfernen. Dies geschieht normalerweise erst nach 6 bis 8 Monaten, um das Refrakturrisiko zu senken. Neueste wissenschaftliche Studien und Versuche versuchen, resorbierbare Implantate zu erforschen, sodass keine zweite Operation mehr benötigt wird.

Indikation und Kontraindikation

Die Indikation zur intramedullären Marknagelung kann in eine absolute und relative unterteilt werden. Zu ersteren gehören vor allem alle instabilen Frakturen, da diese zu sekundären Dislokationen nach konservativer Therapie neigen und diaphysäre Frakturen. Brüche am Unterarmschaft, besonders Verletzungen mit einer Achsenabweichung und Einengung des interossären Raumes, sowie volare Achsenfehlstellung, insbesondere des Radius, von über 10° , radiale Achsenfehlstellung der Ulna und ulnare Achsenfehlstellungen des Radius benötigen eine operative Reposition. Weiters stellen Verletzungen mit Beteiligung von Gefäß- und Nervenschäden eine absolute

Vorteile	Nachteile
gute funktionelle Ergebnisse bei richtiger Durchführung	zweite Operation
keine postoperative Ruhigstellung im Gips	Gefahr von allgemeinen Operationsrisiken (Osteomyelitis, Osteitis, Wundheilungsstörung)
sofortige postoperative Belastung je nach Schmerzintensität	Sehnenruptur des Musculus pollicis longus
gutes kosmetisches/ästhetisches Ergebnis	iatrogener Schaden des Ramus superficialis des Nervus radialis
kurzer Krankenhausaufenthalt	selten: Unterarmkompartement

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile der Markraumschienung.

Op-Indikation dar.

Zu den relativen Indikationen gehören dislozierte Frakturen beider Knochen mit Fragmentkontakt weniger als halbe Schaftbreite ohne Achsenabweichung, dislozierte Grünholzfrakturen, metaphysäre Frakturen am Übergang zur Diaphyse und offene Brüche I-II°. Bei bereits geschlossenen Epiphysenfugen kann die elastisch stabile Marknagelung mit einer Plattenosteosynthese kombiniert werden.

Zu den Kontraindikationen gehören undislozierte instabile Frakturen, die keiner Reposition bedürfen, sowie distale metaphysäre Frakturen, offene Frakturen III° und Grünholzfrakturen unterhalb des 5. Lebensjahres (Weinberg et al., 2006, 2001; Lascombes et al., 2006; Hahn et al., 1997; Haasbeek und Cole, 1995; Pugh, 2000; Hunter, 2005; Schmittenbecher, 2001; Mittal et al., 2004).

Operationstechnik

Die intramedulläre Marknagelung wird in Intubationsnarkose und unter Bildwandlerkontrolle durchgeführt. Der Patient wird am Rücken gelagert und der Arm frei beweglich abgedeckt. Hierfür ist ein Armtisch empfehlenswert (Abbildung 2.3).

In der Regel beginnt man zuerst mit dem schwerer zu reponierbaren, meist dem vollständig dislozierten Knochen. Dies ist vorwiegend der Radius. Die Speiche wird aszendiert geschient. Dafür wird ein kleiner Zugang ca. 2 cm proximal der distalen



Abbildung 2.3: Op-Lagerung: Der Patient wird am Rücken und der Arm im rechten Winkel auf einen Armtisch gelagert. Die Verwendung eines solchen Tisches erlaubt es, den Arm je nach Situation besser bewegen zu können.

Epiphysenfuge radialseits oder dorsal (Tuberculum dorsale [Lister]) gewählt. Der dorsale Zugang wird vor allem bei sehr weit distal liegenden Schaftfrakturen benutzt. Danach erfolgt das stumpfe Präparieren mittels Schere bis zum Knochen. Dabei ist es bedeutsam, dass der Ramus superficialis des Nervus Radialis dargestellt und geschont wird, um eine iatrogene Nervenschädigung desselben zu verhindern. Hat man den Knochen erreicht, wird mittels Pfriem durch vorsichtiges Rotieren die Kortikalis aufgebohrt und der Markraum eröffnet (Abbildung 2.4).

Wurde der Markraum eröffnet, kann der Pfriem entfernt werden und das Implantat stattdessen eingeführt werden. Bevor der Nagel in den Markraum geschoben wird, muss dieser vorgebogen werden.

Mittels T-Griff (Abbildung 2.5) und rotierenden Bewegungen wird der Nagel bis zum Frakturspalt vor getrieben. Es erfolgt die Reposition der Fraktur und unter schonendem Vorschlagen des Implantats das Auffädeln der Fragmente (Abbildung 2.6).

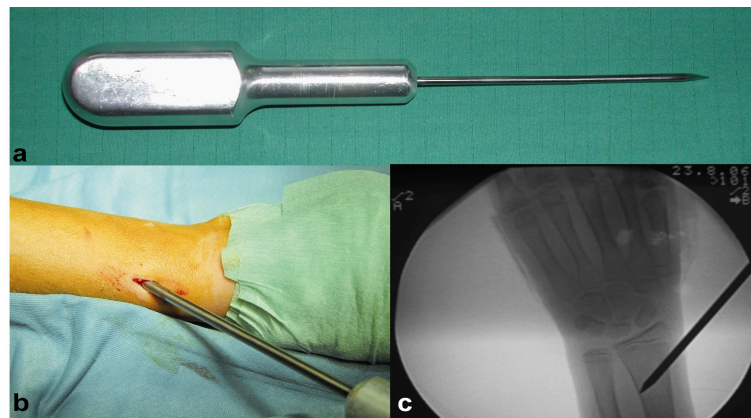


Abbildung 2.4: Radialer Zugang: a Pfriem, b Einbringen des Pfriems 2 cm proximal der Epiphysenfuge radialsseits, c auf dem intraoperativen Röntgenbild ist eindeutig sichtbar, dass sich die Spitze des Pfriems im Markraum befindet.

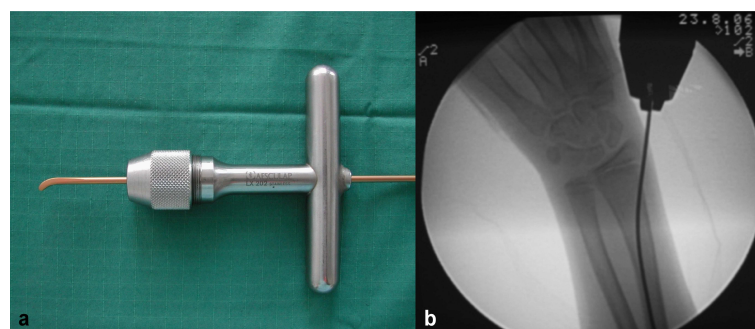


Abbildung 2.5: Einbringen des Nagels: Der Nagel wird zuerst in den sogenannten T-Griff gespannt (a). Dabei ist darauf zu achten, dass das schnabelartig verbogene Ende vorne ist. Der Nagel sollte eine Dicke von $\frac{2}{3}$ des Markraums aufweisen. Intraoperatives Röntgenbild mit eingebrachtem Nagel im T-Griff (b).

