

Aus dem Lehrstuhl für Chirurgie
Direktor: Prof. Dr. Hans J. Schlitt
der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

**Wachstumsstörungen nach distalen Radiusfrakturen im Kindesalter
– ein Vergleich zwischen konservativer Therapie und transepiphysärer K-Draht-
Osteosynthese**

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Laura Huber

2024

Aus dem Lehrstuhl für Chirurgie
Direktor: Prof. Dr. Hans J. Schlitt
der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

**Wachstumsstörungen nach distalen Radiusfrakturen im Kindesalter
– ein Vergleich zwischen konservativer Therapie und transepiphysärer K-Draht-
Osteosynthese**

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Laura Huber

2024

Dekan: Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Hans J. Schlitt

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Michael Melter

Tag der mündlichen Prüfung: 21.05.2024

Gliederung

1. Einleitung	5
1.1 Die distale Radiusfraktur im Kindesalter.....	5
1.2 Anatomie und Biomechanik des distalen Handgelenks.....	7
1.3 Grundlagen von Wachstum und Frakturheilung	8
1.3.1 Physiologisches Knochenwachstum.....	8
1.3.2 Frakturheilung	11
1.3.3 Wachstumsstörungen.....	14
1.3.3.1 Stimulative Wachstumsstörung	15
1.3.3.2 Hemmende Wachstumsstörung	15
1.3.3.3 Ausbildung von Knochenbrücken.....	17
1.4 Frakturklassifikation.....	19
1.4.1 Frakturklassifikation distaler Radius	19
1.4.2 Frakturklassifikation nach Salter und Harris.....	19
1.5 Behandlungsmöglichkeiten	21
1.5.1 Wahl der Therapie	21
1.5.2 Reposition	22
1.5.3 Konservative Therapie.....	23
1.5.4 Perkutane transepiphysäre bikortikale K-Draht-Osteosynthese	24
1.5.5 Weitere Therapieoptionen	26
1.6 Komplikationen.....	27
1.6.1 Allgemeine Komplikationen nach distalen Radiusfrakturen.....	27
1.6.2 Spezielle Komplikationen nach fugenkreuzender K-Draht-Osteosynthese.....	27
1.6.3 Wachstumsstörungen nach fugenkreuzender K-Draht-Osteosynthese	28
2. Fragestellung	30
3. Patienten und Methoden	31
3.1 Studiendesign.....	31
3.2 Ein- und Ausschlusskriterien	31
3.3 Patientenrekrutierung	33
3.4 Datenerfassung.....	33
3.5 Fragebogen.....	34
3.6 Klinische Untersuchung.....	35
3.7 Röntgenologische Messung der Ulnavarianz	37
3.8 Sonographische Messung der Ulnavarianz.....	38
3.9 Statistische Analyse	41

4. Ergebnisse	42
4.1 Allgemeines zum Follow-up.....	42
4.2 Patienten mit konservativer Therapie	43
4.2.1 Fragebogen	43
4.2.2 Klinische Untersuchung	47
4.2.3 Ulnavarianz – Vergleich der sonographischen und röntgenologischen Messung..	49
4.3 Patienten mit operativer Therapie	51
4.3.1 Fragebogen	51
4.3.2 Klinische Untersuchung	56
4.3.3 Ulnavarianz – Vergleich der sonographischen und röntgenologischen Messung..	57
5 Diskussion.....	60
5.1 Studiendesign.....	60
5.2 Vergleich der Ergebnisse der konservativen und operativen Patientengruppe sowie Einordnung in die Literatur	61
5.3 Wachstumsstörungen nach distalen Radiusfrakturen – eine Einordnung der Literatur	66
5.4 Stärken und Limitierungen	68
6 Zusammenfassung.....	72
7 Anhang	73
8 Literatur.....	74
9 Selbstständigkeitserklärung	82

1. Einleitung

1.1 Die distale Radiusfraktur im Kindesalter

Die Fraktur des distalen Radius stellt, je nach literarischer Quelle, mit bis zu 39 Prozent die häufigste Knochenverletzung im Kindes- und Jugendalter dar. Aus dieser Häufigkeit ergibt sich eine große Relevanz für die richtige Behandlung dieser Frakturen (1, 2). Die doppelt so hohe Inzidenz der knöchernen Verletzung an den oberen im Vergleich zu den unteren Extremitäten erklärt sich durch die reflexartige Abstützung des Körpers mit den Händen bei einem Sturz (3). Den typischen Verletzungsmechanismus distaler Radiusfrakturen stellt die Hyperextensionsfraktur Typ Colles dar, bei dem es zum Sturz auf die dorsal flektierte Hand kommt (4).

Die Häufigkeiten für distale Radiusfrakturen schwanken je nach Literatur zwischen 19,4% und 39%. Dies kommt vermutlich durch die Abgrenzungsschwierigkeit der Metaphyse zum diaphysären Übergang sowie verschiedener Definitionen der Metaphyse zustande. In dieser Studie wird die Methode nach Hofmann von Kap-Herr genutzt, in welcher die Metaphyse als Quadrat über der Wachstumsfuge definiert wird. Die Kantenlänge entspricht dabei der Metaphysen-Breite des Radius (1).

Ferner zeigt die Literatur, dass die distale radiale Wachstumsfuge bei Verletzungen des kindlichen Skelettes am häufigsten betroffen ist (5). Grundsätzlich ist an den einzelnen Röhrenknochen die distale Metaphyse 7-mal häufiger verletzt als die proximale. Epiphysäre Frakturen finden sich distal sogar 14-mal häufiger (1).



Abbildung 1: Definition der Metaphyse durch ein Quadrat über der distalen Radiusfuge; aus Lieber 2014 – Wachstumsverhalten nach Frakturen des distalen Unterarms (6)

Allgemein zeigt sich in den letzten Jahren und Jahrzehnten ein Anstieg der Häufigkeit nicht nur von distalen Radiusfrakturen, sondern auch anderen Frakturlokalisationen. Dies lässt sich auf die Zunahme von Risikosportarten, verändertem Risikoverhalten und allgemeinem Aktivitätslevel, aber auch auf zunehmend adipöse Kinder sowie einen Verlust an Geschicklichkeit zurückführen (7). Des Weiteren lässt sich die erhöhte Anzahl an Frakturen im Kindesalter im Vergleich zum Erwachsenen durch die geringere Stabilität des kindlichen Knochens und die weniger ausgeprägte Fähigkeit, Risiken richtig einzuschätzen, erklären (8).

Die nötige Energie für einen Knochenbruch ist beim Kind durch den weicheren Knochen geringer und begleitende Weichteilverletzungen dadurch weniger stark ausgeprägt als bei Erwachsenen. Durch die dicke Periost beim kindlichen Knochen, welches durch die osteogene Potenz zur Stabilität nach Fraktur und zu einer erleichterten Reposition beiträgt, ist ein schnellerer Verlauf der Frakturheilung möglich (9). Im Gegensatz zu Erwachsenen ist die Frakturmorphologie durch die hohe Biegebelastbarkeit des Knochens und die Gelenkprotektion durch die Wachstumsfuge verhältnismäßig einheitlich (10). Die Wachstumsfugen „sind in Relation zum umgebenden Knochen Orte verminderter Stresstabilität mit hoher Anfälligkeit für Frakturen“ (9). Beim noch wachsenden Skelett verlaufen die Frakturen deshalb häufig in der Wachstumsfuge, da diese etwa zwei bis fünf Mal schwächer als das umgebende Gewebe ist (11). Durch das Nachgeben der Fuge wird das angrenzende Gelenk geschützt. Dieser Umstand erklärt das Verhältnis von etwa 1:50 zwischen intra- und extraartikulären Verletzungen (12).

Bei Adoleszenten sind die Knochen und besonders die Bereiche nahe der Wachstumsfugen während des pubertären Wachstumsschubs fragiler sind als sonst, da der Knochen schneller in der Länge wächst, als er mineralisiert wird und es somit zu einer Auflockerung der Fuge kommt (11,13). Es steht also weniger stabilisierendes Material zur Verfügung, was sich in einer mechanischen Schwäche der Wachstumsfuge und in ansteigenden Zahlen an Frakturen während des präpubertären Wachstumsschubs zeigt (14).

1.2 Anatomie und Biomechanik des distalen Handgelenks

Das distale Handgelenk hat einen proximalen und einen distalen Anteil. Proximal wird es durch die radiocarpale Gelenkfläche, das distale Radioulnargelenk (DRUG) und den triangulären Faserknorpel (TFC) gebildet. Distal ist es durch die erste Reihe der Handwurzelknochen, die untereinander mittels Bandstrukturen fixiert sind, definiert. Die Stabilität im Handgelenk wird durch die Gelenkkapsel und zu einem großen Teil durch die dorsalen und palmaren Bänder erreicht (15).

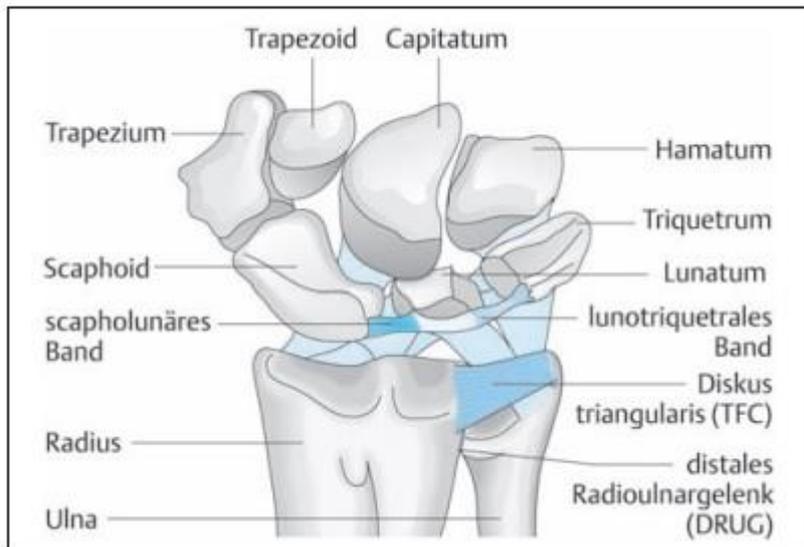


Abbildung 2: Darstellung des distalen Handgelenks, distalem Radius, distaler Ulna und Handwurzelknochen; aus Frank et al. 2003 – Funktionelle Anatomie und Biomechanik des Handgelenks (15)

Biomechanisch sollte der distale Radius nicht isoliert, sondern als Funktionseinheit des Handgelenks betrachtet werden. Dies ist wichtig für den täglichen Gebrauch: eine Kombination aus grober Kraft, Feinmotorik und hoher Mobilität (4).

Ein in diesem Zusammenhang relevanter Begriff ist die Ulnavarianz: Bereits 1928 beschreibt Hultén die Länge der Unterarmknochen zueinander (16). Verglichen wird hierbei die Länge der distalen Ulna mit dem distalen Radius. Eine negative Ulnavarianz bedeutet einen im Vergleich zur Ulna längeren Radius, während man bei einer längeren Ulna von positiver Ulnavarianz spricht. In der Bevölkerung liegt die mediane Ulnavarianz bei -0,8mm, mit einem 95%-Konfidenzintervall von -4,5mm bis +2,3mm (17). Die unterschiedlichen Werte der Ulnavarianz können also im Rahmen der Normalverteilung normale Werte sein und sind nicht gleichzusetzen mit einer Wachstumsstörung. Weicht dieser Wert jedoch stark von der Norm ab oder verändert er sich nach einer distalen radialen Fraktur, so kann dies die Folge einer

Wachstumsstörung des distalen Radius bei fortgesetztem Wachstum der Ulna sein. Folge davon kann eine Inkongruenz der Gelenkflächen des distalen Radioulnargelenks und ein ulnokarpales Impingement sein. Bei einer positiven Ulnavarianz von 2mm kann die Umwendbewegung des Unterarms bereits um 20% eingeschränkt sein, bei 4mm sogar bis zu 50% (4). Zudem kann die konsekutive Radialdeviation ebenfalls zu einer Einschränkung der Handgelenks- und Unterarmbewegung führen (7). Und auch die zunehmende Spannung im TFCC (triangulärer fibrokartilaginärer Komplex) und in der Membrana interossea schränken die Pro- und Supination zusätzlich ein. Neben der eingeschränkten Unterarmfunktion kann ein ulnokarpales Impingement oder eine Schädigung des Discus triangularis und des triangulären Faserknorpels entstehen, was einen Kraftverlust und Bewegungseinschränkungen zur Folge haben kann (4).

Allgemein betrachtet, werden bei einer Ulnavarianz von 0mm 82% der auf das gesamte Handgelenk wirkenden Kräfte auf das Radiokarpalgelenk übertragen. Dabei werden genauer betrachtet zwei Gelenkflächen unterschieden. Die Lunatum-Facette, welche 40% der radialen Kraftübertragung übernimmt, und die Scaphoid-Facette mit 60%. Deshalb ist der Gelenkdruck zwischen distalem Radius und Os scaphoideum größer. In Neutral-Null-Stellung des Unterarms werden nur etwa 18% der Kraft, welche auf die Hand wirkt, auf die Ulna übertragen. Bei Pronation, Ulnadeviation und verkürztem Radius ist diese Krafteinwirkung vergrößert (18). Palmer und Werner konnten zeigen, dass eine radiale Verkürzung von 2,5mm ausreicht, um die ulnare Krafteinwirkung von 18% bei 0mm Ulnavarianz auf 42% zu erhöhen (19, 20). Eine positive Ulnavarianz kann somit einerseits zu Einschränkungen der Mobilität, andererseits durch veränderte Druckverteilung im Handgelenk zu einer schmerzhaften Überbelastung der distalen Ulna führen (4).

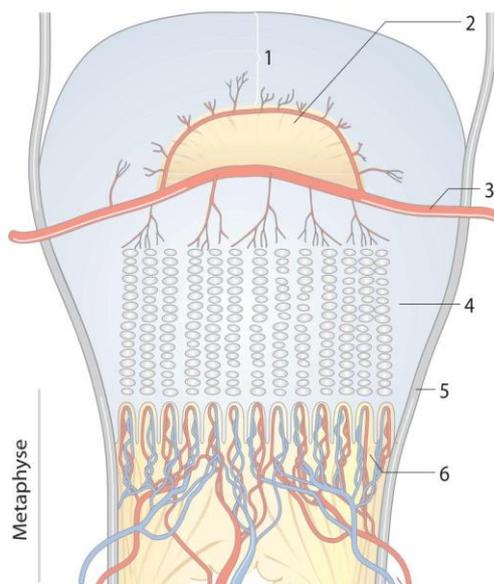
1.3 Grundlagen von Wachstum und Frakturheilung

1.3.1 Physiologisches Knochenwachstum

Zum Zeitpunkt der Geburt bestehen alle Enden langer Röhrenknochen folgend der chondralen Ossifikation aus Knorpel, die sogenannte Chondroepiphyse. Zu einem für die jeweiligen Knochen charakteristischen Zeitpunkt formt sich das sekundäre Ossifikationszentrum, welches während des Reifens der Fuge expandiert und der Kontur der Chondroepiphyse folgt. Dieses bildet sich am distalen Radius in den

ersten eineinhalb Lebensjahren, in der distalen Ulna erst ab dem vierten Lebensjahr (21). Zunächst finden sich keine histologischen Unterschiede zwischen den Zellen der Gelenkoberfläche und dem Rest des Epiphysenknorpels. Erst ab einem bestimmten Zeitpunkt stabilisieren sich die Zellen an der Gelenkoberfläche und differenzieren sich vom restlichen Knorpel. Die epiphysäre Oberfläche besteht danach entweder aus Gelenkknorpel oder Perichondrium an der restlichen Fläche (22).

Alle Wachstumsfugen haben von epiphysär nach metaphysär den gleichen Aufbau: Reservezone, Proliferationszone mit Säulenknorpel, hypertrophe Zone des Blasenknorpels und Eröffnungszone bzw. Verknöcherungszone. Die Reservezone, auch Ruhezone genannt, liegt an der epiphysären Seite und beinhaltet kleine, runde Zellen, die zu Verbänden von zwei oder drei Zellen hyalinen Knorpels gruppiert sind. Diese sind den Stammzellen ähnlich und für die Bereitstellung neuer Chondrozyten verantwortlich. In der folgenden proliferativen Zone durchlaufen die Chondrozyten die Mitose und organisieren sich in der Mineralisationszone zu parallel der Längsachse des Knochens verlaufenden Knorpelsäulen. Während sie diese Zonen durchlaufen, vergrößern sie durch Reifung ihr Volumen in der hypertrophen Zone um das Fünf- bis Zehnfache auf Kosten der Grundsubstanz. Die Interzellulärsubstanz wird so minimiert und es werden Hydroxylapatitkristalle ausgebildet, die den Knorpel kalzifizieren (23).



1. *hyaliner Gelenkknorpel*
2. *zentrales Ossifikationszentrum (Knochenkern)*
3. *epiphysäre Blutversorgung*
4. *Knorpelzellsäulen (Ruhezone)*
5. *ballonierte Knorpelsäulen (Mineralisationszone)*
6. *metaphysäre Fugengefäße*

Abbildung 3: Schematische Darstellung der epiphysär-metaphysären Wachstumsregion eines langen Röhrenknochens; aus Matussek 2013 - Kindertraumatologie (9)

Die darauffolgende Eröffnungszone hat ihren Namen durch das Eröffnen der kalzifizierten Knorpelhöhlen durch die Chondroklasten. In diese Höhlen wachsen Kapillaren und Osteoblasten ein, welche Osteoid produzieren und später durch Lamellenknochen ersetzt werden. Die Ernährung der Fuge wird durch die drei kommunizierenden Systeme periostaler, epiphysärer und metaphysärer Gefäße sichergestellt (24). Während in der spätfetalen und frühen postnatalen Phase noch Blutgefäße die Fuge kreuzen, ist dies später nicht mehr nachweisbar. Die epiphysären Gefäße durchdringen die Epiphyse und ernähren mit ihren Ästen die Ruhe-, Proliferations- und Säulenknorpelzone und sind so für das longitudinale Wachstum verantwortlich. Auf der metaphysären Seite penetrieren Arterien das Periost und die Bereiche zwischen den absterbenden hypertrophen Blasenknorpelzellen. Die Gefäße versorgen die primäre metaphysäre Spongiosa und beeinflussen das Wachstum somit indirekt. Die periostalen Gefäße dienen der Ernährung der sogenannten Ranvier-Zone (14).

Der periphere Rand der Epiphysenfuge beinhaltet zwei spezielle Bereiche, die wichtig für mechanische Integrität und peripheres Wachstum sind. Die Ranvier-Zone liegt in der Peripherie der Fuge, enthält Fibroblasten, Chondroblasten und Osteoblasten und ist für das periphere Wachstum verantwortlich. Der perichondrale LaCroix-Ring ist eine knöcherne Struktur über der Ranvier-Zone und sorgt durch die Verbindung des metaphysären Periosts mit der knorpeligen Epiphyse für eine mechanische Stabilisierung (25).

Epiphysenfugen können grob in den „epiphysären Anteil mit Proliferationspotenz und den metaphysären Anteil ohne Proliferationspotenz“ eingeteilt werden (24). Diese Systeme sind während des eigentlichen Wachstums im Gleichgewicht. Gegen Ende der Wachstumsphase führen Einflüsse hormoneller und humoraler Art zu einer prämaturen Ruhephase mit einem kurzen Wachstumsstopp trotz noch vorhandenem Wachstumspotentials. Es folgt der Übergang in die genetisch determinierte tatsächliche Verschlussphase, in der die Proliferation abnimmt und die Mineralisation auf den epiphysären Teil der Fuge übergreift (24, 26). Die knöcherne Überbrückung der ehemaligen Wachstumsfuge beginnt entsprechend des essentiellen Bereichs der epiphysären Blutversorgung exzentrisch, wandert also von zentroradial und nur ein paar Monate später nach dorsoradial (23). Die individuelle Variation des Verschlusszeitpunktes ist groß (27).

An den langen Röhrenknochen tritt das Phänomen des exzentrischen Wachstums auf, was bedeutet, dass die Fugen nicht in gleichen Anteilen zum Längenwachstum beitragen. An den oberen Extremitäten findet das Wachstum vor allem am distalen Unterarm und am proximalen Humerus statt (24). Am Radius ist die distale Fuge für 80% des Wachstums, die proximale nur für 20% verantwortlich. So weisen Verletzungen des distalen Radius zwar ein großes Korrekturpotential auf, aber Verletzungen der Epiphysenfuge können fatale Wachstumsstörungen nach sich ziehen (24). Aus der Kombination der beiden Fugen ergibt sich für den Radius ein durchschnittliches Wachstum von etwa 7mm pro Jahr, davon sind circa 5,25mm der Wachstumsfuge des distalen Radius zuzuschreiben. Unterschiede ergeben sich zum Beispiel je nach Alter, Geschlecht und Perzentilen-Zugehörigkeit (25).

Die erste Phase verstärkten Wachstums liegt in der frühen Kindheit und ist später nur sehr schwer aufzuholen. Das durchschnittliche Wachstum liegt hier bei Werten von 25 Zentimetern Körperlänge im ersten Lebensjahr, und eine Verdopplung der Geburtslänge ist im Alter von drei bis vier Jahren erreicht (28). Im Alter von 7 Jahren erfolgt ein kleiner Wachstumsschub durch erhöhte Adrenalin-Sekretion (Adrenarche). Abgesehen davon bleibt das durchschnittliche Wachstum konstant bei 4 bis 7 Zentimetern pro Jahr. Der später folgende pubertäre Wachstumsschub dauert etwa sechs Jahre und beginnt bei Mädchen durchschnittlich zwei Jahre früher. Die Wachstumsrate ist erhöht, aber nicht konstant. Den Höhepunkt erreicht sie ein bis zwei Jahre nach den ersten Zeichen der Pubertät mit einem Wachstum von 8 bis 10 Zentimeter pro Jahr (28).

1.3.2 Frakturheilung

Bei der Heilung nach Knochenbrüchen kann zwischen primärer periostaler Heilung, also einer direkten intramembranösen Ossifikation durch Osteoblasten, und einer sekundären endochondralen Ossifikation mit Kallusbildung und dem Zwischenschritt einer kollagenen Schablone aus Chondroblasten unterschieden werden (29). Die bei metaphysären und diaphysären Frakturen stattfindende Heilung durch Kallusproduktion kann in drei Phasen eingeteilt werden: inflammatorische, reparierende und remodellierende Phase. Die zelluläre Antwort auf das Trauma beginnt mit der inflammatorischen Phase. Durch die Unterbrechung der Blutzufuhr wird die Blutgerinnungskaskade zur Eindämmung des Hämatoms aktiviert und durch Freisetzung von Wachstumshormonen, Zytokinen und Prostaglandinen wird der

Heilungsprozess des geschädigten Periosts, des Knochens und des Weichteilgewebes gestartet. Die eingewanderten Fibroblasten sorgen für das Abräumen des Zelldebris und für eine extrazelluläre Matrix, die die Formung neuen Knochens möglich macht. In der darauffolgenden reparierenden Phase bildet sich durch proliferierende osteogenetische Zellen vom Periost ein externer Kallus und zu geringem Anteil ein vom Endost ausgehender interner Kallus. Nach etwa zwei Wochen wird der Kallus als größer werdendes, osteogenetisches Gewebe radiographisch sichtbar. Durch zelluläre Organisation und mikrovaskuläre Invasion reift der noch sehr plastische und formbare neue Knochen und wird durch ausgereiften Lamellenknochen ersetzt. Der Frakturspalt wird durch quantitative Knochenneubildung aufgefüllt, wodurch auch die ursprüngliche biologische Funktion wiederhergestellt wird. Der Körper folgt so dem von Roux schon 1985 formuliertem Gesetz „mit einem Minimum an Knochensubstanz ein Maximum an Knochenfestigkeit und Belastbarkeit“ zu erzielen (26). Dieser Vorgang dauert zwei bis drei Monate. In der am längsten andauernden Phase der Remodellierung wird mechanisch überflüssiger Kallus resorbiert und die Trabeculae orientieren sich entlang der Stresslinien. Während der qualitativen Knochenneubildung werden die Hohlräume wieder mit Knochenmark aufgefüllt. Der Knochen eines Kindes passt sich den sich kontinuierlich ändernden Belastungen viel besser an, als es der statische Knochen eines Erwachsenen schafft (22). Der Begriff Remodeling beschreibt „die schrittweise Korrektur von Ausrichtung und Gestalt des frakturierten Knochens zurück zur ursprünglichen Form“ und ist eine Besonderheit kindlicher Frakturen (9). Bei Kindern können aufgrund dieses Remodeling-Potentials Dislokationen bis zu bestimmten altersentsprechenden Korrekturgrenzen toleriert werden. Diese sind vom Alter und der Reife des Kindes, der Frakturlokalisation, der Wachstumspotenz der angrenzenden Fugen und der dazu gehörigen Bewegungsebene abhängig (29). Eine besonders schnelle Remodellierung erfolgt in der Nähe stark potenter Wachstumsfugen, zum Beispiel am distalen Radius, oder bei Achsdeformitäten entsprechend der Hauptbewegungsebene des angrenzenden Gelenks (9). Während Rotationsfehlstellungen nicht suffizient korrigiert werden können, könnten bei Kindern unter 10 Jahren eine Achsabweichung bis zu 40° in der Frontal- und Sagittalebene toleriert werden. Mit zunehmendem Alter minimieren sich die entsprechenden Korrekturgrenzen auf 20-30°. Auch Seit-zu-Seit-Abweichungen werden bis zu einem Viertel der Schaftbreite akzeptiert, da sonst vor allem im diaphysären Bereich eine

Einschränkung von Pro- und Supination folgen kann (26, 29). Die durchschnittliche Konsolidierungszeit am distalen Radius beträgt nur 3-4 Wochen, ist jedoch abhängig von Lokalisation und Art der Frakturfläche (24). Vor allem durch die mechanische Stabilisierung der Frakturen und die osteogene Potenz durch das dicke und pluripotente Periost kindlichen Knochens kommt es zum schnelleren Heilungsverlauf (4). Der zunächst druckschmerzhafte Fixationskallus wird durch zunehmende Mineralisation unempfindlicher. Ist er nicht mehr klopfempfindlich, entspricht dies einer klinischen Bewegungsstabilität und eine weitere Ruhigstellung ist überflüssig. Das radiologische entsprechende Zeichen ist eine periostale Kallusüberbrückung an drei Kortikalices (24).

Die Wachstumsfuge selbst und der hyaline Knorpel der Epiphyse heilen nicht durch die klassische Kallusproduktion, da sonst signifikante Wachstumsstörungen durch knöcherne Brücken zwischen sekundärem Ossifikationszentrum und Metaphyse resultieren können. Da sich die Wachstumsfuge selbst nur begrenzt reparieren kann, heilt die vorübergehend geweitete Fuge vor allem durch vermehrten endochondralen Knochen und Knorpel, sowie durch eine Reinvation der unterbrochenen metaphysären Gefäße. Je nach Schwere der Verletzung gibt es drei Typen der chondro-ossären Heilung. Bei einer Fraktur durch den Säulenknorpel wird die Fuge durch relativ schnelles Ansteigen der Zellzahl innerhalb der Säulen aufgefüllt. Dieser Heilungsprozess ist innerhalb von 4 Wochen abgeschlossen. Verläuft die Fraktur durch die Schicht zwischen Blasenknorpel und primärer Spongiosa wird dieser Bereich nach dem Auffüllen mit hämorrhagischem und fibroblastischem Gewebe zu einem unorganisierten knorpeligen Gewebe, ähnlich der knöchernen Kallusbildung. Die metaphysäre Neovaskularisation beginnt nach der Reifung und Kalzifizierung des knorpeligen Fixationskallus und führt zu einem ungleichmäßigen Austausch mit Knochen. Die zuvor geweitete Epiphysenfuge nimmt nach etwa sechs Wochen durch die Verdrängung mit primärer Spongiosa wieder ein normales Ausmaß an. Falls die Fraktur sich auf alle Schichten der Fuge ausdehnt, wird die Lücke zwischen den physealen Komponenten zwar auch fibrös aufgefüllt, an der metaphysären Spongiosa oder dem epiphysealen Ossifikationszentrum findet jedoch eine knöcherne Kallusbildung statt. Durch die schlechte Vaskularisierung kann es zu einer verspäteten Bildung einer Knochenbrücke kommen. So werden Unregelmäßigkeiten nur unvollkommen bindegewebig oder durch Faserknorpel aufgefüllt. Risikofaktoren hierfür sind eine größere Lücke, welche mit fibrösem Gewebe aufgefüllt werden

muss, und der Zeitpunkt der Fraktur weit vor der Ausreifung des Skeletts. Dies zeigt die Wichtigkeit einer anatomischen Reposition bei epiphysären Frakturen, da durch den geringeren Frakturspalt die Devaskularisierung in Grenzen gehalten und so das Risiko für eine Knochenbrückenbildung minimiert wird (26, 29).

1.3.3 Wachstumsstörungen

Allgemein betrachtet kann man stimulative von hemmenden Wachstumsstörungen abgrenzen. Bei stimulativen Wachstumsstörungen kommt es zu einer wachstumsbeziehungsweise fugenfördernden Wirkung, während bei hemmenden Störungen durch eine Verletzung der Wachstumsfuge das Wachstum eingebremst oder durch frühzeitigen Fugenschluss gänzlich gehemmt wird. Neben geringen, klinisch nicht relevanten posttraumatischen Längendifferenzen, können sich so, in Folge eines Traumas oder durch iatrogen verursachte Schäden, aber auch Wachstumsstörungen mit vorzeitigem Fugenschluss und einer entsprechenden Deformität des Handgelenks entwickeln (30). Diese Wachstumsstörungen sind an den unteren Extremitäten aufgrund der konsekutiven Längendifferenz der Beine mit Beckenschiefstand recht ausführlich untersucht (26, 31). Bei paarigen Knochen, wie Radius und Ulna, verursacht eine Wachstumsstörung des einen Knochens auch eine progressive Deformität des anderen Knochens und des naheliegenden Gelenks (5). Bei Frakturen in den verschiedenen Wachstumsphasen im Kindesalter, von denen drei unterschieden werden, wird im Falle einer stimulativen Wachstumsstörung die alterstypische Funktion der Fuge stimuliert. Vor dem 10. Lebensjahr findet das normale Wachstum statt. Fällt der Frakturzeitpunkt in die eigentliche Wachstumsphase, wird mit einem Mehrwachstum gerechnet (32). Es folgt eine kurze Ruhephase mit noch vorhandenem Wachstumspotential. Dieser kurzzeitige Wachstumsstopp wird vor allem durch hormonelle Veränderungen beeinflusst. Durch dieses kleine Wachstumspotential kommt es bei einer Fraktur während der Ruhephase zunächst zu initialem Mehrwachstum, danach aber zu einem vorgezogenen, schnelleren Fugenschluss. Dies kann in einer Ausheilung ohne Längenveränderung resultieren (24). Beim physiologischen Fugenschluss sorgt die eigentliche Verschlussphase anschließend für eine Abnahme der Proliferationspotenz und Zunahme der Mineralisation. Eine Fraktur in dieser Phase führt also zu einer Verkürzung (24).

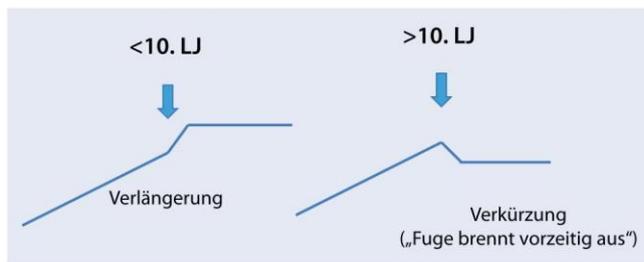


Abbildung 4: Wachstumsstörungen in Abhängigkeit von Frakturalter; aus Laer 2014 – Wachstumsverhalten nach Fugenverletzungen: Bedeutung von „wasserdichten“ Osteosynthesen (32)

1.3.3.1 Stimulative Wachstumsstörung

Die obligate stimulative Wachstumsstörung nach Frakturen hat meist keine klinische Relevanz. Besonders zeigt sich dies nach mehrmaligen Frakturen oder Repositionen durch überschießendes Wachstum. Bei isolierten Radiusfrakturen resultiert ein geringes Mehrwachstum im Vergleich zum Partnerknochen Ulna, welches jedoch durch die schnelle Heilungszeit nur minimal ist und bis zum Fugenschluss auf ein unbedeutendes Maß korrigiert wird (4, 6). Da es sich „bei stimulativen Wachstumsstörungen [...] um ein transientes Phänomen“ handelt, hält dieses nur so lange an, „wie die Reparaturmechanismen der Frakturheilung bestehen“ (10). Durch diese zeitlich enge Verknüpfung zur Fraktur hält es im Durchschnitt 18 Monate nach der Läsion an (33). Grundsätzlich kommt es zur Funktionssteigerung der umgebenden Fugen. Bei schonender Reposition ist durch den geringeren Remodelingaufwand ein geringeres Mehrwachstum zu erwarten (26). Denn je länger die Stimulationszeit durch Remodeling und Instabilität, desto ausgeprägter die Folgen (24). Überraschenderweise wird das Mehrwachstum der distalen Fuge durch Freisetzung potenter Mitogene häufiger bei Frakturen am proximalen und mittleren Drittel des Radius beobachtet, und nicht, wie zu erwarten, bei Frakturen nahe der hochpotenten distalen Fuge (26). Dies könnte durch Mikroverletzungen der Wachstumsfuge bei distalen Radiusfrakturen erklärbar sein, welche nur durch den fehlenden Wachstumsstimulus ersichtlich werden (34).