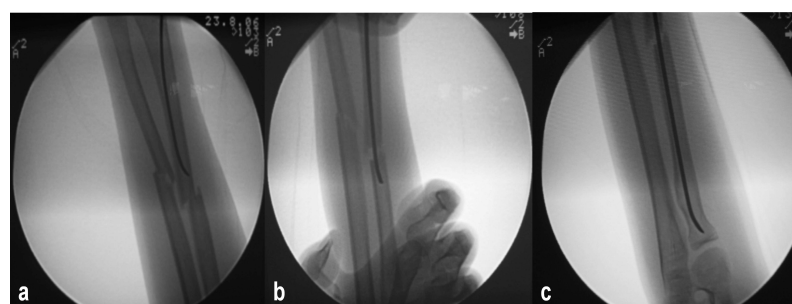


Abbildung 2.6: Intraoperative Röntgenbilder: zeigen das Nachvortreiben des Nagels: a zum Frakturspalt, b über die Fraktur, c bis in das Radiusköpfchen.

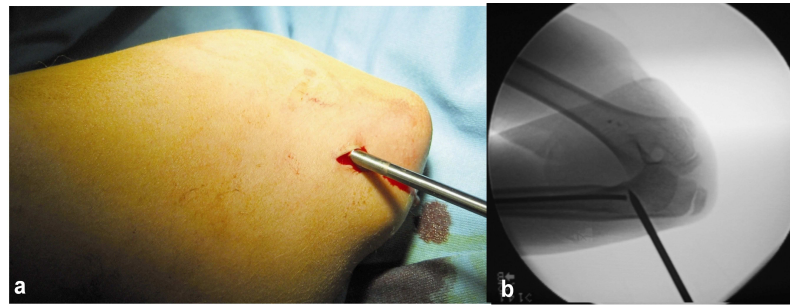


Abbildung 2.7: Ulnare Zugang: a Eröffnen des Markraums mittels Pfriem unter Schonung der Olecranonapophyse. b Das intraoperative Röntgenbild zeigt die Eröffnung des ulnaren Markraums mittels Pfriem bei bereits liegendem radialem Nagel.

Die maximale Biegung des vorgebogenen Nagels sollte auf Höhe des Frakturspalts zu liegen kommen. Aufgrund der Drei-Punkt-Abstützung kommt es zum Umwandeln von Zug- in Kompressionkräfte und dadurch zu einer verbesserten Kallusbildung (Huber et al., 1996).

Die Schienung der Ulna wird meist deszendiert durchgeführt. Dafür wird etwa 2 cm distal der Apophysenfuge ein dorsolateraler Zugang vorgenommen und wie am Radius stumpf bis zum Knochen präpariert. Die Olecranonapophyse muss dabei geschont werden (Abbildung 2.7). Nachdem der Markraum eröffnet wurde, kann der Nagel in den Markraum eingebracht werden und wie zuvor bei der Speiche mittels T-Griff über den Frakturspalt hinweg vorgetrieben werden (Abbildung 2.8).

Sind beide Knochen mit Nägeln versorgt, wird eine abschließende Bildwandlerkontrolle durchgeführt und die Lage der Implantate beurteilt (Abbildung 2.9).

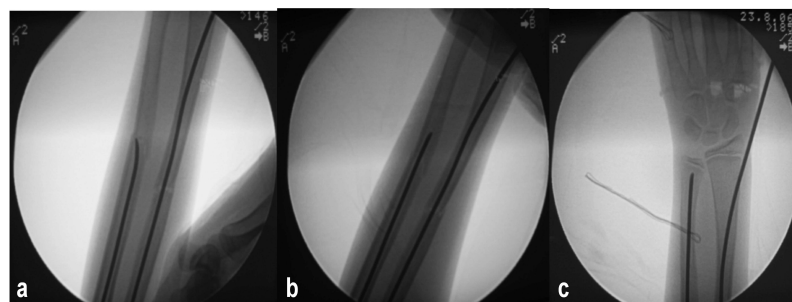


Abbildung 2.8: Nagelung der Ulna: a - c Deszendierende Schienung der Ulna bis knapp unterhalb der distalen ulnaren Epiphysenfuge.

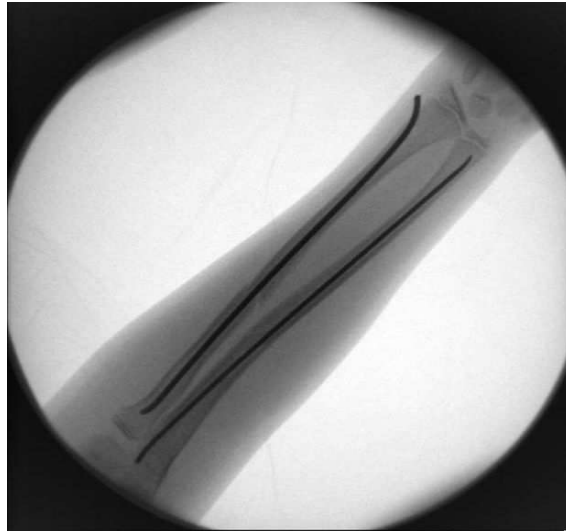


Abbildung 2.9: Op-Kontrollbild: Intraoperatives Übersichtsbild einer versorgten Fraktur mit regelrecht liegenden Marknägeln.

Zusätzlich sollte eine intraoperative Überprüfung der Umwendbewegung durchgeführt werden. Ist diese regelrecht, werden die Nagelenden so kurz wie möglich abgezwickelt und umgebogen, um Irritationen oder Hautperforationen zu vermeiden. Danach werden die beiden Hautschnitte mit resorbierbaren Nähten versorgt und mit Steristrips abgedeckt (Abbildung 2.10). Dem Patienten bleiben bei geschlossener Reposition zwei kleine Hautschnitte. Die Behandlung mit ESMN führt somit zu sehr guten kosmetischen Ergebnissen.



Abbildung 2.10: Versorgung der Wunde.

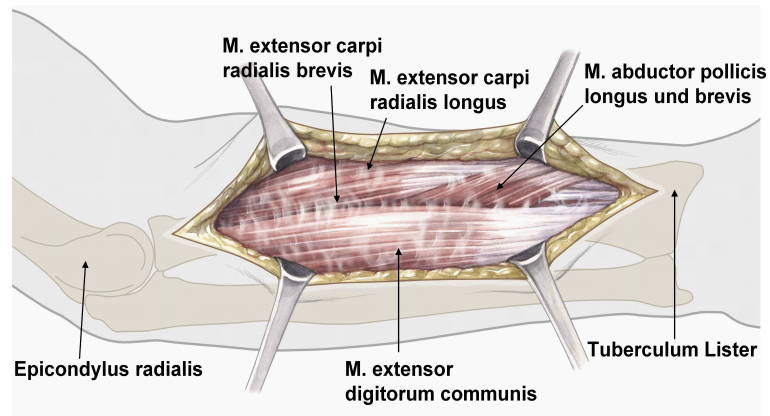


Abbildung 2.11: Offener Zugang Radius: Der Hautschnitt erfolgt in leicht flektierter und pronierter Haltung des Arms. Modifiziert, aus Weinberg et al. (2006)

Nach 2 bis 3 misslungenen Repositionsversuchen sollte die Fraktur offen reponiert werden (Weinberg et al., 2006). Für den dorsalen Zugang zum mittleren und distalen Drittel des Radius wird auf einer Linie zwischen Epicondylus radialis und Tuberculum Lister inzidiert (Abbildung 2.11). Danach erfolgt die Spaltung der Faszie und das Vorpräparieren zwischen dem Musculus extensor digitorum communis und dem Musculus extensor carpi radialis brevis in die Tiefe. Hierbei trifft man auf die Musculi abductor pollicis longus und extensor pollicis brevis, die mobilisiert und angeschlungen werden (Abbildung 2.12).