1.3.3.2 Hemmende Wachstumsstörung

Im Gegensatz zu stimulativen treten hemmende Wachstumsstörungen nur sehr selten, dann aber unbegrenzt bis zum Wachstumsabschluss auf. Die hohe Wachstumspotenz, erfolgversprechend im Remodeling, zeigt hier den Nachteil eines

größeren Fehlwachstums. Je höher das verbleibende Wachstum der geschädigten Fuge, desto größer ist die konsekutive Wachstumsstörung (24). In der Literatur finden sich sehr unterschiedliche Werte bezüglich der Häufigkeit hemmender Wachstumsstörungen. So werden Wahrscheinlichkeiten zwischen 0,15% und 28% berichtet, da teilweise alle Knochen oder nur der distale Radius, alle Frakturen oder teilweise nur epiphysäre Fugenverletzungen betrachtet werden (2, 6, 7, 14, 26, 35). Am häufigsten werden jedoch Davis, Green mit unter 1% und Lee, Esterhai mit 7% zitiert (36, 37). Eine Prognose ist weder durch die Art der Fraktur noch durch die Dislokation möglich; nur eine retrospektive Angabe von Wahrscheinlichkeiten (32). Die höchste Rate an hemmenden Wachstumsstörungen zeigen Salter und Harris Typ II Verletzungen, aber auch nicht-fugen-beteiligende Frakturen können sie verursachen (38, 39). Die schlechteste Prognose haben Wachstumsfugenläsionen nach Hochenergietraumata, sogenannte Crush-Verletzungen (40). Durch Mikroläsionen können so auch bei metaphysären, fugenschonenden Frakturen Wachstumsstörungen auftreten (39). Auch wiederholte Druckbelastung der Fuge, offene Frakturen, sowie multiple, traumatische oder verspätete Repositionsversuche dislozierter Frakturen mit Fugenbeteiligung und Einbringung osteosynthetischen Materials gelten als Risikofaktoren (4, 29, 41, 42). Die Gründe für Wachstumsstörungen sind durch die nur retrospektive Diagnostizierbarkeit noch nicht gänzlich geklärt. Vermutet werden neben Kompressionsverletzungen der physischen Reservezone auch eine epiphysäre Ischämie durch Trauma, Immobilisation oder iatrogene Schädigung (39, 43). Die temporäre oder permanente Unterbrechung der vaskulären Versorgung verhindert die Zellteilung in der knorpeligen Wachstumsfuge (22). Andere nicht traumatisch bedingte Wachstumsstörungen umfassen Infektionen, Tumoren, Zysten oder repetitiven Stress (25). Die Beeinträchtigung durch wiederholten Stress wird des Öfteren an den Handgelenken von Turnern beobachtet (44). Beschrieben wird dies auch durch das Heuter-Volkman-Prinzip: Kompression auf die Fuge beeinträchtigt das Wachstum, während Zug auf die Fuge das Wachstum anregt (45).

Im Idealfall wird der vorzeitige Fugenschluss früh genug erkannt, um die Konsequenzen des Fehlwachstums zu minimieren. Neben dem funktionalen Defizit und Schmerzen spielt auch die Kosmetik des Handgelenks bei Patienten und Eltern eine Rolle bei der Entscheidung für eine weitere Therapiemaßnahme (46). Trotz des seltenen Auftretens der Komplikation Wachstumsstörung ist die richtige Wahl des

therapeutischen Verfahrens notwendig, um Langzeitschäden zu vermeiden. Am distalen Radius entsteht durch partiellen oder kompletten frühzeitigen Wachstumsfugenschluss eine positive Ulnavarianz mit einem verkürzenden Achsfehler oder einer kompletten Verkürzung des Radius (47). Ziel der Therapie sollte daher nicht eine mit der Gegenseite übereinstimmende Gesamtlänge, sondern das richtige Verhältnis zwischen distalem Radius und Ulna sein (40).

1.3.3.3 Ausbildung von Knochenbrücken

Nach verschiedenen Schädigungen der Wachstumsfuge können sich kleine zentrale transphysäre Knochenbrücken bilden. Die Fuge kreuzende Verletzungen können durch Frakturen, repetitive Traumata oder iatrogen verursacht werden und zeigen als histopathologisches Korrelat die Ausbildung der Knochenbrücken (48). Die wahrscheinlichste Ursache für die zunächst nekrotischen, später ossären Brücken ist eine Ischämie eines Teils der Fuge und somit auch der Reservezone (49). Der zunächst von einem Hämatom ausgefüllte posttraumatische Defekt wird von undifferenziertem mesenchymalem Gewebe begleitet, welches allmählich eine spongiöse ossäre Brücke formt (14). Die physiologischen hydrostatischen Wachstumsschubkräfte können jedoch stark genug sein, diese begrenzte zentrale Überbrückung zu überwinden und normales Längenwachstum zu ermöglichen (44). Nach Aufbrechen der Brücke verbleibt diese an der Metaphyse und die knorpelige Wachstumsfuge nimmt wieder den vorher knöchern besetzten Bereich ein (50). Solch kleine Brücken verschwinden nach weiterem Wachstum, ohne ein histologisches Residuum zu hinterlassen (51). Dallek konnte im Großtierversuch die Ausbildung einer ossären Ausheilungsbrücke nach verursachtem Substanzdefekt der Epiphysenfuge zeigen. Jedoch finden sich Unterbrechungszonen der Brücke mit in Wachstumsrichtung angeordneten Kollagenfasern (48). „Der Frakturkallus wird durch den Wachstumsdruck des intakten Epiphysenfugenknorpels immer wieder auseinandergerissen; die hier stattfindende interne Kallusdistraktion verhindert ein Fehlwachstum“ (48). Zum Einschätzen der Relation der Kräfte zeigten Strobino et al. Druckkräfte von 3,1 kg pro cm² für die proximale Tibiaepiphyse des Kalbes (52). Laut Safran et al. sind mindestens 584 N pro cm² zum Überwinden ossärer Brücken nötig (53).

Die Knochenbrücke muss also eine adäquate Größe besitzen, um das Wachstum zu beeinträchtigen. Durch radiologische und histologische Analysen wird deutlich, dass

sich die aus Trabekeln bestehenden Knochenbrücken von der Metaphyse durch alle Zonen der Wachstumsfuge bis zu einem Herd fibrotischen und nekrotischen Gewebes innerhalb des Fugenknorpels ausdehnen (49). Sie dehnt sich jedoch nicht bis zum sekundären Ossifikationszentrum aus, verbindet also nicht zwei ossäre Regionen (49). Experimentelle Untersuchungen konnten zeigen, dass der Bereich der geschädigten Fuge ein signifikanter Faktor in der Ausbildung von Knochenbrücken ist (54). Füllt die Knochenbrücke nur 10% der Fuge aus, so kommt es nach Nordentoft zu keiner Störung des Wachstums. Peterson jedoch beschreibt gehemmtes Wachstum bereits bei einem Anteil von 5% (50). Nimmt die Brücke jedoch ein Fünftel des Umfangs der Wachstumsfuge ein, kann eine frühzeitige operative Fugensprengung zur Minimierung folgender Achsdeformitäten indiziert sein (26).

Eine periphere Brücke, welche in kurzer Zeit eine signifikante anguläre Deformität verursachen kann, bildet sich nach Schädigung der Ranvier-Zone. Die Angulation ist durch das ungehinderte Wachstum des unbeschädigten Teils der Fuge immer auf der Seite der Brücke. Bei zentralen Brücken mit intaktem perichondralem Ring ist das periphere Wachstum uneingeschränkt, während es zentral begrenzt ist. Es resultiert eine kuppelförmige Wachstumsfuge mit Verlangsamung des longitudinalen Wachstums. Auch eine kombinierte Form aus peripherer und zentraler Brücke ist möglich (14).

In Abbildung 5 ist der frühzeitige Fugenschluss nach einer Salter-Harris Typ II Fraktur des distalen Radius erkennbar.



a)

b)

Abbildung 5: Frühzeitiger Fugenschluss am linken distalen Radius nach Salter-Harris Typ II bei einem 13-Jährigen Mädchen. a) ap-Röntgenaufnahme mit zentralem Wachstumsfugenverschluss; neutrale Ulnarvarianz. b) MR-Arthrographie zur Bestätigung des großen zentralen Wachstumsfugenverschlusses mit normaler peripherer Wachstumsfuge (siehe Pfeile); aus Nguyen et al. 2017 – Imaging of Pediatric Growth Plate Disturbances (11)

1.4 Frakturklassifikation

1.4.1 Frakturklassifikation distaler Radius

Möchte man die Frakturen in weitere Subkategorien einteilen, so machen 40% der distalen Radiusfrakturen Stauchungsfrakturen aus, 30% Epiphysiolysen, 20% vollständige Frakturen und 10% Grünholzfrakturen (6).

Als typische Kontusion zeigen sich größtenteils metaphysäre Stauchungs- und Wulstfrakturen. Hierbei ist überwiegend nur eine Seite der Kortikalis eingestaucht und nicht unterbrochen. Da das kindliche dicke Periost weiter Halt gibt und meist kaum Achsabweichungen vorliegen, sind diese Stauchungsfrakturen zwar als schmerzhaft, aber stabile und harmlose Frakturen zu behandeln (13). Durch die dünnere metaphysäre Kortikalis und die trabekuläre Fenestrierung ist die Metaphyse poröser und komprimierbarer als die Diaphyse. Zudem werden sekundäre und tertiäre Osteome hier erst in späteren Stadien des Wachstums gebildet, wodurch an der Metaphyse sehr häufig Stauchungsfrakturen anstelle von kompletten metaphysären Frakturen auftreten (22).

Bei stärkerer Gewalteinwirkung ist auch eine komplette Fraktur des Radius möglich, oftmals auch in Kombination mit einer Verletzung der Ulna.

Davon abzugrenzen ist die Biegungsfraktur, eine für das Wachstumsalter spezifische Fraktur. Hierbei kann weiter zwischen der Bowing Fracture ohne jeglichen Frakturspalt und der typischen Grünholzfraktur mit konvexseitig durchgebrochener und konkavseitig angebrochener Kortikalis unterschieden werden (12, 55).

Die Klassifikation der Epiphysenfugenverletzungen wird im nachfolgenden Kapitel gesondert behandelt.

1.4.2 Frakturklassifikation nach Salter und Harris

Eine genaue Einordnung der Frakturen mit Epiphysenfugenbeteiligung erfolgt nach Frakturlokalisierung und morphologischen Gegebenheiten. Rückschlüsse auf die Therapieentscheidung und Wachstumsprognose können dadurch aber nur bedingt gezogen werden (12, 56). Die wichtigste Klassifikation stammt von Salter und Harris aus dem Jahr 1963. Sie unterscheidet fünf verschiedene Frakturtypen und wird im Folgenden näher dargelegt. „Sie berücksichtigt den Verletzungsmechanismus, die Frakturlinie bezogen auf die verschiedenen Zelltypen der Fuge“ (57). Nicht aufgenommen in die Salter und Harris-Klassifikation sind die zahlreichen

Übergangsfrakturen, welche je nach Lokalisation einen beachtlichen Teil der Gelenkverletzungen darstellen (32).

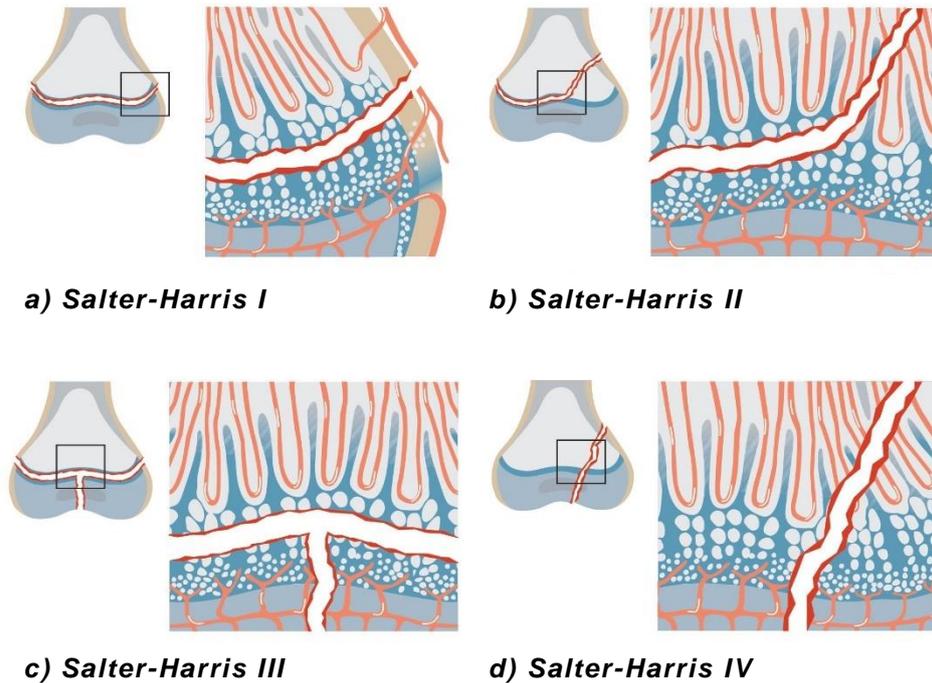


Abbildung 6: Salter-Harris I-IV; aus Mayr 2006 – Epiphysen und Apophysenverletzungen (57)

Bei einer Fraktur vom Typ Salter-Harris I kommt es durch Scher- und Torsionskräfte im Rahmen eines Traumas zu einer Epiphysiolyse: die Epiphyse separiert sich von der Metaphyse (58). Obwohl die Epiphyse einen Teil des Gelenks bildet, ist dieses beim Typ I nicht direkt betroffen. Dadurch ist die Epiphysenlösung „die am weitesten peripher liegende der metaphysären Schafffrakturen“ (12). Die Frakturlinie geht den Weg des geringsten Widerstandes durch die Zone des hypertrophen Knorpels, wodurch das Proliferationspotential meist verschont bleibt (14). In der hypertrophen Zone ist der Anteil an unstrukturierten Zellen am größten und die stützende knorpelige Matrix am geringsten (14, 25).

Die häufigsten Epiphysenverletzungen entsprechen Typ II, entsprechend des *loco typico* der Radiusfrakturen des Erwachsenen (58, 59). Bei überwiegender Biegungskomponente eines Traumas, also einer asymmetrischen longitudinalen Kompression, „wird an der Konkavseite aus der Metaphyse ein Knochenkeil herausgebrochen, der über die perichondrale, periostale Bindegewebsverankerung an der Metaphyse haftet“ (58). Dieses dreieckige, Thurston-Holland-Fragment genannte, Bruchstück und die erhaltene periostale Komponente sind bei der Reposition nützlich (57).

Bei Salter-Harris-Typ III frakturiert der Knochen durch die Wachstumsfuge und die Epiphyse. Durch die Lyse des Epiphysenfragmentes liegt es im intraartikulären Bereich. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer anatomischen Reposition entsprechend einer stufenfreien Gelenkfläche mit einer Dislokation unter zwei Millimetern. Die wiederhergestellte Kontinuität der Wachstumsfuge und der Gelenkfläche minimieren das Risiko einer daraus folgenden Präarthrose oder einer Wachstumsstörung, resultierend aus einer Schädigung der proliferativen Schicht durch eine fugenkreuzende Frakturlinie (57, 58).

Die intraartikuläre Fraktur bei Salter-Harris Typ IV durch vertikale Scherkräfte erstreckt sich von der Gelenkoberfläche durch die ganze Breite der Wachstumsfuge bis in die Metaphyse. Es entsteht eine komplette Diskontinuität der drei Komponenten Epiphyse, Wachstumsfuge und Metaphyse, was eine anatomische, meist offene Reposition mit stabiler, innerer Fixation erforderlich macht (60). Aufgrund der fugenkreuzenden Fraktur, welche alle Schichten der Fuge schädigt, kann es in seltenen Fällen, bedingt durch Spaltbildungen im geschädigten Wachstumsknorpel, zu sistierendem Wachstum kommen (58).