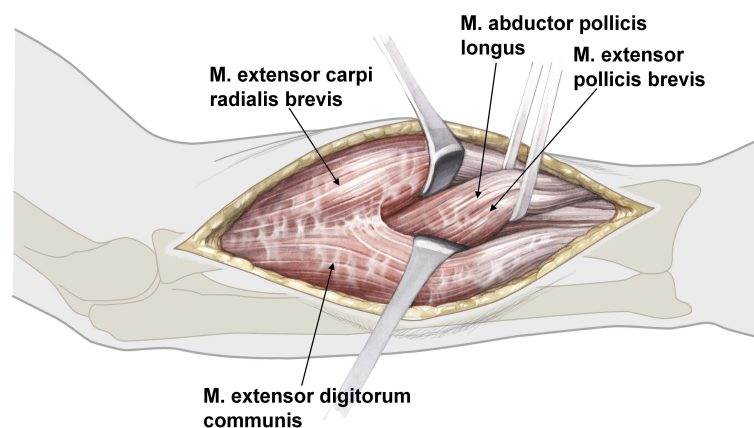


Abbildung 2.12: Offener Zugang Radius: Der Musculus abductor pollicis longus und Musculus extensor pollicis brevis werden angeschlungen und können so besser je nach Gebrauch nach distal oder proximal verzogen werden. Modifiziert, aus Weinberg et al. (2006)

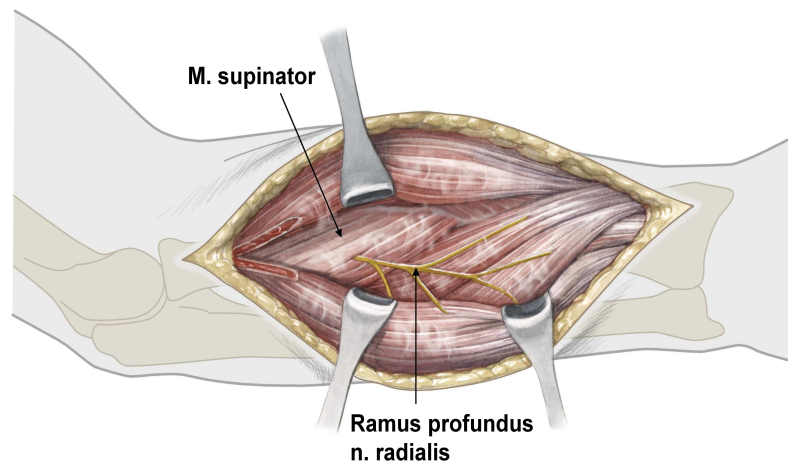


Abbildung 2.13: Offener Zugang Radius: In der Tiefe liegt der Musculus supinator, durch welchen der Ramus profundus des Nervus radialis läuft und der unbedingt geschont werden muss. Aus Weinberg et al. (2006)

Wird die Faszie weiter proximal gespalten, trifft man in der Tiefe auf den Musculus supinator (Abbildung 2.13).

Im Muskel geschützt liegt ein weiterer Ast des Nervus radialis, der Nervus interosseus posterior. Wählt man bei proximalen Radiuschaftfrakturen den dorsalen Zugangsweg, muss der Nervus radialis aufgesucht werden, indem man mit einem Finger die Muskeln Musculus extensor digitorum communis und Musculus extensor carpi radialis brevis voneinander trennt. Jetzt kann man das Radiusköpfchen palpieren und drei Querfinger unterhalb ertastet man den Nervus radialis, welcher quer zur Muskelfaserrichtung des Musculus supinator läuft (Abbildung 2.14).

Um die Ulna offen reponieren zu können, wird eine Inzision auf einer Linie zwischen Olecranon und Processus styloideus durchgeführt (Abbildung 2.15). Danach erfolgt die Spaltung des Musculus extensor und flexor carpi ulnaris und das Vordringen bis zum Knochen zwischen diesen. Dabei muss distal auf den Nervus dorsalis manus nervi ulnaris geachtet werden. Im proximalen Drittel muss unter Umständen der Musculus anconaeus von der Ulna abgelöst werden. Wurde die Fraktur reponiert und die Marknägel eingebracht, erfolgt ein schichtweiser Wundverschluss, wobei die Haut resorbierbar intrakutan verschlossen wird. Am Ende wird die Wunde mittels Steristrips abgedeckt (Weinberg et al., 2006; Schmittenbecher, 2005; Lascombes et al., 2006; Fernandez et al., 2005; Pugh, 2000; Schmittenbecher, 1995; Ligier et al., 1985; Weckbach et al., 2006).

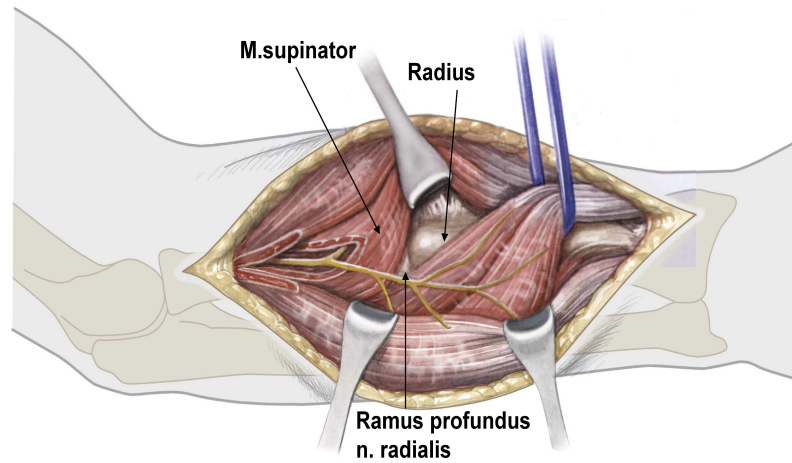


Abbildung 2.14: Offener Zugang zum Radius: Um eine sichere Schonung dieses Nervs zu gewährleisten, sollte der Musculus supinator gespalten werden. Aus Weinberg et al. (2006)

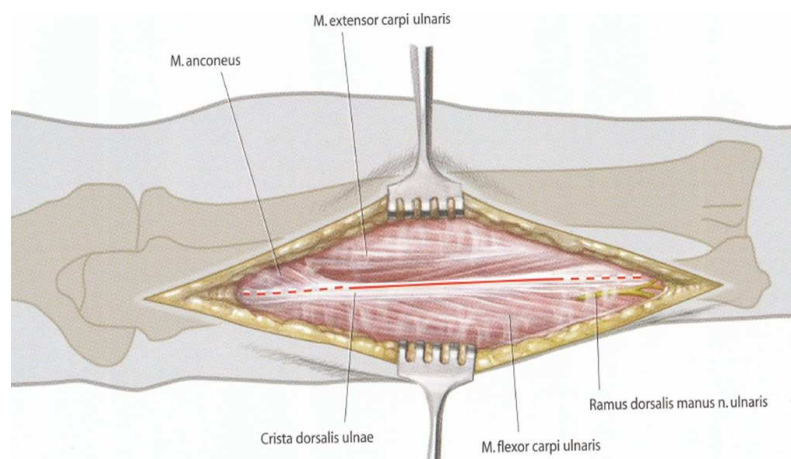


Abbildung 2.15: Offener Zugang zur Ulna: Hautschnitt erfolgt zwischen Olecranon und Processus styloideus. Aus Weinberg et al. (2006)