Die von Salter und Harris postulierte Typ V-Fraktur stellt eine Kompressionsverletzung dar, welche im initialen Röntgenbild keine knöcherne Läsion zeigt und erst später durch eine konsekutive Wachstumsstörung auffällig werden kann (57). Der genaue Mechanismus der Verletzung ist bislang unklar, jedoch handelt es sich wahrscheinlich um eine Kombination aus vaskulärem Trauma und zellulärem Kompressionstrauma der germinativen Schicht des Knorpels mit konsekutiven Knochennekrosen (25, 58).

1.5 Behandlungsmöglichkeiten

1.5.1 Wahl der Therapie

Zu den zunächst anzustrebenden Zielen jeder Frakturbehandlung unabhängig von der Art der Therapie gehören neben Schmerzlinderung, Stabilisierung und möglichst kurzer Funktionseinschränkung auch eine rasche Heilung mit geringem Aufwand und das Vermeiden verschiedener Komplikationen (61). Nach sonographischer Diagnostik oder Röntgen des Handgelenks in zwei Ebenen werden Stabilität und Dislokation der vorliegenden Fraktur beurteilt (62). Eine Reposition ist in der Regel bei stärker dislozierten Frakturen notwendig. Ist der Grad der Dislokation noch innerhalb der altersentsprechenden Korrekturgrenzen, so kann oftmals darauf

verzichtet werden. Die Behandlung erfolgt dann je nach Behandler und Alter des Kindes im Unter- oder Oberarmgips. Über das tolerierbare Maß hinaus dislozierte Frakturen werden zunächst in der Regel geschlossen reponiert und anschließend im Gips versorgt. Wird durch die reine Reposition keine Stabilität erreicht, muss eine operative Stabilisierung erfolgen. Sollte es zu einer sekundären Dislokation nach konservativer Therapie kommen, wird auch hier eine osteosynthetische Behandlung angestrebt (29). Die initial richtige Therapieentscheidung ist wichtig für die Minimierung nachfolgender Komplikationen (30). Nach der jeweiligen Therapie wird beim Kind durch Spielen schnell die volle Funktion wiederhergestellt und durch intuitive Reaktion auf Einschränkungen und Schmerzen bestimmt das Kind selbst, in welchem Umfang es den verletzten Arm einsetzt (61).

1.5.2 Reposition

Um den Patienten unnötige Eingriffe zu ersparen, müssen zunächst Repositionskriterien beachtet werden. Bei allen stabilen undislozierten Frakturen und stabilen Wulst- oder Grünholzfrakturen innerhalb der Toleranzgrenzen ist keine Reposition erforderlich. Reponiert werden muss folglich bei stabilen und instabilen Frakturen außerhalb der Korrekturgrenzen. So stellen sich bei jeder Fraktur die Fragen nach der Morphologie, „Reponierbarkeit, Stabilität, Heilungsverhalten und Prognose. Die erste Behandlung sollte die letzte sein“ (61). Liegt hingegen eine nicht hinnehmbare Dislokation der Fragmente vor, so muss eine Reposition unter entsprechender Analgosedierung erfolgen. Bei der meist angewandten geschlossenen Reposition wird „[n]ach Hyperextension in der Fraktur [...] das distale Radiusfragment allmählich nach distal über die Frakturkante geschoben und dann durch volaren Gegendruck auf das proximale Frakturende und Flexion reponiert, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Zudem wird bei meist radialer Dislokation eine ulnare Abduktionsstellung bevorzugt“ (3). Wiederholte kräftige Manipulationen sollten ebenso wie eine Reposition nach mehreren Tagen vermieden werden, um das Risiko für iatrogene Traumatisierung und Komplikationen wie Wachstumsstörungen, Kompartment-Syndrom und avaskulärer Nekrose der Epiphyse nicht zu erhöhen (63). Eher kann eine gewisse Fehlstellung akzeptiert werden, welche durch das Remodeling-Potential und die große Wachstumspotenz der distalen Radiuswachstumsfuge bei Kindern im Wachstumsalter gut ausgeglichen werden kann (64).



Abbildung 7: a) Repositionsmanöver bei geschlossener Reposition einer distalen Radiusfraktur. b) Zunächst erfolgt die Hyperextension zur Mobilisierung der Fragmente und c) nach Zug und Vorschub des Fragmentes über den Frakturspalt die Flexion mit volarem Gegendruck; aus Laurer et al. 2009 - Therapieprinzipien distaler Unterarmfrakturen im Kindesalter (3)

Bei epiphysären Frakturen vom Typ Salter Harris I und II kann stattdessen die von Wilkins empfohlene sanfte Reposition angewandt werden. Hier erfolgt zunächst der Längszug, zum Beispiel durch Aushängen des Unterarmes im „Mädchenfänger“, um eine spontane Reposition der Epiphyse zu erreichen. Durch dorsalen Druck mit dem Daumen direkt auf die Epiphyse kann diese wieder in die anatomisch korrekte Position gleiten (29).

Minimalinvasiv ist eine Reposition durch die K-Draht-Osteosynthese nach Kapandji (siehe 1.5.5 Weitere Therapieoptionen) möglich (65). Lediglich bei frakturierter Gelenkfläche, wie in der Salter und Harris-Klassifikation beschrieben, ist eine anatomische Reposition erforderlich (61).

1.5.3 Konservative Therapie

Die konservative, nicht-invasive Therapie ist immer noch Spitzenreiter bei der Behandlung von Frakturen im Wachstumsalter (61). Stabile, undislozierte Wulstfrakturen werden beispielsweise 3 Wochen im Unterarm-/Oberarmgips ruhiggestellt. Dabei wird die Hand in Funktionsstellung, das Ellenbogengelenk im 90° Winkel und der Unterarm in Neutralstellung ruhiggestellt (29). Bei abgekippten Frakturen kann eine Gipskeilung am 8.-10. Tag nach Anlage des altersentsprechenden Gipses erfolgen, wenn die posttraumatische Schwellung der Weichteile zurückgegangen ist (6). Diese Keilung „ermöglicht eine aktive Stellungskorrektur ohne Anästhesie, indem die plastische Deformierbarkeit des noch bindegewebigen Fixationskallus ausgenutzt wird“ (61). Der Keilungseffekt sollte durch eine Röntgenkontrolle sichergestellt werden. Da jedoch immer weniger Ärzte und Pflegekräfte die Technik der Gipskeilung beherrschen, werden öfter eigentlich konservativ zu versorgende Frakturen operiert (66). So konnte über einen Zeitraum

von 10 Jahren ein Anstieg des Anteils an osteosynthetischer Versorgung von 9% auf 39% festgestellt werden (67).

1.5.4 Perkutane transepiphysäre bikortikale K-Draht-Osteosynthese

Bereits 1913 beschrieb Lambotte die konventionelle Methode, die Frakturfragmente mit dem Draht zu durchbohren (68). 1959 folgte die Veröffentlichung von Willenegger und Guggenbühl mit ihrer Technik der fugenkreuzenden K-Drahtosteosynthese zur Vermeidung sekundärer Dislokation nach distaler Radiusfraktur. Die zusätzliche Bezeichnung als statische Osteosyntheseform ergibt sich aus der direkten Fixierung der Fragmente (69). An knöchernen anatomischen Landmarken orientierend erfolgt die Reposition und Osteosynthese der Knochenfragmente unter Bildwandlerkontrolle. Nach Reposition durch Längszug oder Aushängen verhakter Fragmente in Allgemeinnarkose erfolgt der operative Zugang durch den tastbaren Processus styloideus radii. Bei dieser perkutanen Technik sind besonders in anatomischer Nähe zu der Tabatière liegende Strukturen gefährdet, wie der sensible R. superficialis nervi radialis, die Strecksehnen des Daumens (M. extensor pollicis brevis, M. extensor pollicis longus und M. abductor pollicis longus) und die A. radialis (70). Um die Haut zu schonen kann diese über der Tabatière circa 0,5 bis 1 cm inzidiert werden. Mit einer Klemme oder Präparierschere wird das Gewebe gespreizt und bis auf den Knochen präpariert (71). Als Bezugsachse darf nicht die Unterarmachse gewählt werden, denn durch den dorsal konvex gekrümmten Radius würde der Draht palmar perforieren. Aus diesem Grund wird in Richtung einer gedachten Linie vom Processus styloideus zum Olecranon mit einem Winkel von 25-30° zur Unterarmachse in der ap-Ebene gebohrt. Durch Umgreifen des frakturierten Handgelenks von ulnar wird dieses in einer Position stabilisiert, in welcher durch den dorsalen Druck die Frakturfragmente aufeinandergestellt sind und somit sicher eingebohrt werden kann. Beim Perforieren der ulnaren Gegenkortikalis ist ein Widerstand spürbar (70). Zur Gewährleistung eines ausreichenden Halts kreuzt der in möglichst steilem Winkel eingesetzte Kirschner-Draht die Wachstumsfuge (siehe Abbildung 9). Wiederholte Bohrversuche mit entsprechender Hitzeentwicklung sollen als Vorsichtsmaßnahme für konsekutive Wachstumsstörungen vermieden werden (29). Zur Reduzierung thermischer Schäden sollte auch die Eindrehgeschwindigkeit beim Einbringen des Drahtes niedrig gewählt werden (4). Während bei Willenegger immer zwei Kirschner-Drähte eingebracht werden, verwenden viele Operateure nur

einen Draht, um die Verletzung der Wachstumsfuge geringer zu halten. Erst bei sichtbarer Instabilität wird ein zweiter gebohrt. Dieser wird wieder nach Willenegger orientierend am ersten Draht, jedoch weiter proximal am Processus styloideus, in der Gegenkortikalis verankert. Die beiden Drähte haben einen nach dorsal offenen 30° Winkel zwischen sich. Um eine Abkipfung zu vermeiden, sollten die Drähte proximal des Frakturspalts kreuzen. Wird auf Höhe der Frakturlinie gekreuzt, resultiert eine geringere Rotationsstabilität (4). Nach einer weiteren radiologischen Kontrolle können die Drähte nun entweder subkutan versenkt oder epikutan belassen werden (70).

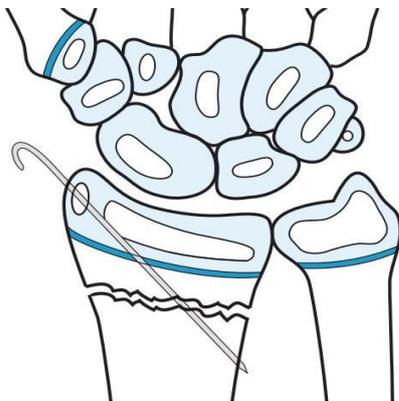


Abbildung 8: Perkutane K-Draht-Osteosynthese nach Willenegger. Zugang über Processus styloideus radii mit Kreuzen der Wachstumsfuge; aus Wittner & Holz 1993 - Die geschlossene Reposition und Spickdrahtosteosynthese dislozierter distaler Radiusfrakturen (21)

Um den Schaden an der Wachstumsfuge möglichst gering und die Stabilität der Osteosynthese möglichst hoch zu halten, sollte das Implantat einen kleinen Durchmesser haben und möglichst senkrecht zur Fuge eingebracht werden (72). Je nach Alter des Patienten und entsprechender Größe des Knochens wird ein Draht mit einem Durchmesser zwischen 0,8 und 1,6 mm gewählt (4). Zudem muss die Kreuzung zentral erfolgen, da bei einer Läsion im peripheren Bereich der Fuge die Durchblutung der Ranvierzone gestört wird und eine hemmende Wachstumsstörung bei einem solchen Vorgehen nicht ausgeschlossen werden kann (2, 29). Obwohl Willenegger diese Methode entwickelte, um einen Korrekturverlust zu verhindern, kann es selten auch trotz K-Draht-Osteosynthese zu einer sekundären Dislokation kommen (71). Die OP-Technik sorgt aber dennoch für „eine signifikante Stabilitätserhöhung in allen 4 Belastungsrichtungen“ (69). Durch die fehlende Übungs- und Belastungsstabilität der Osteosynthese ist eine postoperative Ruhigstellung durch Gipsanlage erforderlich. Nach röntgenologischer Kontrolle der

knöchernen Durchbauung kann die Metallentfernung für 4-6 Wochen nach Einbringung der K-Drähte geplant werden (29). Epikutan belassene Drähte werden ambulant ohne Betäubung oder bei Analgosedierung mit folgender Überwachung entfernt. Bei subkutan versenktem Osteosynthesematerial ist eine Entfernung in Allgemein- oder Lokalanästhesie nötig (29).

1.5.5 Weitere Therapieoptionen

Mit der konservativen Gipsruhigstellung und transepiphysären K-Draht-osteosynthetischen Therapie wurden bereits die zwei wichtigsten und herausragendsten Möglichkeiten bei distalen Radiusfrakturen dargelegt. Aufgrund der erhöhten Invasivität anderer Verfahren kommt bei einer operativen Versorgung im Bereich des distalen Radius fast ausschließlich die K-Draht-Osteosynthese zum Einsatz (13). Als wichtigste Alternativen der perkutanen transepiphyären K-Draht-Osteosynthese sind die Technik nach Kapandji und die nicht-fugenkreuzende Methode zu erwähnen, welche jedoch nicht in der Abteilung für Kinderchirurgie und Kinderorthopädie der Klinik St. Hedwig in Regensburg zum Einsatz kommen. Bei der nicht-fugenkreuzenden K-Draht-Osteosynthese wird der K-Draht weiter proximal eingebracht, um die Fuge zu schonen. Der flachere Winkel zwischen K-Draht und Frakturlinie führt jedoch zu verminderter Stabilität (55). Bei der Technik nach Kapandji werden die Drähte proximal des Tuberculum listeri intrafokal direkt über den Frakturspalt eingebracht, ohne die Wachstumsfuge zu kreuzen und mit ihrer Hilfe wird das distale Frakturstück reponiert. Die Drähte fungieren also als Hebel, wodurch während der Fixierung in der Gegenkortikalis eine Reposition möglich ist (4). Durch die Abstützung an beiden Kortikalices sollen Sekundärdisklokationen vermindert werden (73). Vor allem bei ausgedehnten Trümmerfrakturen ist diese Methode jedoch aufgrund der fehlenden Stabilität kontraindiziert (4).

Eine seltene weitere operative Therapie stellt die Versorgung mit einer Plattenosteosynthese dar. Diese wird jedoch nur bei Ausnahmeindikationen wie intraartikulären Frakturen bei Adoleszenten entsprechend der Erwachsenenbehandlung und selten bei Verletzungen im metadiaphysären Übergang im Wachstumsalter gewählt. Ist eine Plattenosteosynthese indiziert, wird überwiegend eine volare Platte gewählt (29). Komplett instabile Frakturen oder Polytraumata können mit einem Fixateur externe versorgt werden (61).

1.6 Komplikationen

1.6.1 Allgemeine Komplikationen nach distalen Radiusfrakturen

Bei jeder Erstuntersuchung nach Sturz müssen die periphere Durchblutung, Motorik und Sensibilität (pDMS) getestet werden, was bei verletzten Kindern manchmal jedoch nur begrenzt möglich ist. Parästhesien können durch die bei dislozierten Frakturen möglichen Nervenkompressionen entstehen, sollten nach erfolgreicher Reposition jedoch spontan rückläufig sein (4). Neurovaskuläre Schäden, häufig eine Irritation des N. medianus, und Infektion, meist nach offenen Frakturen, gehören zu den zwar seltenen, aber schwerwiegenderen allgemeinen Komplikationen distaler Radiusfrakturen. Auch ein akutes Karpaltunnelsyndrom und ein Kompartmentsyndrom können sich direkt nach einer Fraktur zeigen, öfter jedoch nach Anlage eines zu engen Gipses (25). Vor allem bei primär oder sekundär dislozierten Frakturen bleibt immer das Risiko fortbestehender Achsfehlstellungen mit Bewegungseinschränkungen, welche bei jüngeren Patienten oftmals durch das hervorragende Remodeling im Laufe des weiteren Wachstums korrigiert werden. Eine weitere Komplikation sind Refrakturen, welche vermehrt nach Grünholzfrakturen auftreten. Nach unzureichender Heilung der Fraktur können sich zudem Pseudarthrosen bilden. Eine seltenere Komplikation sind partielle oder totale Wachstumsstörungen, welche bei konservativer Therapie fast ausschließlich auf Frakturen mit Beteiligung der Wachstumsfuge oder wiederholte forcierte Reposition zurückzuführen sind (18). Durch die so entstandene Verkürzung des Radius und somit relativem Mehrwachstum der Ulna kann sich im späteren Verlauf ein ulnokarpales Impingement-Syndrom mit persistierender Schmerzsymptomatik entwickeln (20).