Komplikationen

Eigentlich stellt die intramedulläre Marknagelung ein geschlossenes Verfahren dar. Wie zuvor erwähnt, gibt es jedoch immer wieder Situationen, in denen sich intraoperativ herausstellt, dass eine offene Reposition von Nöten ist. Gerade bei der Versorgung von Refrakturen tritt häufig ein geblockter Markraum auf. Dies hat zur Folge, dass die Fraktur offen reponiert werden muss und der Markraum mittels Bohrer aufgebohrt werden muss. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass mittels einem spitzen Bohrdrachts versucht wird, den Kanal aufzubohren, sodass die Implantate ohne einer offenen Reposition in das distale Frakturfragment vorgeschoben werden können. Schmittenebecher (2005) schlägt in Situationen mit eingegengtem Markraum bei Refrakturen vor, dünnere Nägel zu verwenden. Davon ist jedoch abzuraten, da Komplikationen auf technische Fehler wie z. B. zu dünne Nägel oder falsche Lage der Nägel zueinander zurückzuführen sind (Lascombes et al., 2006). Zudem erhöht die Verwendung von zu dünnen Nägeln die Rate der Refrakturen bei liegenden Marknägeln (Abbildung 2.16).

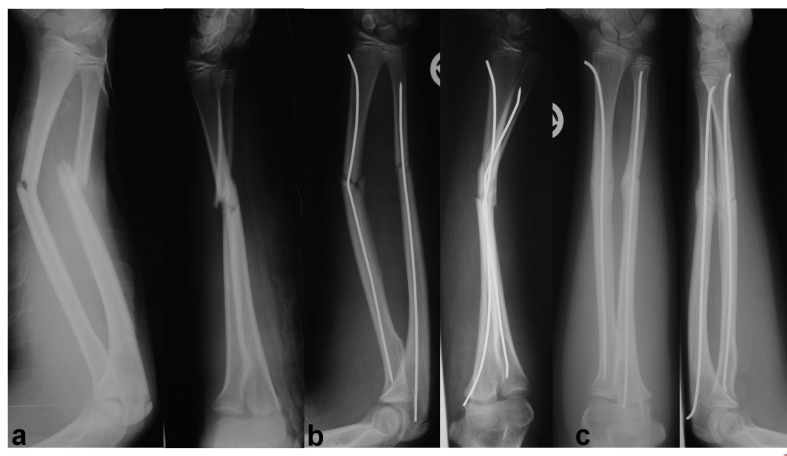


Abbildung 2.16: Refrakturen bei zu dünnen Implantaten: a Das Unfallbild eines 13-jährigen Buben zeigt eine dislozierte komplette Unterarmschaftfraktur nach Verletzung beim Fußballspielen, b Refrakturen: Nachdem es initial nicht möglich war, die Fraktur mittels 2.5 mm Titannägeln zu versorgen, wurde die Fraktur mittels 1.6 mm Bohrdrähten versorgt. Nach einer Woche kam es zur Refrakturen, c ambulantes Kontrollbild: Die Bohrdrähte wurden entfernt und durch 2 mm elastisch stabile Marknägeln ersetzt. Eine gute Kallusbildung ist zu erkennen.

Weitere Komplikationen und deren Therapiemöglichkeiten sind im folgenden angeführt ((Lascombes et al., 2006), Pugh2000, Schmittenbecher2001):

- Nagelperforation: Inzision über der alten Narbe und Kürzung des Nagels. Bei ausgeheilter Fraktur frühzeitige Implantatentfernung erwägen, dann muss eine Aufklärung der Eltern über mögliche Refrakturen, insbesondere bei geschienten nicht vollständig durchgebrochenen Grünholzfrakturen erfolgen;
- Sehnenruptur des Musculus pollicis longus: Naht der Sehne bzw. bei fehlender Möglichkeit der Naht aufgrund aufgefaselter Enden sollte eine Ersatzplastik mit der Sehne des Musculus extensor durchgeführt werden;
- Einschränkung der Umwendbewegung: bei Blockierungen möglichst frühe Korrekturoperation anstreben, da sich diese nicht mehr korrigieren.

2.3 Ergebnisse

In dieser Studie wurde die operative Therapie mittels elastisch stabiler Marknagelung bei Refrakturen am diaphysären Unterarm an 21 Patienten (6 Mädchen und 15 Burschen) untersucht. In den meisten Fällen handelte sich sowohl bei der primären, als auch bei der Refrakturursache um einen Sturz auf den ausgestreckten Arm während sportlicher Aktivitäten oder beim Spielen zuhause.

Die Analyse von den 19 primären Frakturen am Unterarmschaft, in zwei Fällen waren die Unfallbilder nicht vorhanden, ergab, dass zumindest bei einem der beiden Unterarmknochen eine Grünholzfraktur vorlag. Von den untersuchten 21 Patienten wurde bei 18 (86%) die primäre Fraktur mittels Oberarmgips behandelt. Die durchschnittliche Ruhigstellung mittels Gips betrug fünf Wochen (4 bis 10 Wochen). Bei den restlichen drei Patienten wurde die Fraktur am Unterarmschaft mittels elastisch stabiler intramedullärer Marknagelung versorgt. Von diesen drei Patienten erlitten zwei eine Refraktur bei liegenden Nägeln (Abbildung 2.17), bei dem dritten Patienten wurden die Nägel nach 45 Tagen entfernt und der Patient brach sich 34 Tage nach Metallentfernung den Unterarm erneut.

Die Untersuchung der Refrakturen ergab folgende Ergebnisse: Die Refraktur ereignete sich im Mittel 90 Tagen (30 bis 174) nach primärer Fraktur. Das durchschnittliche Alter bei Refraktur war acht Jahre (2 bis 14 Jahre). In den Röntgenbildern der



Abbildung 2.17: Refraktur bei liegenden Implantaten: a Unfallbild: Vier Monate nach initialer Versorgung mittels ESMN stürzte ein sechs-jähriger Bube im Kindergarten erneut auf den ausgestreckten Arm und brach sich den Arm wiederholt. b Intraoperatives Röntgenbild: Die Fraktur wurde geschlossen reponiert, wobei der ulnare Nagel nachgeschlagen werden musste. Danach wurde die Stabilität überprüft. c Ausheilungsbild: Nach 9 1/2 Monaten wurden die Nägel entfernt

21 Patienten zeigten sich entweder eine isolierte Radius (n=5) oder komplette Radius und Ulna (n=16) Frakturen.

In 10% war das proximale, in 76% das mittlere und in 14% das distale (Übergang der Diaphyse in die Metaphyse) Schaftdrittel betroffen.

In elf Patienten (52%) wurde die Fraktur am Unfalltag mit ESMN stabilisiert, bei sieben Patienten (33%) erfolgte die operative Versorgung am darauf folgenden Tag. Bei den restlichen drei Patienten (14%) versuchte man die Fraktur primär mittels Oberarmgips zu behandeln, nach einer sekundären Dislokation sieben, zehn und 22 Tage nach Behandlung mussten diese jedoch ebenfalls mit intramedullären Nägeln versorgt werden. Alle 21 Patienten wurden mittels elastisch stabiler Marknagelung versorgt.

Eine genauere Betrachtung der operativen Osteosynthese mittels ESMN ergab (Tabelle 2.3), dass in 18 Fällen (86%) eine geschlossene und in drei Patienten (14%) eine offene Reposition nötig war. Bei neun Patienten (43%) bestand während der Operation ein geblockter Markraum. Von diesen neun Patienten musste nur in zwei Fällen (22%) eine offene Reposition durchgeführt werden.

Patient	Therapie 1	Intervall	Therapie 2	Markraum	Reposition
B.Z.	Gips	72	ESMN	-	geschl.
D.D.	Gips	45	ESMN	-	geschl.
P.G.	Gips	271	ESMN	-	geschl.
H.G.	Gips	138	ESMN	-	geschl.
C.M.	Gips	61	ESMN	-	geschl.
R.L.	Gips	75	ESMN	geblockt	offen
P.L.	Gips	140	ESMN	geblockt	offen
S.D.	Gips	58	ESMN	-	geschl.
W.M.	Gips	73	ESMN	-	geschl.
S.C.	ESMN 45 T.	79	ESMN	-	geschl.
K.M.	Gips	49	ESMN	geblockt	geschl.
P.F.	Gips	92	ESMN	geblockt	geschl.
H.M.	Gips	30	ESMN	-	geschl.
K.S	Gips	92	ESMN	geblockt	geschl.
A.E.	Gips	42	ESMN	geblockt	geschl.
Z.M.	ESMN	91	gerade biegen	-	geschl.
M.T.	Gips	174	ESMN	geblockt	geschl.
S.Chr.	ESMN	137	gerade biegen	-	geschl.
B.J	Gips	59	ESMN	geblockt	geschl.
S.S	Gips	61	ESMN	-	offen
K.M.	Gips	59	ESMN	geblockt	geschl.

Tabelle 2.3: Therapeutisches Vorgehen bei der primären Fraktur und der Refraktur. Bei allen primären Frakturen, außer bei den Patient S.C und A.E, bei denen aufgrund der fehlenden Unfallbilder die Fraktur nicht klassifiziert werden konnte, lag eine Grünholzfraktur vor. Weiters zeigt diese Tabelle, in welchen Fällen ein geblockter Markraum vorlag und welches Vorgehen dabei nötig war.

Bei diesen Patienten musste zur Fraktur offen zugegangen und die Markräume mittels Bohrer aufgebohrt werden, bevor es möglich war die Marknägel über den Frakturspalt zu schieben und die Fraktur zu stabilisieren. Bei einem Buben musste ein offenes Verfahren gewählt werden, obwohl keine Blockade des Markraums existierte. Bei den restlichen sieben Patienten (78%) mit geblocktem Markraum war es möglich, die Refraktur geschlossen zu reponieren: Bei drei (43%) von sieben Patienten konnte unter Zuhilfenahme eines Kirschner-Drahtes der geblockte Markraum eröffnet werden. In einem Fall (14%) wurde der Titannagel angespitzt, sodass der sklerosierte Markraum durch Rotieren eröffnet werden konnte. Bei einem Patienten (14%) gelang es, die Ulna zu stabilisieren, hingegen blieb der Versuch, den Radius zu stabilisieren, erfolglos. Da die Fraktur mit dem ulnar eingebrachten Nagel ausreichend stabilisiert werden konnte, wurde dem Patienten zusätzlich ein Gips angelegt und auf eine offene Reposition des Radius verzichtet. In zwei Fällen (29%) war es erst nach mehrmaligem Vorbohren mittels Ender- bzw. Titannägeln möglich, die Implantate in das distale Fragment einzubringen. (Abbildung 2.18).

Die Operation der Refraktur dauerte durchschnittlich 56 Minuten (3 bis 165 Minuten). Bei beiden Patienten, die sich die Refraktur bei liegenden Marknägeln zuzogen,



Abbildung 2.18: Refrakturmanagement: a Unfallbild: Ein 7-jähriges Mädchen brach sich zwei Monate nach Gipsentfernung den Arm erneut. b Intraoperatives Röntgenbild: Die Fraktur wurde mittels ESMN versorgt. Zu Beginn konnte ein geblockter Markraum festgestellt werden, der mittels Kirschner-Draht Vorbohrung aufgemacht werden konnte und so eine geschlossene Reposition möglich war. c Ausheilungsbild: Neun Monate nach Versorgung zeigte sich eine vollständig konsolidierte Fraktur bei regelrecht liegenden Marknägeln.

reichte es aus, die Fraktur geschlossen zu reponieren und die Nägel gerade zu biegen. Bei einem Patienten musste der ulnare Nagel zusätzlich nachgeschlagen werden.

Im Mittel waren die Patienten drei Tage stationär (2 bis 6 Tage). Die elastisch stabilen Marknägel wurden nach durchschnittlich sieben Monaten (4 bis 10 Monate (n=19)) entfernt. Zwei Patienten wurden dabei nicht berücksichtigt, da diese Touristen waren und nicht mehr nachkontrolliert werden konnten.

Bei keinem der 21 Patienten trat eine Wundheilungsstörung, Osteomyelitis oder Sehnenruptur des Musculus extensor pollicis longus auf. In vier Fällen (19%) trat eine vorübergehende Unterarmschwellung auf. Parästhesien im Bereich des Daumens (n=1) oder des zweiten und dritten Fingers (n=2) wurden in drei Fällen beobachtet. Bei allen Patienten bildete sich im Laufe des Follow-Ups die Sensibilitätsstörungen zurück. Bei einem Patienten (5%) musste eine Kürzung eines Nagels erfolgen, da dieser die Haut zu perforieren drohte.

Die Patienten (n=19) wurden im Durchschnitt zehn Monate (4 bis 51) nachkontrolliert. Bei den 19 Patienten endete das Follow-Up bei Erreichen der freien Unterarmumwendbewegung. Diese wurde in allen Fällen (100%) erreicht.

Zusätzlich wurden Fragebögen ausgesendet. Insgesamt wurden 13 Fragebögen (68%) an uns zurück gesendet. Die Analyse dieser (n=13) ergab, dass es bei keinem dieser Patienten zu einer Refraktur gekommen ist. Weiters wurden keine Schmerzen am refrakturierten Arm angegeben. Lediglich ein Patient gab Wetterfühligkeit an.

2.4 Diskussion

Der Unterarmschaft gehört zu den häufigsten Lokalisationen bei Unterarmfrakturen im Kindesalter. Die Inzidenz nimmt stetig zu, was mit der Zunahme an neuen „Rasanzsportarten“ zu begründen ist (Weinberg et al., 2006).

Das therapeutische Vorgehen bei Frakturen am Unterarmschaft hat sich in den letzten Jahren zunehmend zum operativen Management hin gerichtet, jedoch bestehen hier sehr starke regionäre Unterschiede. Gerade in den deutschsprachigen Ländern wird die operative Versorgung propagiert. Weinberg et al. (2001) zeigt in ihrer Studie, dass eine operative Therapie mittels ESMN bei Frakturen mit einer Achsabweichung von über 10° angezeigt ist, um Defizite in der Unterarmumwendbewegung als Spätkomplikation zu verhindern. Dies ist vor allem bei Verletzungen der Fall, die den interossären Raum einengen. Bei den 21 Patienten war eine operative Stabilisierung

mittels Marknagelung angezeigt, da bei allen eine Achsabweichung von mehr als 10° vorhanden war.