1.6.2 Spezielle Komplikationen nach fugenkreuzender K-Draht-Osteosynthese

Zusätzlich zu den allgemeinen Komplikationen distaler Radiusfrakturen kann eine iatrogene Schädigung durch die fugenkreuzende K-Draht-Osteosynthese auftreten, welches allgemein aber als risikoarmes Verfahren gilt (66). Durch das Bohren des Kirschner-Drahtes über den Processus styloideus können die dort liegenden Strukturen wie der klinisch wichtige sensible R. superficialis des Nervus radialis verletzt werden (74). Beim Verankern der Drähte ist zu beachten, dass diese nicht über die Gegenkortikalis hinausgehen, da sonst Weichteilirritationen auftreten

können. Trotz fehlender Evidenz werden von einem Großteil der Operateure in Deutschland aus Angst vor Infektionen K-Drähte in subkutaner Technik angewandt (75). Die Wundinfektion wird sowohl bei epikutan belassenen als auch bei subkutanen Drähten in Studien mit einer Wahrscheinlichkeit zwischen 1,3 und 7,9% angegeben (76, 77, 78). Als weitere Komplikation kann eine sekundäre Dislokation trotz Osteosynthese auftreten, jedoch deutlich seltener als nach rein konservativem Vorgehen. Zu den Risikofaktoren gehören auch eine nicht zur Stabilisierung ausreichende Anzahl der K-Drähte und ein zu distales Kreuzen beim Einbringen zweier Drähte (29).

1.6.3 Wachstumsstörungen nach fugenkreuzender K-Draht-Osteosynthese

Es gibt in der Literatur viele unterschiedliche Meinungen bezüglich Wachstumsstörungen nach fugenkreuzender Kirschner-Draht-Osteosynthese. Während einige Autoren behaupten, diese temporäre osteosynthetische Stabilisierung verursache keine hemmende Wachstumsstörung, zeigen andere diese Problematik auf. Es handelt es sich bei der fugenkreuzenden K-Draht-Osteosynthese um die geläufigste operative Behandlungsmethode distaler Radiusfrakturen im Kindesalter. Fraglich bleibt jedoch, ob auftretende Wachstumsstörungen durch die kurzzeitige Verwendung der operativen Therapie oder schon durch das initiale Trauma verursacht werden (66). Dieser Unterschied wird derzeit in der Literatur und in der vorliegenden Dissertation diskutiert.

Zunächst gilt es bei der Einbringung des Drahtes einige Faktoren zu beachten: Der Draht sollte mittig durch die Fuge und nicht durch die randständige Ranvier-Zone erfolgen, um eine Brückenbildung zu vermeiden (18). Denn hier ist die Durchblutung lokalisiert und es ist der Ort der Differenzierung von Mesenchymzellen zu Chondroblasten (13). Ebenso wichtig ist die Verwendung glatter Kirschner-Drähte, da ein Gewinde noch mehr Schaden an der Fuge anrichten kann. Bei der Wahl des Kirschner-Drahtes ist zudem die Größe, die Lokalisation und der Eintrittswinkel in der Epiphysenfuge sowie die zeitliche Verweildauer von Bedeutung (43, 79, 80). Janarv et al. konnten bei ihren Experimenten am Femur von Hasen zeigen, dass eine Schädigung durch Bohrungen mit einer relativen Größe von 7-9 % an der gesamten Wachstumsfuge zu Wachstumsstörungen führt (81). Des Weiteren sollten wiederholte Bohrversuche ebenso wie vermehrte „Hitzeentwicklung durch mehrfaches Bohren mit nahe beieinander gelegenen Durchtrittsstellen durch die

Fuge“ vermieden werden(30). Dies konnte auch von Gál et al. durch die Summation der durch einzelne Drähte verursachten Fugenschäden bekräftigt werden (82). Dass durch Trauma und Drähte geschädigte Wachstumsfugen nur selten zu klinisch relevanten hemmenden Wachstumsstörungen führen, erklärt sich möglicherweise durch die interne Kallusdistraktion, welche durch Aufbrechen der entstandenen Knochenbrücken ein weiterhin normales Wachstum ermöglicht (83). Experimente an Hasen zeigten, dass bei einer Kontinuitätsunterbrechung des Fugenknorpels eine Verbindung des epi- und metaphysären Gefäßsystems stattfindet, was zu einer Invasion von Osteoblasten-Progenitor-Zellen führt und so die Brückenbildung begünstigt (84). Die wachstumshemmende Wirkung der Kirschner-Drähte kann auch durch die Fixierung des Periosts mitverursacht werden, welches sekundär in einem gewissen Ausmaß das Wachstum der Epiphyse weg von der Metaphyse hindert (85). Je nach verbleibendem Wachstum des Kindes reicht die Spannweite von kosmetischen Problemen bis zu problematischen Fehlstellungen, Dauerschmerzen und Bewegungseinschränkungen, welche Korrektur-Operationen nach sich ziehen können (29).

2. Fragestellung

Bei der osteosynthetischen Frakturversorgung der distalen Radiusfraktur mittels K-Draht wäre die Einbringung des Drahtes in einem Winkel von 90° zur Frakturlinie am biomechanisch stabilsten, anatomisch ist dies jedoch nicht möglich. Deshalb wird bei der fugenkreuzenden Methode versucht, annähernd einen Winkel von 90° zu erreichen, indem der Draht über den Proc. styloideus durch die Wachstumsfuge eingeschoben wird. Gegner dieses Verfahrens wählen die biomechanisch instabilere, nicht-fugenkreuzende Variante, um die Fuge zu umgehen. Ziel dieser Studie ist es, zu beweisen, dass es durch den fugenkreuzenden K-Draht nicht zu signifikant vermehrten Wachstumsstörungen kommt. Aus diesem Grund werden folgende Hypothesen aufgestellt:

Die Nullhypothese beschreibt ein gehäuftes Auftreten von Wachstumsstörungen bei fugenkreuzendem K-Draht zur Versorgung von Radiusfrakturen im Vergleich zu konservativer Behandlung, bei welcher eine Wachstumsstörung lediglich in Folge des Traumas und assoziierten Faktoren auftreten kann, nicht jedoch durch die Durchbohrung der Epiphysenfuge. Laut Alternativhypothese sind jedoch keine signifikanten Unterschiede des Wachstums im Vergleich von konservativer und operativer Versorgung zu erwarten.

Wenn es gelingt, die Alternativhypothese zu bestätigen, kann eine Empfehlung für die Methode, bei welcher der Draht durch die Epiphyse eingebracht wird, bei entsprechender Indikation ohne das erhöhte Risiko einer Wachstumsstörung ausgesprochen werden. Aufgrund der höheren biomechanischen Stabilität würde es weiterhin zu weniger sekundären Dislokationen kommen.

3. Patienten und Methoden

3.1 Studiendesign

Die vorliegende Studie wurde als retrospektive Kohortenstudie konzipiert. Die nach Diagnosecode und weiteren Einschlusskriterien verbliebenen Patientinnen und Patienten wurden kontaktiert und zu einer anamnestischen, klinischen und sonographischen Kontrolle eingeladen. Ziel war es, die Kohorte der konservativ behandelten distalen Radiusfrakturen beim noch wachsenden Skelett mit der Kohorte der mittels transepiphysärer K-Draht-Osteosynthese behandelten Frakturen vor allem bezüglich einer möglichen Wachstumsstörung zu vergleichen. Das Studiendesign wurde durch die Ethikkommission der Universität Regensburg für unbedenklich erklärt (Nr. 17-609-101). In der vorliegenden Arbeit wurde zur besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Bei den teilnehmenden Patienten sind sowohl weibliche, männliche als auch diverse Patientinnen und Patienten inkludiert.

3.2 Ein- und Ausschlusskriterien

In diese Studie wurden sowohl weibliche als auch männliche Patienten mit den Geburtsjahren 2000 bis 2016 eingeschlossen. Zu den weiteren Einschlusskriterien gehörten eine mit S52.5 ICD-kodierte isolierte Radiusfraktur oder eine kombinierte Radius- und Ulnafraktur mit S52.6. Nur Patienten mit konservativer Gipsanlage oder mit geschlossener Reposition unter Verwendung eines fugenkreuzenden Kirschner-Drahtes als Therapie wurden rekrutiert. Aufgrund des weit größeren konservativ behandelten Patientenkollektivs waren hier die Patienten aus dem Jahr 2015 für die Studie ausreichend. Da die K-Draht-Osteosynthese seltener durchgeführt wird, musste hier der Zeitraum ausgeweitet werden. Bei den Operierten wurden Patienten mit einer zwischen den Jahren 2010 bis 2016 erlittenen distalen Radiusfraktur in die Studie aufgenommen. Diese und später noch genannte Einschlusskriterien erfüllend, konnten 304 Patienten in die Studie eingeschlossen werden, wobei 156 Patienten operativ mit fugenkreuzender Kirschner-Draht-Osteosynthese und 148 Patienten konservativ mit geschlossener Reposition und Gips behandelt wurden. Von diesen 304 Patienten erklärten sich 125 bereit, an der Studie teilzunehmen. Da ein Patient sowohl eine konservativ versorgte, als auch eine operativ versorgte Fraktur auf der Gegenseite hatte, welche den Einschlusskriterien entsprach, ergibt sich die Differenz

an 125 untersuchten Patienten und jedoch 126 untersuchten Frakturen. Diese lassen sich unterteilen in 62 konservativ und 64 operativ versorgte Frakturen.

Der zeitliche Abstand zwischen Fraktur und Nachuntersuchung wurde bewusst auf mindestens ein Jahr gesetzt, da eine potenziell vorhandene Wachstumsstörung somit durch das fehlende Wachstum von circa 1 cm pro Jahr in der sonographischen Untersuchung gezeigt werden könnte. Alle nicht den Einschlusskriterien entsprechenden Patienten wurden ausgeschlossen. Durch die noch nicht sichtbare Epiphyse bei 2016 geborenen Kindern zum Zeitpunkt der Untersuchung im Jahr 2017 konnten diese nicht Teil der Studie sein. Die Einschränkung bis zum Jahr 2000 erfolgte aufgrund der ansonsten hohen Wahrscheinlichkeit einer bereits verschlossenen Epiphysenfuge und der damit nicht möglichen sonographischen Messung. Zudem fand ein Ausschluss bei Verwendung anderen Osteosynthesematerials oder OP-Methoden wie Elastisch-Stabile Intramedulläre Nagelung (ESIN) und Plattenosteosynthese statt. Durch einen Wohnort außerhalb Deutschlands, geänderte Adresse oder Telefonnummer, welche vor allem bei den operierten Patienten durch den längeren Zeitabstand im Klinikinformationssystem nicht mehr aktuell waren, gestaltete sich eine Rekrutierung durch die schlechte Erreichbarkeit schwierig und führte zu einem Ausschluss. Dies erfolgte auch bei nicht ausreichenden Daten zur Operation, fehlenden Standard-2-Ebenen-Röntgenaufnahmen des distalen Radius, nicht gesicherter Diagnose einer Fraktur oder einer knöchernen Läsion aufgrund einer Knochenzyste.

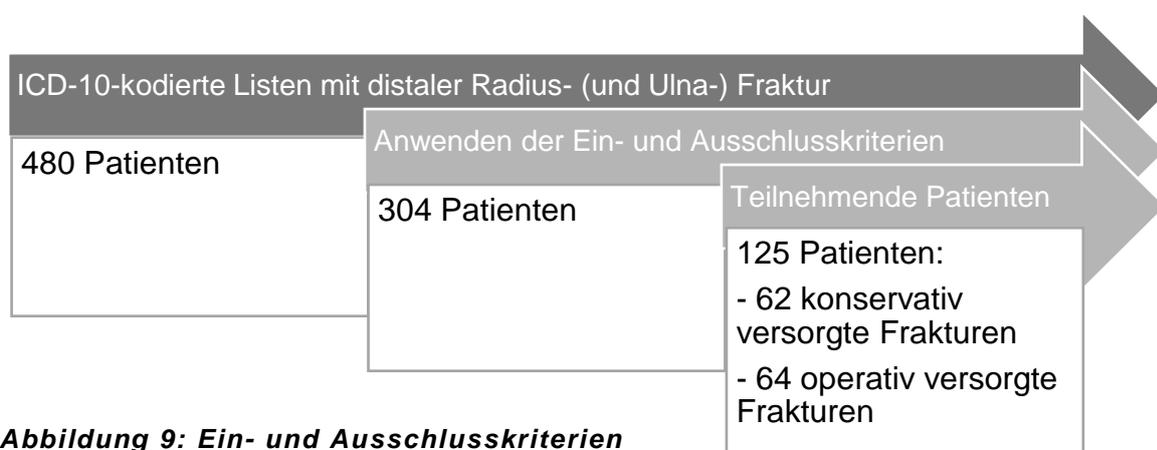


Abbildung 9: Ein- und Ausschlusskriterien

3.3 Patientenrekrutierung

Vor der eigentlichen Patientenrekrutierung wurden Kinder für den Interobserver Koeffizienten, teils aus der Notaufnahme der Klinik St. Hedwig, teils nach Sprechstundenterminen, untersucht, um zu zeigen, dass alle Beobachter (der betreuende Oberarzt und zwei Doktorandinnen) zu gleichen Ergebnissen kommen. Durch diese Untersuchungen konnte gewährleistet werden, dass es reicht, die Patienten der Studie durch eine Einzelperson zu untersuchen.

Ab Juli 2017 wurde mit der postalischen und telefonischen Kontaktaufnahme mit Patienten und deren Erziehungsberechtigten begonnen. Für die Terminvereinbarung standen die Möglichkeiten per Telefon, anonymisiert durch eine persönliche Patienten-ID auf der Internetplattform Doodle (Doodle AG, Zürich, Schweiz) oder per E-Mail zur Verfügung. Da die meisten ihren Termin telefonisch vereinbarten, wurde der anfangs mitgesendete, bereits frankierte Rücksendeumschlag nach den ersten 50 Briefen revidiert. Zudem stellte der zeitliche Abstand, mit dem die Briefe mit den Terminwünschen zurückkamen, ein Problem dar, da ein gewünschter Termin bereits telefonisch an einen anderen Teilnehmer vergeben werden konnte. Durch die telefonische Kontaktaufnahme und anonymisierte Terminauswahl auf der Webseite Doodle konnten jedoch sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Etwa 41 % der anfänglich ausgewählten Patienten stellten sich zur Nachuntersuchung vor. Jedoch konnte auch vor allem beim Patientenkollektiv der operativen Gruppe häufig kein Kontakt hergestellt werden, aufgrund einer abweichenden Adresse oder Telefonnummer, welche in der Patientenkartei nicht geändert wurden.

Die meistgenannten Gründe für eine Nichtteilnahme waren fehlende Beschwerden des Kindes und eine somit subjektiv unnötige Nachuntersuchung, ein zu weiter Anfahrtsweg oder allgemeiner Stress und Zeitprobleme. Man kann davon ausgehen, dass Patienten mit Beschwerden oder Unzufriedenheit mit dem Therapieergebnis bei einer solchen freiwilligen und kostenlosen Nachsorgeuntersuchung teilgenommen hätten. Die Rücklaufquote kann also durch weitgehend zufriedene Patienten erklärt werden (86).

3.4 Datenerfassung

Es wurde eine Microsoft Excel-Tabelle (Excel 2016, Microsoft, Redmond, WA, USA) mit den Patientendaten für die Studienteilnehmer angelegt, wobei die vorher

festgelegten Parameter wie Name, Geschlecht, Geburtsdatum, Datum und Uhrzeit der Behandlung, Alter bei Fraktur, Art und Seite der Fraktur, Anzahl der K-Drähte bei operativ Versorgten, zusätzliche Ulnafraktur, aber auch weitere persönliche Angaben wie Telefonnummer und Adresse, welche die Kontaktaufnahme ermöglichen, aus dem SAP (SAP Deutschland SE & Co. KG, Walldorf, Deutschland) entnommen werden mussten. Anhand der Fallnummern wurden die Daten der Patienten gesichtet und diejenigen ausgewählt, welche den vorher festgelegten Kriterien entsprachen. Diese Tabelle basierte auf einer von der Klinik für Kinderchirurgie und Kinderorthopädie des Krankenhauses St. Hedwig in Regensburg zur Verfügung gestellten Liste, welche Patienten mit dem ICD-Code S52.5 (isolierte Radiusfraktur) und S52.6 (kombinierte Radius- & Ulnafraktur) enthielt. Die personenbezogenen Daten wie Name, Geburtsdatum und Kontaktdaten wurden gemeinsam mit der individuell vergebenen Patienten-ID getrennt von den restlichen Daten gespeichert. Diese konnten nur anonymisiert durch die Patienten-IDs zugeordnet werden.

3.5 Fragebogen

Der Fragebogen wurde speziell für die vorliegende Fragestellung vor Untersuchungsbeginn durch die Studienteilnehmer entworfen (siehe 7. Anhang). Orientierend an den bekannteren Fragebögen DASH-Score und Mayo Wrist Score wurde versucht, eine wissenschaftlich adäquate und zeitgleich kindgerechte Nachuntersuchung zu gewährleisten. Nach einem Aufklärungs- und Einwilligungsgespräch und der entsprechenden Einwilligung von Patienten und Erziehungsberechtigten, konnte die Einwilligungserklärung von beiden Seiten unterschrieben werden. Gemeinsam mit den Patienten und ihren Erziehungsberechtigten wurde vor der Untersuchung die ehemalige Frakturseite mit der in den Unterlagen vermerkten Seite verglichen, um einen Fehler der Datenerhebung oder -übertragung zu verhindern. So konnte die Nachuntersuchung des richtigen Handgelenks mit der ausgewählten Fraktur garantiert werden. Je nach Alter des Patienten beantwortete dieser allein oder mit Hilfe der Erziehungsberechtigten den anamnestischen Teil des Fragebogens. Es wurde nach der Händigkeit, Schmerzen, Refraktur und Funktionseinschränkungen bei alltäglichen Aufgaben wie Schreiben, Essen oder sonstigen Auffälligkeiten gefragt.

Die Händigkeit wurde definiert durch die Schreibhand oder die laut Patient und Eltern meistgenutzte Hand bei Vorschulkindern.

3.6 Klinische Untersuchung

Nach dem Bewerten ästhetischer Auffälligkeiten wurde Druckschmerz durch palmar-dorsalen und radial-ulnaren Druck getestet. Bei angelegten Armen und einem Winkel von 90° im Ellenbogen ahmten die Patienten die Handgelenksbewegungen der Untersucher nach. So erfolgte die Beurteilung von Einschränkungen im Vergleich zur gesunden Seite bei Ulnaabduktion, Radialabduktion, Palmarflexion, Dorsalextension, Pronation und Supination (siehe Abbildungen 10 bis 14). Festgestellte Bewegungseinschränkungen wurden unter Winkelangaben dokumentiert. Der abschließende Teil der klinischen Untersuchung beinhaltete zur groben Orientierung die Längenmessung des Radius unter Zuhilfenahme eines Maßbandes vom proximal gelegenen Radiusköpfchen bis zum Processus styloideus radii (vgl. Abbildung 15). Der Längenunterschied wurde durch die Differenz zwischen rechtem und linkem Arm, unabhängig von der Seite der Fraktur, berechnet.



Abbildung 10: Dorsalextension, Ansicht von lateral und frontal

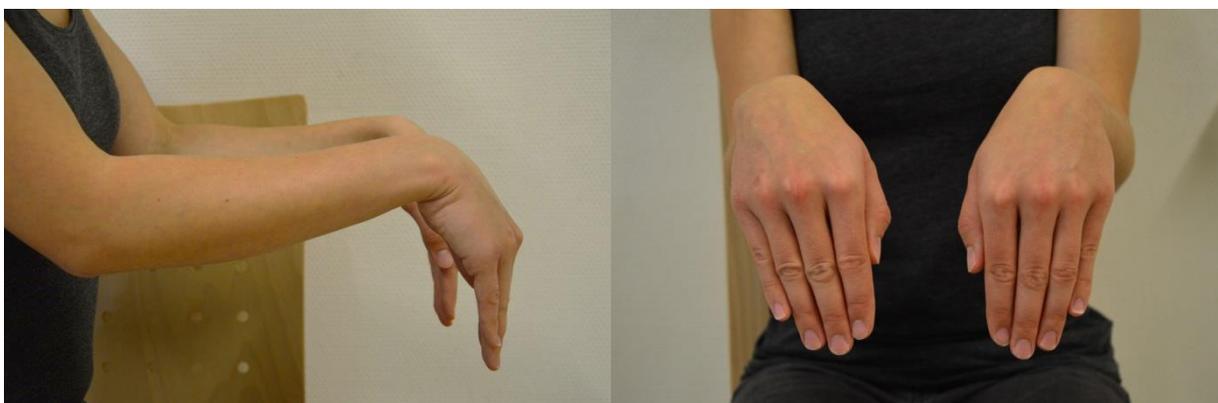


Abbildung 11: Palmarflexion, Ansicht von lateral und frontal

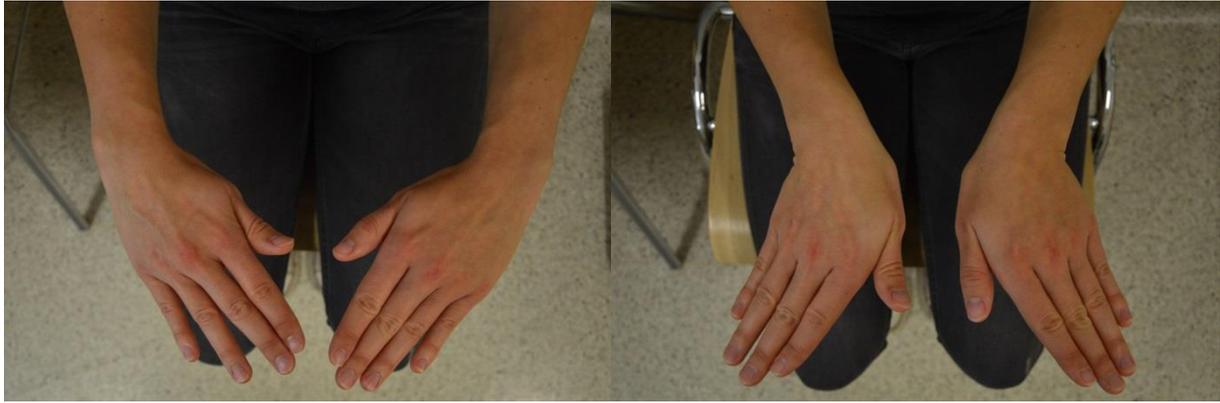


Abbildung 12: Radialabduktion und Ulnarabduktion, Ansicht von kranial



Abbildung 13: Pronation, Ansicht von frontal und kranial

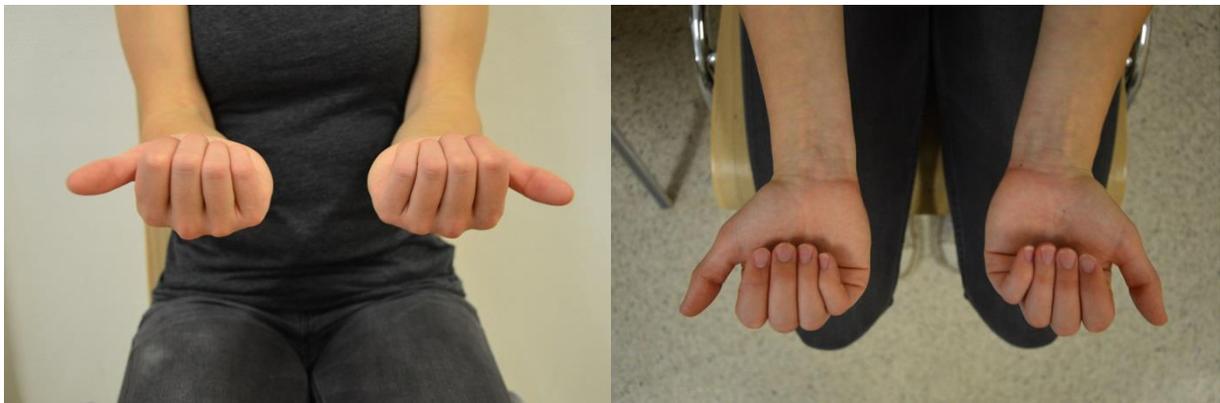


Abbildung 14: Supination, Ansicht von frontal und kranial



Abbildung 15: *Messung der Länge des Radius vom Caput radii zum Proc. Styloideus radii*

3.7 Röntgenologische Messung der Ulnavarianz

Die bei Erwachsenen angewandten Methoden zur Messung der Ulnavarianz sind auf Kinder durch ihre noch nicht ganz ossifizierten Epiphysen nicht zu übertragen. In dieser Studie orientierte man sich an der von Hafner et al. entwickelten Methode zur Bestimmung rheumatisch bedingter Verkürzung der Ulna im Kindesalter. Senkrecht zu einer Linie parallel zur ulnaren Längsachse werden Linien durch den jeweils distalsten Punkt der ulnaren und radialen Metaphyse gezogen. Nachfolgend wird der Abstand dieser beiden Messpunkte bestimmt (87). Die Messung wurde mit dem Programm JiveX (VISUS Health IT GmbH, Bochum, Deutschland) für die teilnehmenden Patienten durchgeführt. Der gemessene Wert entspricht der röntgenologisch gemessenen Ulnavarianz, welcher ebenfalls in die Datentabelle eingetragen wurde. Die Wichtigkeit standardisierter Röntgenaufnahmen für genaue Messwerte zeigt sich auch bei der Ulnavarianz, welche bei Pronation 1mm positiver ist als bei Supination (17).

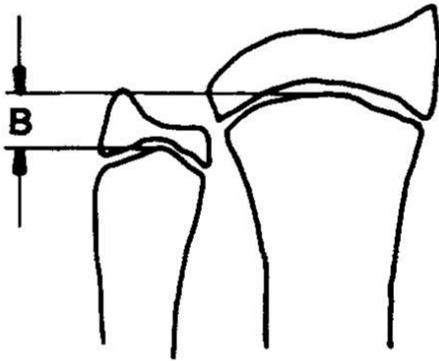


Abbildung 16: Abstand vom distalsten Punkt der ulnaren Metaphyse zum distalsten Punkt der radialen Metaphyse Hafner, Poznanski et al (87)

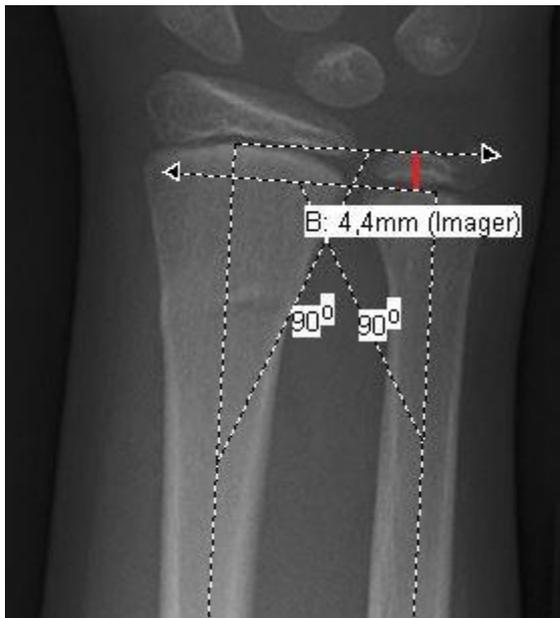


Abbildung 17: Messung der Ulnavarianz (rote Linie) an einem Beispiel-Röntgenbild bei distaler Radiuswulstfraktur

3.8 Sonographische Messung der Ulnavarianz

Für die sonographische Darstellung im Rahmen der Nachuntersuchung wurde ein Ultraschallgerät vom Typ Xario SSA-660A des Herstellers Toshiba (Toshiba Corporation, Tokio, Japan) mit Linear-Array-Sonde PLT-805AT 8 MHz im, für oberflächliche Strukturen gut geeigneten, Thyroidmodus verwendet. Die Methode entspricht theoretisch der in der röntgenologischen Untersuchung angewandten Technik. Auch hier wurde der Abstand der distalsten Punkte der radialen und ulnaren Metaphyse gemessen. Da diese jedoch nicht in einem Bild erkennbar sind, wurde die Untersuchungsmethode in zwei Schritte aufgeteilt. Nach sagittalem Aufsetzen des Schallkopfes (siehe Abbildung 18 und 19) auf den distalen Radius konnte bereits die altersentsprechende Offenheit der Wachstumsfuge beurteilt werden, welche bei

schlechter Einsehbarkeit Hinweis für eine Wachstumsstörung sein kann. Nun wurde als erster Schritt der Messmethode der distale Rand der Radiusmetaphyse an der Skala des linken Bildschirmrandes ausgerichtet (siehe Abbildung 20). Dieser Punkt entspricht nachfolgend dem Messpunkt für die distale Radiusmetaphyse. Als zweiter Schritt wurde der Schallkopf nach ulnar geschwenkt, bis sich die ulnare Metaphyse zeigte. Durch Einfrieren (Freeze) des Bildschirms war es möglich, den Abstand vom nun zu sehenden, am meisten distal gelegenen Punkt der ulnaren Metaphyse und dem vorher fixierten Messpunkt des distalen Radius zu messen (siehe Abbildung 21). Dieser gemessene Abstand entsprach der sonographischen Ulnavarianz des Patienten. Wichtig waren sowohl das genaue Aufsuchen der Metaphysen als auch das parallel zur Achse der Unterarmknochen durchgeführte Schwenken des Schallkopfes. In dieser Studie wurde in Anbetracht des durchschnittlichen Wachstums des distalen Radius von 8 mm pro Jahr die Verringerung der Ulnavarianz um mindestens 10 mm zu Ungunsten des Radius als Wachstumsstörung definiert. In dieser Studie wurde die sonographische Untersuchung aufgrund einiger Vorteile eingesetzt. Neben der flächendeckenden Verfügbarkeit, der schnellen sowie dynamischen Durchführung und ähnlichen Sensitivität und Spezifität wie eine röntgenologischen Untersuchung, ist hier auch eine Untersuchung der Gegenseite unbedenklich möglich (88). Eine 2014 veröffentlichte Studie zeigt zudem das Erkennen signifikanter Disparitäten der Fugenweite und somit das Potential für frühere Detektion von Salter-Harris-Verletzungen mit entsprechenden Nachuntersuchungen (89).



Abbildung 18: Aufsetzen des linearen Schallkopfes zum longitudinalen Schnitt des Radius

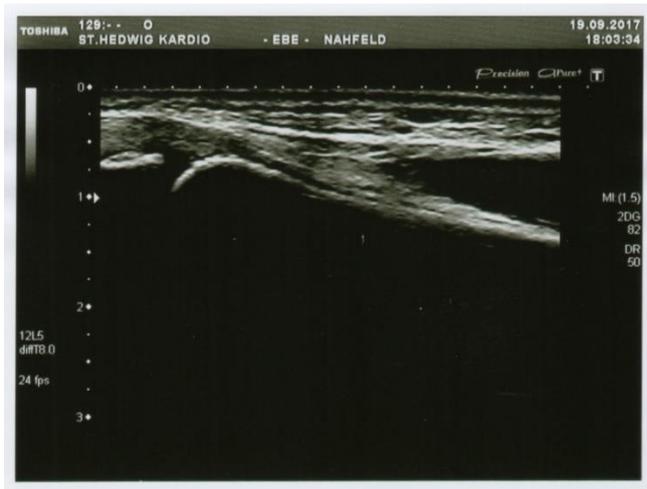


Abbildung 19: Darstellung der Wachstumsguge des distalen Radius eines 13-jährigen Patienten



Abbildung 20: Positionieren der Metaphyse des distalen Radius am linken Bildschirmrand



Abbildung 21: Nach Schwenken des Schallkopfes Richtung Ulna, Darstellung der Epiphysenfuge der distalen Ulna und Messen der Längendifferenz zur vorher anvisierten Metaphyse des Radius am linken Bildschirmrand

3.9 Statistische Analyse

Die gesammelten Daten wurden mithilfe von Microsoft Excel (Excel 2016, Microsoft, Redmond, WA, USA) sortiert und gespeichert. Mittels SPSS (IBM Corporation, New York, USA) wurden die gespeicherten Daten graphisch und tabellarisch aufbereitet. Zudem wurden Mittelwerte, Minimum- und Maximumwerte, Standardabweichung sowie Varianz berechnet.