Vorlat und De Boeck (2003) wiesen in ihrer Studie daraufhin, dass Abweichungen bei Patienten älter als sechs Jahren in nicht akzeptablen Ergebnissen enden. Obwohl Funktionsdefizite gut durch die Schulter kompensiert werden können, ist es im Zeitalter des Computers von wichtiger Bedeutung, dass keine Einschränkungen, besonders die der Pronation, bestehen.

Neben der Möglichkeit einer sekundären Dislokation, ist das Auftreten einer Refraktur eine weitere wichtige Komplikation in der Behandlung von diaphysären Unterarmfrakturen. Ein erhöhtes Risiko für Refrakturen findet man vor allem bei Grünholzfrakturen. In dieser Studie wurden bei 19 von 21 Patienten die primären Frakturen als Grünholzfrakturen klassifiziert. Da Grünholzfrakturen immer mit Konsolidationsstörungen während der Heilung assoziiert sind und sich daraus ein erhöhtes Refrakturrisiko ergibt, werden die Nägel erst nach 6 bis 8 Monaten entfernt, um die Refrakturrate zu verringern.

Von den 21 untersuchten Patienten trat bei 18 Patienten (86%) eine Refraktur nach konservativer Behandlung auf. In drei Fällen (14%) trat die Refraktur nach operativer Behandlung auf. Bei einem dieser drei Patienten wurden die elastisch stabilen Marknägel nach 45 Tagen entfernt. Bei diesem Patienten wurden die intramedullären Nägel zu früh entfernt. Möglicherweise hätte ein Belassen der Marknägel von mindestens sechs Monaten diese Refraktur verhindern können.

Die Refraktur trat durchschnittlich 90 Tage (30 bis 174 Tage) nach der primären Fraktur auf. Einige Autoren schlagen eine 6-wöchige Gipsbehandlung vor, um das Refrakturrisiko zu senken. Die Daten zeigen jedoch, dass auch eine verlängerte Ruhigstellung mittels Gips keine Senkung der Refrakturrate bewirkt hätte, da nur zwei Refrakturen innerhalb der ersten sechs Wochen auftraten (Bould und Bannister, 1999).

In 95% war ein adäquater Reiz, ein Sturz auf den ausgestreckten Arm während dem Sport oder der Freizeit, vorhanden. In zwei Fällen kam es zu einer Refraktur bei liegenden Marknägeln. Diese geschahen während dem Sport. In beiden Fällen führte die gewählte Behandlungsmethode zu einem sehr guten Ergebnis. Keine funktionellen Einschränkungen waren als Spätfolgen zu sehen. Bei einem Patienten wurden die intramedullären Nägel zu früh entfernt. Möglicherweise hätte ein Belassen der Marknägel von mindestens sechs Monaten diese Refraktur verhindern können

Zusätzlich zeigte unsere Studie auf, dass bei Auftreten eines geblockten Markraums

nicht zwingend eine offene Reposition von Nöten ist. Durch Vorbohren mit einem Kirschnerdraht kann der geblockte Markraum geöffnet und den Patienten eine zusätzliche Narbe erspart werden. In allen, ausgenommen drei, Fällen mit geblocktem Markraum war eine geschlossene Reposition möglich. Schmittbecher (2005) empfiehlt bei eingegengtem Markraum nach Refraktur Nägeln mit kleinerem Durchmesser. Dieses Vorgehen stellt jedoch keine Alternative dar, da dann eine höhere Instabilität und ein erhöhtes Risiko einer Refraktur bei Sturz aufgrund der geringeren Biegesteifigkeit der Nägel besteht.

Die durchschnittliche Operationszeit bei unseren Patienten lag bei 56 Minuten. Vergleicht man diese Zeit mit der in der Literatur angegebenen Operationszeit von 67 Minuten, so ist zu sehen, dass bei versorgten Refrakturen mit keinem größeren Aufwand zu erwarten ist.

Diese Studie zeigte weiters, dass bei korrekter Durchführung und Beherrschung der Technik nur mit wenigen postoperativen Komplikationen zu rechnen ist. Bei nur zwei Patienten (9%) kam es zu geringfügigen Komplikationen wie Sensibilitätsstörungen im Daumenbereich (n=1, 50%) oder einer Nagelkürzung aufgrund drohender Hautperforation (n=1, 50%). Die Parästhesien sind als Folge des distalen Zugangs am lateralen Rand des Radius und einer iatrogenen Läsion des Ramus superficialis n. radialis anzusehen. Hingegen handelte es sich bei Sensibilitätsstörungen im Bereich des zweiten und dritten Fingers um Irritationen des N. medianus als Konsequenz der Fraktur bzw. Hämatomschwellung. Alle aufgetretenen Komplikationen führten zu keiner bleibenden Konsequenz.

Faßt man alle Ergebnisse dieser Studie zusammen, so ist für die Therapie von Refrakturen am kindlichen diaphysären Unterarm die elastisch stabile Marknagelung eine geeignete und effiziente Methode, die einige Vorteile aufweist: Zum einen ist für die Stabilisierung des Bruches keine erneute Ruhigstellung mittels Oberarmgips für weitere 3 bis 5 Wochen nötig und die Kinder können den Arm postoperativ sofort belasten, zum anderen sind keine Defizite in der Umwendbewegung des Unterarms und nur wenige geringfügige intra- und postoperative Komplikationen zu erwarten. Des weiteren führt die geschlossene Marknagelung im Vergleich zur Plattenosteosynthese zu einem besseren kosmetischen Ergebnis. Im Falle eines geblockten Markraums ist ein offenes Vorgehen nicht zwingend nötig, sodass durch Vorbohren des Markraums eine zusätzliche Narbe am Unterarm verhindert und damit ein gutes kosmetisches Ergebnis erzielt werden kann.

Kapitel 3

Zusammenfassung

Hintergrund: Die Refrakturen stellen bei Schaftfrakturen am kindlichen Unterarm eine häufige Komplikation dar. Die meisten Arbeiten beschäftigen sich mit der Versorgung der frischen Unterarmfraktur, der Behandlung von Refrakturen wird nur wenig Bedeutung beigemessen. Einige Autoren berichten über gute Ergebnisse nach konservativer Therapie. Die elastisch stabile Marknagelung stellt eine alternative Methode zur konservativen Behandlung mittels Gipsimmobilisation von Refrakturen am Unterarmschaft dar. Aufgrund der Möglichkeit eines geblockten Markraums nach einer erneuten Fraktur, ist bei operativem Vorgehen oftmals eine offene Reposition von Nöten. Das Ziel dieser Studie war es zu analysieren, ob die intramedulläre Marknagelung eine geeignete Methode für die Behandlung von Refrakturen am Unterarmschaft ist, in wievielen Fällen eine offene Reposition bei intramedullärer Marknagelung bei Refrakturen am diaphysären Unterarm nötig war und ob diese Rate mit speziellen Operationsmethoden verringert werden konnte. Zusätzlich bestand ein besonderes Interesse an den funktionellen Endergebnissen nach operativer Behandlung.

Methode: In dieser Studie wurden retrospektiv bei 21 Kindern mit diaphysären Refrakturen am Unterarm, die mit der intramedullären Marknagelung behandelt wurden, der operative Aufwand, die intra- und postoperativen Komplikationen und das funktionelle Endergebnis der Umwendbewegung untersucht.

Resultate: Bei 19 von 21 Patienten wurden die primären Frakturen als Grünholzfrakturen klassifiziert. Die Refraktur trat bei 18 Patienten (86%) nach konservativer, bei drei Patienten (14%) nach operativer Therapie auf. In den 18 konservativ behan-

delten Fällen wurde der Gips nach durchschnittlich fünf Wochen (4 bis 10 Wochen) entfernt. Von den drei Patienten, die initial operativ versorgt wurden, kam es bei zwei Kindern zu einer Refraktur bei liegenden Marknägeln, bei dem dritten Patient wurden die Nägel nach 45 Tagen entfernt und er brach sich danach erneut den Unterarm. Die Refraktur ereignete sich im Mittel 90 Tagen (30 bis 174) nach primärer Fraktur. In 18 Fällen (86%) war eine geschlossene Reposition und Marknagelung möglich. Bei drei Patienten (14%) musste ein offenes Vorgehen gewählt werden. Bei neun Patienten (43%) lag ein geschlossener Markraum vor. Von diesen mussten nur zwei Patienten (22%) offen reponiert werden. Bei keinem Patienten traten Komplikationen (Wundheilungsstörung, Osteomyelitis, Ruptur der Sehne des M.extensor pollicis longus) auf. Zu einer kurzzeitigen Schwellung kam es bei vier Patienten (18%), Parästhesien im ersten Interdigitalraum der Hand bei einem Patienten (5%). Bei keinem Patienten kam es zu Defiziten in der Unterarmumwendbewegung.

Lang-Zeit-Resultate: Es kam zu keiner Re-Refraktur. Ein Patient gab Wetterfähigkeit an. Bei keinem Patienten lag eine Funktionseinschränkung oder kosmetische Deformität vor.

Fazit: Die intramedulläre Marknagelung ist nicht nur eine sichere Methode zur Behandlung von Frakturen am Unterarmschaft in der Kindheit, sondern auch für Refrakturen am diaphysären Unterarm. In 78% kann unter Berücksichtigung von speziellen operativen Techniken eine geschlossene Reposition durchgeführt werden. Der durchschnittliche Aufwand unterscheidet sich kaum von der Versorgung frischer Frakturen mittels ESMN.

Literaturverzeichnis

- Birbeck, D.P., Failla, J.M. und Hoshaw, S.J., 1997. The interosseous membrane affects load distribution in the forearm. *Journal of Hand Surgery*, 22,(p).975-80.
- Blount, W.P., 1967. Forearm fractures in children. *Clinic Orthopaedic Related Research*, 51, (p).93-107.
- Bould, M. und Bannister, G.C., 1999. Refractures of the radius and ulna in children. *Injury*, 30, (p).583-86.
- Cochran Georg Van B., 1988. *Orthopädische Biomechanik*, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1988.
- Cullen, M.C., 2006. Complications of intramedullary fixation of pediatric forearm fractures. *Journal of Pediatric Orthopaedic*, 26(2), (p).188-92.
- Duchenne, G.B.A., Physiology of Motion, demonstrated by means of electrical stimulation and clinical observation and applied to the study of paralysis and deformities. Lippincott, Philadelphia, S.101-110.
- Dwight, T., 1884. The Movements of the Ulna in Rotation of the Forearm. *Journal of Anatomy and Physiology*, 19, (p).186-89.
- Fernandez, F.F. et al., 2005. Unstable diaphyseal fractures of both bones of the forearm in children: plate fixation versus intramedullary nailing. *Injury*, 36(10), (p).1210-16.
- Flynn, J.M. und Waters, P.M., 1996. Single-bone fixation of both-bone forearm fractures. *Journal of Pediatric Orthopaedic*, 16(5), (p).655-9.

- Friberg, K.S.J., 1979. Remodelling after distal forearm fractures in children. III. Correction of residual angulation in fractures of the radius. *Acta Orthop Scand*, 50, (p).741-49.
- Gruber, R. und Laer, v.L.R., 1979. The etiology of the refracture of the forearm in childhood. *Aktuelle Traumatologie*, 9, (p).251-59.
- Haasbeek, J.F. und Cole, W.G., 1995. Open fractures of the arm in children. *British Journal of Bone and Joint Surgery*, 77(4), (p).576-81
- Hahn M. P. et al.,1997. Pediatric forearm fractures. Diagnosis, therapy and possible complications, 100(10), (p).760-9.
- Heller, D.R., Routley, V., Chambers, S.J., 1996. Rollerblading injuries in young people. *Paediatr Child Health.*, 32(1), (p).35-8.
- Hertlein et al., 2000. Unstable forearm and femoral shaft fractures in children: Comparison between conservative treatment and intramedullary nailing. *Zentralbl Chir*, 125, (p).756-62.
- Hollister, A.M., Gellman, H. und Waters, R.L., 1994. The relationship of the interosseous membrane to the axis of rotation of the forearm. *Clinic Orthopaedic Research*, 398, (p).272-76.
- Huber, R.I., Keller, H.W., Huber, P.M. und Rehm, K.E., 1996. Flexible intramedullary nailing as fracture treatment in children. *Journal of Pediatric Orthopaedic*, 16(5), (p).602-5.
- Hunter, J.B., 2005. The principles of elastic stable intramedullary nailing in children. *Injury*,36 Suppl 1, (p).20-4.
- Kasten, P., Krefft, M., Hesselbach, J. und Weinberg, A.M., 2004. Kinematics of the ulna during pronation and supination in a cadaver study: implications for elbow arthroplasty. *Clinical Biomechanic*, 19(1), (p).31-5.
- Kapandji, A., 2001. Biomechanics of Pronation and Supination of the Forearm. *Hand Clinics*, 17(1), (p).111-22.

- Kihara, H. et al., 1995. The stabilizing mechanism of the distal radioulnar joint during pronation and supination. *American Journal of Hand Surgery*, 20(6), (p).930-6.
- Khosla et al., 2003. Incidence of childhood distal forearm fracture over 30 years: a population-based study. *JAMA*, 290(11), (p).1479-85.
- Laer, v.L.R., Kraus, R. und Linhart, W.E., 2007. *Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter*, 5. Auflage, Stuttgart: Thieme Verlag.
- Laer, v.L.R., 2001. *Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter*, 3.Auflage, Stuttgart: Thieme Verlag.
- Laer, v.L.R. und Hasler, C., 2000. Spontaneous corrections, growth disorders and post-traumatic deformities after fractures in the area of the forearm of the growing skeleton. *Handchir Mikrochir Plat chir*, 32, (p).231-41.
- Lascombes, P., et al., 1990. Elastic stable intramedullary nailing in forearm shaft fractures in children: 85 cases. *Journal of Pediatric Orthopaedic*, 10(2), (p).167-71.
- Lascombes P. et al., 2006. Use and abuse of flexible intramedullary nailing in children and adolescents, 2006. *Journal of Pediatric Orthopaedic*, 26(6), (p).827-34.
- LaStayo, P.C. und Lee, M.J., 2006. The Forearm Complex: Anatomy, Biomechanics and Clinical Considerations. *Journal of Hand Therapy*, 19, (p).137-45.
- Lecomte, O., 1874. Essais de physiologie mecanique du mouvement de rotation de la main. *Arch Gen Med*, 23, (p).129-49.
- Ligier, J.N., Metaizeau, J. P., Prévot J. und Lascombes, P., 1985. Elastic stable intramedullary pinning of long bone shaft fractures in children. *Z Kinderchir.*, 40(4), (p).209-12.
- Litton, L. und Adler, F., 1963. Refracture of the forearm in children: a frequent complication. *Journal of Trauma.*, 3, (p).41-51.