4. Ergebnisse

4.1 Allgemeines zum Follow-up

Insgesamt wurden in dieser Studie 125 Patienten nachuntersucht, davon 64 operativ mit fugenkreisender K-Draht-Osteosynthese und 62 konservativ mit Gipsanlage behandelte Kinder. Ein Patient erlitt zwei Frakturen, was die Diskrepanz zwischen Patientenanzahl und Frakturanzahl erklärt. Zudem zeigte sich bei 5 Kindern zwar eine schlecht einsehbare Fuge, die sonographischen Bilder wurden jedoch als beurteilbar gewertet. Der durchschnittliche Follow-up-Zeitraum betrug beim operativen Patientenkollektiv 3,2 Jahre, da hier aufgrund der niedrigeren Patientenzahl eine OP im Zeitraum 2010 bis 2016 als Einschlusskriterium gewählt wurde, während konservativ versorgte Patienten im Durchschnitt 1,8 Jahre nach ihrer Behandlung nachuntersucht wurden. Der Mittelwert des Alters bei Nachuntersuchung unterschied sich um etwa 1,4 Jahre. Operativ behandelte Kinder wurden im Durchschnitt mit 12,4 Jahren, mit einer Spannweite von 5 bis 17 Jahren, und konservativ Behandelte mit 10,2 Jahren und einer Spannweite von 2 bis 17 Jahren nachuntersucht.

Tabelle 1: Follow-Up-Zeit und Alter bei Follow-up bei konservativer und operativer Therapie

Konservativ: Follow-Up-Zeit in Jahren	
Anzahl Patienten	62
Mittelwert	1,82
Std.-Abweichung	0,39
Minimum	1,0
Maximum	2,0

Konservativ: Alter bei Follow-up in	
Anzahl Patienten	62
Mittelwert	10,18
Std.-Abweichung	3,89
Minimum	2,0
Maximum	17,0

Operativ: Follow-Up-Zeit in Jahren	
Anzahl Patienten	64
Mittelwert	3,20
Std.-Abweichung	2,03
Minimum	1,0
Maximum	7,0

Operativ: Alter bei Follow-Up in Jahren	
Anzahl Patienten	64
Mittelwert	12,36
Std.-Abweichung	3,06
Minimum	5,0
Maximum	17,0

4.2 Patienten mit konservativer Therapie

4.2.1 Fragebogen

Altersverteilung

Der Altersdurchschnitt zum Zeitpunkt der Fraktur lag bei 7,9 Jahren. Der jüngste Patient stellte sich zu diesem Zeitpunkt mit 0,6 Jahren vor, der älteste mit 15 Jahren. Dieser Durchschnitt zeigte einen Unterschied bei Betrachtung nach Geschlecht. Während die männlichen Patienten ihre Fraktur mit durchschnittlich 8,5 Jahren erlitten, geschah dies beim weiblichen Patientengut mit 7,1 Jahren (Tabelle 2).

Tabelle 2: Alter bei Fraktur (konservative Therapie)

Alter bei Fraktur			
Geschlecht	Anzahl	Mittelwert	Std.-Abweichung
Männlich	39	8,48	3,83
Weiblich	23	7,12	3,75
Gesamt	62	7,97	3,83

Besondere Häufigkeitsgipfel beider Geschlechter zeigten sich bei dem relativ kleinen Patientenkollektiv nur sehr ungenau, jedoch kann festgehalten werden, dass zwischen 5 und 12 Jahren etwa 71 % der Frakturen lagen. Die genaue Verteilung findet sich in Abbildung 22. Die meisten Frakturen bei männlichen Patienten ereigneten sich im 6. Lebensjahr, bei weiblichen um das 12. Lebensjahr.

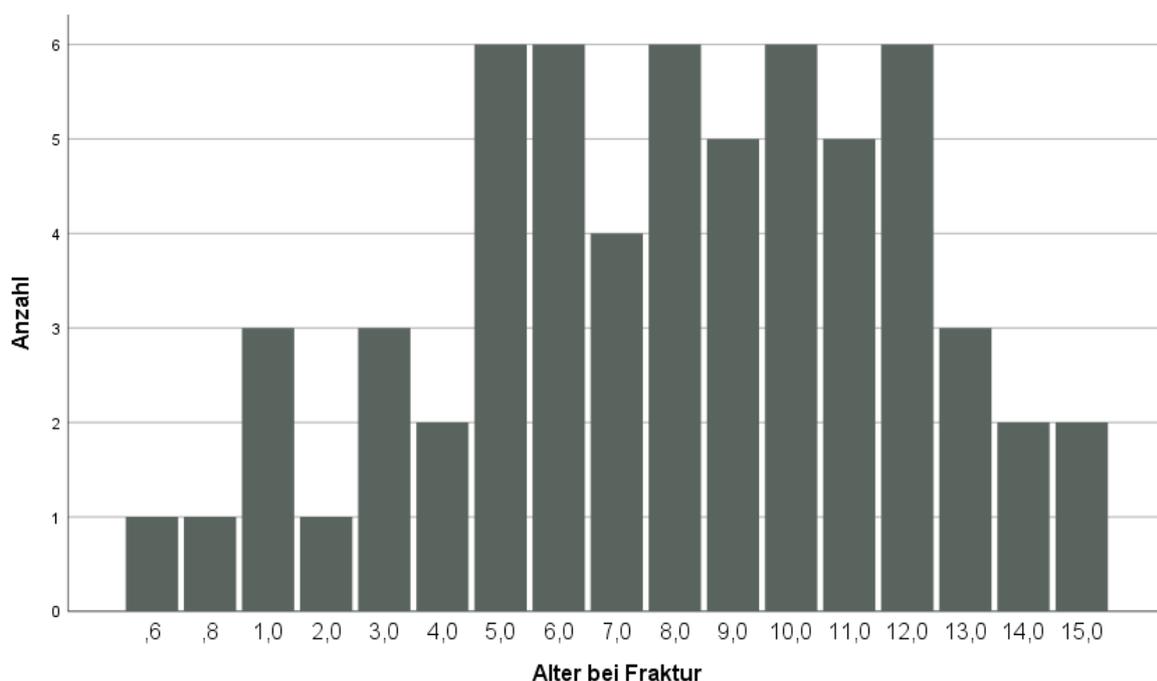


Abbildung 22: Altersverteilung zum Frakturzeitpunkt (konservative Therapie)

Geschlechterverteilung

In dieser Studie waren 62,9% der untersuchten Patienten männlich, 37,1% weiblich.

Tabelle 3: Geschlechterverteilung (konservative Therapie)

Geschlechterverteilung		
	Häufigkeit	Prozent
männlich	39	62,9%
weiblich	23	37,1%
Gesamt	62	100%

Händigkeit

90,3% der in der Nachuntersuchung vorgestellten Patienten waren Rechtshänder, die restlichen 9,7% Linkshänder.

Tabelle 4: Verteilung Händigkeit (konservative Therapie)

Händigkeit		
	Häufigkeit	Prozent
rechts	56	90,3%
links	6	9,7%
Gesamt	62	100%

Frakturseite

Die Fraktur erlitten 51,6% der Patienten auf der rechten Seite, 48,4% auf der linken. Betrachtet man diese Informationen mit der jeweiligen Händigkeit der Patienten, wird deutlich, dass sich nur 41,9% der distalen Radiusfrakturen auf der Seite der dominanten Hand ereigneten und somit bei 58,1% die nicht-dominante Seite frakturierte. Die 6 konservativ behandelten Linkshänder hatten ihre Fraktur zu 100% auf der rechten nicht-dominanten Seite, während bei den Rechtshändern eine Fraktur auf der nicht-dominanten linken Seite nur zu 53,6% stattfand. Dennoch zeigte sich ein überwiegendes Frakturieren des Radius der nicht-dominanten Seite

Tabelle 5: Verteilung Frakturseite (konservative Therapie)

Seite der Fraktur		
	Häufigkeit	Prozent
Rechts	32	51,6%
Links	30	48,4%
Gesamt	62	100%

Tabelle 6: Verteilung Fraktur an dominanter/nicht-dominanter Hand (konservative Therapie)

Fraktur an dominanter Seite		
	Häufigkeit	Prozent
Fraktur an dominanter Hand	26	41,9%
Fraktur an nicht-dominanter Hand	36	58,1%
Gesamt	62	100%

Tabelle 7: Verteilung Frakturseite in Abhängigkeit der Händigkeit (konservative Therapie)

Frakturseite in Abhängigkeit der Händigkeit		
	Händigkeit	
	Rechts	Links
Fraktur an dominanter Hand	26	0
	46,4%	0%
Fraktur an nicht-dominanter Hand	30	6
	53,6%	100%

Frakturtyp

Tabelle 8 zeigt die Häufigkeitsverteilung verschiedener Frakturtypen der konservativ behandelten knöchernen Verletzungen. Bei 85% der hier nachuntersuchten distalen Radiusfrakturen handelte es sich um eine metaphysäre Fraktur. 8,1% lagen im diaphysären Übergang. Bei jeweils 2 Patienten, entsprechend 3,2%, lag eine Salter-Harris II beziehungsweise eine Kombination aus metaphysärer Fraktur und Epiphysiolyse vom Salter-Harris Typ I vor. Das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der Frakturen lag bei fast allen Lokalisationen zwischen 7 und 8 Jahren, ausgenommen die Kombination aus metaphysär und Salter-Harris I mit einem Durchschnittsalter von 10 Jahren.

Tabelle 8: Verteilung Frakturtyp mit Durchschnittsalter (konservative Therapie)

Frakturtyp und Alter			
	Häufigkeit	Prozent	Alter bei Fraktur
Metaphysär	53	85,5%	7,9
Diametaphysär	5	8,1%	7,8
Salter-Harris II	2	3,2%	7,0
Metaphysär + Salter-Harris	2	3,2%	10,0

Begleitverletzung

Nur 19,4% der 62 Patienten hatten zusätzlich zur distalen Radiusfraktur eine begleitende knöcherne Verletzung der Ulna.

Tabelle 9: Begleitverletzung Ulnafraktur (konservative Therapie)

Begleitende Ulnafraktur		
	Häufigkeit	Prozent
Ja	12	19,4%
Nein	50	80,6%
Gesamt	62	100%

Refraktur

Mit 90,3% erlitt der Großteil der Patienten in dem Zeitraum zwischen Fraktur und Nachuntersuchung keine Refraktur. Lediglich ein Patient, entsprechend 1,6%, hatte in dieser Zeit eine Refraktur an gleicher Lokalisation. Bei ebenfalls einem Patienten frakturierte der Radius zwar erneut, aber an anderer Stelle. Bei 3,2% stellte die in die Studie eingeschlossene Fraktur bereits eine Refraktur dar. Das heißt, es gab eine Fraktur vor der Verletzung, welche im in den Einschlusskriterien festgelegten Untersuchungszeitraum stattfand.

Tabelle 10: Refraktur (konservative Therapie)

Refraktur		
	Häufigkeit	Prozent
Nein	58	93,6%
Ja, gleiche Lokalisation	1	1,6%
Ja, andere Lokalisation	1	1,6%
Vorherige Fraktur	2	3,2%
Gesamt	62	100%

Funktionelle Einschränkung

80,6% der untersuchten Patienten gaben an, keine Schmerzen zu haben, lediglich eine Person litt an solchen selbst ohne Belastung. 14,5% der Patienten hatten Schmerzen nur bei sehr starker Belastung des Handgelenks, 1,6% bei Flexion mit zusätzlichem Druck und ebenfalls 1,6% bei starkem Druck mehr Schmerzen als an der gesunden Seite. 100% der nachuntersuchten Patienten hatten keine Probleme im alltäglichen Leben, weder beim Schreiben noch beim Essen.

Tabelle 11: Schmerzbelastung (konservative Therapie)

Schmerzen		
	Häufigkeit	Prozent
Nein	50	80,6%
Ja, auch ohne Belastung	1	1,6%
Bei starker Belastung	9	14,5%
Bei Druck unter Flexion	1	1,6%
Bei starkem Druck mehr als gesunde Seite	1	1,6%
Gesamt	62	100%

Tabelle 12: Einschränkung im alltäglichen Leben (konservative Therapie)

Alltagsbewältigung		
	Häufigkeit	Prozent
Keine Einschränkung beim Schreiben	62	100%
Keine Einschränkung beim Essen	62	100%

4.2.2 Klinische Untersuchung

Klinisches Bild

Bei 95,2% der Patienten wurden keine weiteren Beschwerden angemerkt. Die folgenden Probleme lagen jeweils zu 1,6% vor: Knacksen des Handgelenks bei Rotationsbewegung, Subluxation der distalen Ulna bei Pro- und Supination und eine Deformität des distalen Radius in Richtung palmar und ulnar.

Tabelle 13: Klinisches Bild (konservative Therapie)

Klinisches Bild		
	Häufigkeit	Prozent
Keine Probleme	59	95,2%
Knacksen	1	1,6%
Ulna-Subluxation	1	1,6%
Deformität	1	1,6%

Druckschmerz

Erfreulicherweise verspürten 98,4% der konservativ behandelten Patienten keinen Druckschmerz. Nur 1 Patient gab Schmerzen bei von lateral und medial ausgeübtem Druck an.

Tabelle 14: Druckschmerz (konservative Therapie)

Druckschmerz		
	Häufigkeit	Prozent
Nein	61	98%
Ja	1	1,6%

Bewegungseinschränkung

Bei der klinischen Untersuchung des Bewegungsausmaßes konnte bei 98,4% kein Unterschied zur gesunden Seite festgestellt werden. Auffällig war nur ein Patient (1,6%) mit einer um 10° erhöhten Dorsalextension auf der frakturierten Seite im Vergleich zur gesunden Seite.

Tabelle 15: Bewegungsausmaß Handgelenk (konservative Therapie)

Bewegungsausmaß		
	Häufigkeit	Prozent
Seitengleich	61	98,4%
Bewegungsumfang von gesunder Seite abweichend	1	1,6%

Länge des Unterarms

Der größte mit dem Maßband gemessene Abstand zwischen gesundem und ehemals frakturiertem Radius betrug $\pm 0,5$ cm. Kleinere Differenzen sind durch die Ungenauigkeit der Messmethode bedingt, größere Werte im Falle einer Wachstumsstörung wären jedoch auffällig geworden. Durch diese vorläufige

Messung ist bei Längendifferenzen im Millimeterbereich eine Wachstumsstörung unwahrscheinlich.

4.2.3 Ulnavarianz – Vergleich der sonographischen und röntgenologischen Messung

Im Röntgen zeigte die gemessene Ulnavarianz eine annähernde Normalverteilung mit einem Häufigkeitsgipfel entsprechend dem Mittelwert bei -2,1 mm (siehe Abbildung 23). Das Minimum liegt bei -4,90 mm, das Maximum bei 0,0 mm. So wurden im Röntgen folglich nur Ulna-minus-Varianten mit einem längeren Radius und wenige Ausnahme mit 0mm Unterschied gemessen. In der sonographischen Untersuchung fand sich ein Mittelwert von -6,0 mm, einem Minimum von -14,0 mm und einem Maximum von -1,9 mm, was ebenfalls für eine negative Ulnavarianz und somit der Ulna-minus-Variante spricht (siehe Abbildung 24). Bei einer Wachstumsstörung des distalen Radius würde der Wert der Ulnavarianz im Zeitverlauf vom initialen Röntgen zur Sonographie der Nachuntersuchung positiver werden. Durch den Wachstumsstopp des Radius und dem fortlaufenden Wachstum der Ulna käme es zu einem Ulnavorschub. In dieser Studie wurde ein Zurückbleiben des Radius um 1 cm im Vergleich zur Ulna, also eine um 1 cm positivere Ulnavarianz in der Nachuntersuchung im Vergleich zum initialen Röntgenbild, als Wachstumsstörung definiert, da der Radius etwa 0,8 cm pro Jahr wächst und es bei einem Wachstumsstopp bereits ein Jahr nach Fraktur zu einer auffälligen Ulnavarianz kommen würde. Es konnte also festgestellt werden, dass in allen Fällen sowohl im Röntgen als auch in der Sonographie eine Ulna-minus-Varianz vorherrschte. Ein einziger Patient im konservativen Patientengut zeigte im Röntgen eine Ulnavarianz von -2,1mm und in der Sonographie -1,9mm. Dies stellte den positivsten Wert der Differenz der Ulnavarianz mit +0,2 mm dar, was weit unter der definierten Grenze von 1cm für eine Wachstumsstörung lag.