- Luhmann, S.J., Gordon, J.E. und Schoenecker, P.L., 1998. Intramedullary fixation of unstable both-bone forearm fractures in children. *Journal of Pediatric Orthopaedic*, 18(4), (p).451-56.
- McGinley., J.C., Roach, N., Gaughan, J.P. und Kozin, S.H., 2004. Forearm interosseous membrane imaging and anatomy. *Skeletal Radiology*, 33, (p).561-68.
- McGinley, J.C. und Kozin, S.H., 2001. Interosseous membrane anatomy and functional mechanics. *Clinical Orthopaedic Related Research*, 383, (p).108-22.
- McLean, C., Adlington, H. und Houshian, S., 2007. Paediatric forearm refractures with retained plates managed with flexible intramedullary nails. *Injury*, 38(8), (p).926-30.
- Mittal, R., Hafez, M.A. und Templeton, P.A., 2004. Failure of forearm intramedullary elastic nails. *Injury*, 35, (p).1319-21
- Nakamura, T., Yabe, Y. und Horiuchi, Y., 1999. In vivo MR studies of dynamic changes in the interosseous membrane of the forearm during rotation. *British Journal of Hand Surgery*, 24, (p).245-48.
- Nakamura, T., Yabe, Y. und Horiuchi, Y., 1996. Functional Anatomy of the Triangular Fibrocartilage Complex. *British Journal of Hand Surgery*, 21(5), (p).581-86
- Nakamura, T. at al., 2000. Normal kinematics of the interosseous membrane during forearm pronation-supination-a three-dimensional MRI study. *Journal of Hand Surgery*, 5(1), (p).1-10.
- Noonan, K.J. und Price, C.T., 1998. Forearm and distal radius fractures in children. *Journal of American Acad. Ortho. Surg.*, 6, (p).146-56.
- Pfeifer, M., Pollähne, W.,Begerow B. und Minne, H.W., 2004. Was den Knochen härter macht (ohne ihn umzubringen ...), Prävention der Osteoporose und Rehabilitation - von der Theorie zur Praxis. *Orthopädie und Rheuma*, 50,(p).53-55.
- Platzer, W., 1999. *Taschenatlas der Anatomie: Bewegungsapparat*. 7.Auflage, ,Thieme Verlag.

- Pugh, D.M. et al., 2000. Intramedullary Steinmann pin fixation of forearm fractures in children: Long-term results. *Clin. Orthop*, 376 , (p).39-48
- Rauber, A., und Kopsch, F., 1998. Anatomie des Menschen, Lehrbuch und Atlas, 2. Auflage, , Thieme.
- Ray, R.D., Johnson, R.J. und Jameson, R.M., 1951. Rotation of the forearm; an experimental study of pronation and supination. *American Journal of Bone Joint Surgery*, 33(4), (p).993-6
- Richter, D. et al.,1998. Elastic intramedullary nailing: a minimally invasive concept in the treatment of unstable forearm fractures in children. *Journal of Pediatric Orthopaedic*, 18(4), (p).457-61.
- Rockwood, C.A.Jr., Wilkins, K.E. und King, R.E.,1984.*Fractures in children.*, 3 Auflage,. Philadelphia: Lippincott.
- Rodriguez-Merchan, E.C., 2005. Pediatric fracture of the forearm. *Journal of Clinical Orthopaedics and Related Research*, 432, (p).65-72.
- Rosson, J.W. und Shearer J.R., 1991. Refracture after the removal of plates from the forearm. An avoidable complication.*J Bone Joint Surg Br.*, 73, (p).415-17.
- Schuind, F., Andrianne, Y. und Burny, F., 1991. Treatment of forearm fractures by Hoffman external fixation. A study of 93 patients.*Jouranal of Clinical Orthopaedic Related Research*, 266, (p).197-04.
- Schlickewei, W. und Oberle, M., 2005. Forearm fractures in children. *der Unfallchirurg*, 108(3), (p).223-32.
- Schlickewei, W. und Salm. R., 2001. Indications for intramedullary stabilization of shaft fractures in childhood. What is reliable, what is assumption?. *Deutsche Gesellschaft für Chirurgie (Kongressband)*, 118, (p).431-4.
- Schmittenebecher, P.P.,2005. State-of-the-art treatment of forearm shaft fractures.*Injury*, 36, (p).25-34.

- Schmittenebecher, P.P., 2001. Komplikationen und Fehler bei der Anwendung intramedullärer Stabilisierungsverfahren bei Schaftfrakturen im Kindesalter, *Deutsche Gesellschaft für Chirurgie (Kongressband)*, (p).435-37.
- Schmittenebecher, P.P., 1995. Standardindikationen zur intramedullären Osteosynthese im Wachstumsalter (Erfahrung bei 100 Patienten). *Akt. Chir.*, 30, (p).171-75.
- Schwarz, N. et al., 1996. Refracture of the forearm in children. *British Journal of Bone and Joint Surgery*, 78(5), (p).740-4.
- Seyffarth, G., 1966. Refracture of the child's forearm. *Monatsschrift für Unfallheilkunde, Versicherungs-, Versorgungs- und Verkehrsmedizin*, 1966, 69, (p).525-30.
- Skahan, J.R., Palmer, A.K., Werner, F.W. und Fortino, M.D., 1997. The interosseous membrane of the forearm: anatomy and function. *American Journal of Hand Surgery*, 22(6), (p).981-5.
- Sobotta interaktiv CD-ROM, 2000. Putz, R., Pabst, R., Urban & Fischer GmbH und Co, KGVersion 1.0.
- Stuart, P.R., Berger, R.A., Linscheid, R.L. und An, K.N., 2000. The dorsopalmar stability of the distal radioulnar joint. *American Journal of Hand Surgery*, 25(4), (p).689-99.
- Tillmann, B., 1978. Entwicklung und funktionelle Anatomie des Ellbogengelenkes. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 116, (p).392-00.
- Tynan, M.C. et al., 2000. The effects of ulnar axial malalignment on supination and pronation. *American Journal of Bone and Joint Surgery*, 82(12), (p).1726-31.
- Vorlat, P. und De Boeck, H., 2003. Bowing fractures of the forearm in children: a long-term followup. *Clin Orthop Relat Res.*, 413,(p).233-7.
- Waldeyer, A., 2003. *Anatomie des Menschen* 17. Auflage, New York: de Gruyter Verlag.

- Watanabe, H. et al., 2005. Contribution of the interosseous membrane to distal radioulnar joint constraint. *American Journal of Hand Surgery*, 30(6), (p).1164-71.
- Weinberg, A.M., Altermatt, S., Hell, A. und Reilmann, H., 2006. *Tscherne-Unfallchirurgie im Kindesalter*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer Verlag.
- Weinberg, A.M. et al., 2001. Die Pronation und Supination des Unterarms (Unter besonderer Berücksichtigung der Articulatio humeroulnaris). *Der Unfallchirurg*, 104(5), (p).404-09.
- Weinberg, A.-M. et al., 2001. Which Axial Deviation Results in Limitations of Pro- and Supination Following Diaphyseal Lower Arm Fracture in Childhood?. *European Journal of Trauma*, 27, (p).309-16.
- Weckbach, A., Blattert, T.R. und Weißer, Ch., 2006. Interlocking nailing of forearm fractures. *Journal of Orthopaedic Trauma and Surgery*, 126(5), (p).309-15.
- Wilkins, K.E., 2005. Principles of fracture remodeling in children. *Injury*, 36, (p).3-11.