Da bei gleichzeitiger Radius- und Ulnafraktur eine Wachstumsstörung an beiden Knochen vorliegen könnte, wurde zudem auf die negativsten Werte der Ulnavarianz geachtet. Nur bei einem konservativ behandelten Patienten war die Differenz der Ulnavarianz kleiner -8 mm, dieser hatte jedoch keine begleitende Ulnafraktur, und zudem war auch die mit dem Maßband gemessene Länge der beiden Unterarme gleich. Aus diesem Grund wurde dieser Wert im Rahmen der Normalverteilung als Ausreißer gesehen und nicht als Wachstumsstörung der Ulna gewertet.

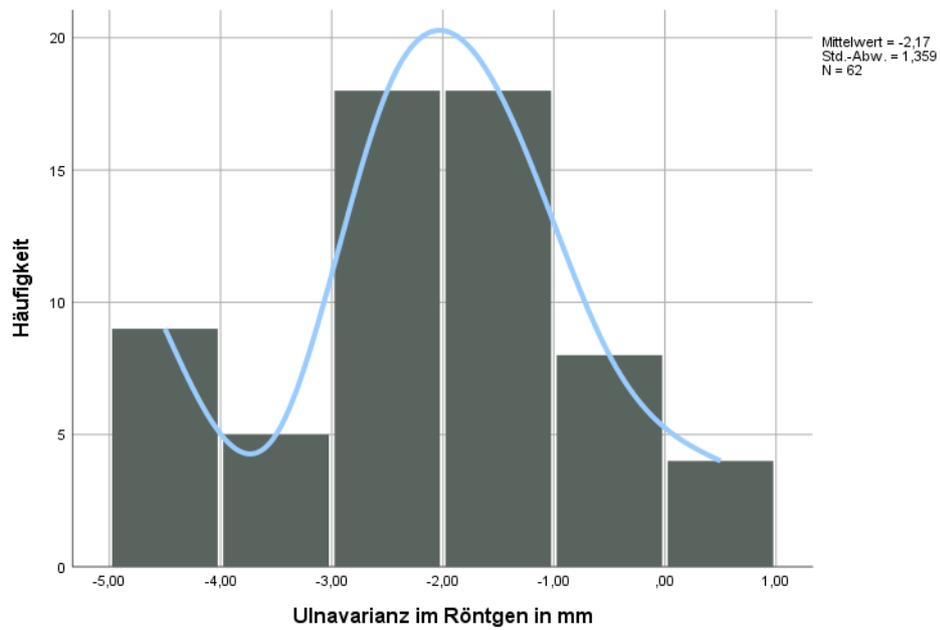


Abbildung 23: Häufigkeit der Ulnarvarianz-Werte im Röntgen in mm (konservative Therapie)

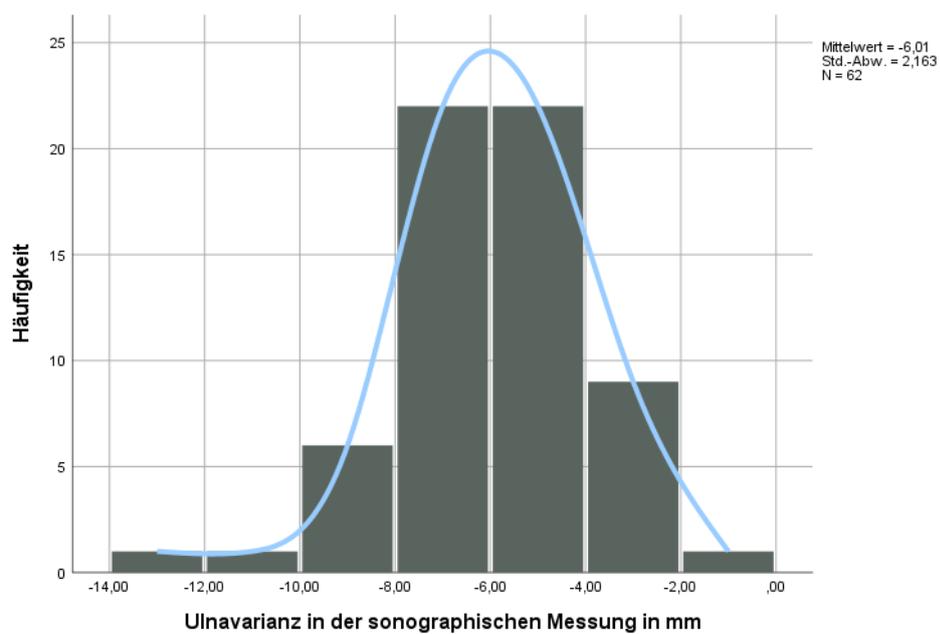


Abbildung 24: Häufigkeit der Ulnarvarianz-Werte in der sonographischen Messung in mm (konservative Therapie)

Tabelle 16: Vergleich Werte der Ulnavarianz im Röntgen und in der sonographischen Untersuchung (konservative Therapie)

Ulnavarianz im Vergleich		
	Ulnavarianz im Röntgen	Ulnavarianz in Sonographie
Minimum	-4,9 mm	-14,0 mm
Maximum	0,0 mm	-1,9 mm
Mittelwert	-2,2 mm	-6,0 mm
Std.-Abweichung	1,4	2,2

4.3 Patienten mit operativer Therapie

4.3.1 Fragebogen

Altersverteilung

Der Altersdurchschnitt zum Zeitpunkt der Fraktur bei operativ versorgten Patienten lag bei 8,6 Jahren mit einem Minimum von 3 und einem Maximum von 15 Jahren (siehe Tabelle 17). Nach Geschlechtern getrennt zeigte sich ein Durchschnittsalter von 8,9 Jahren bei männlichen Probanden und bei weiblichen von 8,1 Jahren. Gehäufte Frakturen fanden sich um das 6. und um das 11. Lebensjahr beider Geschlechter zusammen betrachtet (siehe Abbildung 25). Beim weiblichen Geschlecht waren drei Häufigkeitsgipfel zu erkennen: im Alter von 5, 9 und 12 Jahren. Diese waren bei den männlichen Patienten zwar etwas verschoben aber dennoch zu erkennen. Der erste Gipfel zeigte sich im Vergleich zum weiblichen um etwa ein Jahr verspätet, der dritte um etwa ein Jahr verfrüht. Hier ereigneten sich die meisten Frakturen im Alter von 6 und 11. Ein kleinerer Gipfel fand sich um das 9. Lebensjahr.

Tabelle 17: Alter bei Fraktur (operative Therapie)

Alter bei Fraktur			
Geschlecht	Anzahl	Mittelwert	Std.-Abweichung
Männlich	42	8,92	3,17
Weiblich	22	8,09	2,78
Gesamt	64	8,64	3,04

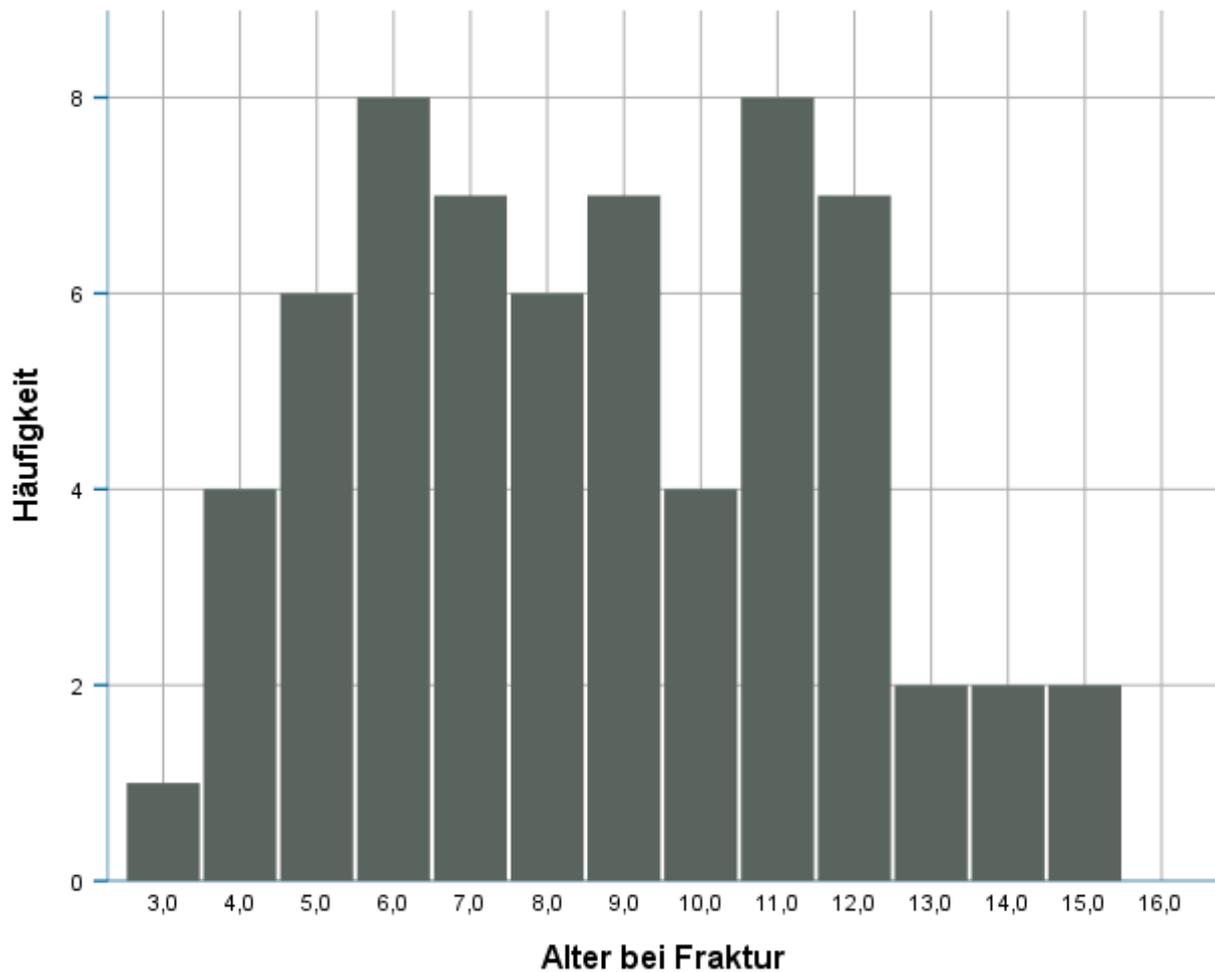


Abbildung 25: Altersverteilung zum Frakturzeitpunkt (operative Therapie)

Geschlechterverteilung

Die in dieser Studie untersuchten Patienten waren zu 65,6% männlich und zu 34,4% weiblich.

Tabelle 18: Geschlechterverteilung (operative Therapie)

Geschlechterverteilung		
	Häufigkeit	Prozent
männlich	42	65,6%
weiblich	22	34,4%
Gesamt	64	100%

Händigkeit

Die nachuntersuchten Kinder waren zu 87,5% Rechts- und 12,5% Linkshänder.

Tabelle 19: Verteilung Händigkeit (operative Therapie)

Händigkeit		
	Häufigkeit	Prozent
rechts	56	87,5%
links	8	12,5%
Gesamt	64	100%

Frakturseite

Die Fraktur ereignete sich bei 45,3% Patienten auf der rechten Seite, bei 54,7% auf der linken. Wird zusätzlich die Händigkeit der Patienten betrachtet, wird deutlich, dass nur 42,2% der distalen Radiusfrakturen auf der Seite der dominanten Hand auftraten und somit bei 57,8% die nicht-dominante Seite frakturierte. 62,5% der Linkshänder hatten ihre Fraktur auf ihrer nicht-dominanten rechten Seite. Bei Rechtshändern fand die Fraktur bei 57,1% auf der nicht-dominanten linken Seite statt. Zusammenfassend betrachtet zeigte sich ein Überwiegen der distalen Radiusfrakturen an der nicht-dominanten Seite.

Tabelle 20: Verteilung Frakturseite (operative Therapie)

Seite der Fraktur		
	Häufigkeit	Prozent
Rechts	29	45,3%
Links	35	54,7%
Gesamt	64	100%

Tabelle 21: Verteilung Fraktur an dominanter/nicht-dominanter Hand (operative Therapie)

Fraktur an dominanter Seite		
	Häufigkeit	Prozent
Fraktur an dominanter Hand	27	42,2%
Fraktur an nicht-dominanter Hand	37	57,8%
Gesamt	64	100%

Tabelle 22: Verteilung Frakturseite in Abhängigkeit der Händigkeit (operative Therapie)

Frakturseite in Abhängigkeit der Händigkeit			
		Händigkeit	
		Rechts	Links
Fraktur an dominanter Hand	an	24	3
		42,9%	37,5%
Fraktur an nicht-dominanter Hand		32	5
		57,1%	62,5%

Frakturtyp

Als häufigster Frakturtyp beim operativ behandelten Patientenkollektiv zeigte sich die metaphysäre Fraktur mit 64,0%. 17,2% lagen im diaphysären Übergang. 14,1% erlitten eine Salter-Harris Typ II Verletzung, während Typ I nur bei 1,6% vorkam. Die Kombination aus diaphysärer Fraktur mit zusätzlicher Epiphysiolyse vom Salter-Harris Typ I lag bei zwei Patienten entsprechend 3,1% vor. Bei den nicht-fugenverletzenden Frakturen lag der Altersdurchschnitt bei etwa 8 Jahren. Lediglich die Salter-Harris I- und II-Frakturen lagen mit einem durchschnittlichen Alter von etwa 11 Jahren höher.

Bei 81,3% war die Einbringung nur eines Kirschner-Drahtes ausreichend. In 18,7% der Fälle wurde ein zweiter zusätzlicher Draht zur Stabilisierung verwendet.

Tabelle 23: Verteilung Frakturtyp mit Durchschnittsalter (operative Therapie)

Frakturtyp und Alter			
	Häufigkeit	Prozent	Alter bei Fraktur
Metaphysär	41	64,0%	8,1
Diametaphysär	11	17,2%	8,5
Salter-Harris I	1	1,6%	12,0
Salter-Harris II	9	14,1%	10,1
Diametaphysär + Salter-Harris I	2	3,1%	11,0

Begleitverletzung

Nur 39,1% der nachuntersuchten Patienten erlitten eine isolierte Radiusfraktur. Eine zusätzliche knöchernerne Läsion der Ulna lag somit bei 60,9% vor.

Tabelle 24: Begleitverletzung Ulnafraktur (operative Therapie)

Begleitende Ulnafraktur		
	Häufigkeit	Prozent
Ja	39	60,9%
Nein	25	39,1%
Gesamt	64	100%

Refraktur

Bei keinem der nachuntersuchten Patienten, entsprechend 100%, ereignete sich nach der operativen Frakturversorgung eine Refraktur an gleicher Lokalisation.

Tabelle 25: Refraktur (operative Therapie)

Refraktur		
	Häufigkeit	Prozent
Nein	64	100%

Funktionelle Einschränkung

Beim operativ versorgten Patientengut zeigten sich 87,5% schmerzfrei, 9,4% verspürten Schmerzen nur bei starker Belastung und 1,6% litten auch ohne Belastung an Schmerzen des Handgelenks. Ein Patient klagte über Schmerzen bei direktem Kontakt während des Sports. Insgesamt führten die Schmerzen jedoch bei keinem der nachuntersuchten Patienten zu Problemen in der Bewältigung des Alltags wie Essen oder Schreiben.

Tabelle 26: Schmerzbelastung (operative Therapie)

Schmerzen		
	Häufigkeit	Prozent
Nein	56	87,5%
Ja, auch ohne Belastung	1	1,6%
Bei starker Belastung	6	9,4%
Beim Sport	1	1,6%
Gesamt	64	100%

Tabelle 27: Einschränkung im alltäglichen Leben (operative Therapie)

Alltagsbewältigung		
	Häufigkeit	Prozent
Keine Einschränkung beim Schreiben	64	100%
Keine Einschränkung beim Essen	64	100%

4.3.2 Klinische Untersuchung

Klinisches Bild

Bei 92,2% der nachuntersuchten ehemals operierten Patienten ergab sich ein unauffälliges klinisches Bild ohne weitere Probleme. 6,3% bemerkten ein Knacksen des Handgelenks bei Rotation. Meist war dies jedoch nicht bei jeder Bewegung provozierbar.

Tabelle 28: Klinisches Bild (operative Therapie)

Klinisches Bild		
	Häufigkeit	Prozent
Keine Probleme	60	93,8%
Knacksen	4	6,2%

Druckschmerz

Während der klinischen Untersuchung verspürten 98,4% der Patienten keinen Druckschmerz. Nur 1,6% schmerzte von lateral und medial ausgeübter Kompression.

Tabelle 29: Druckschmerz (operative Therapie)

Druckschmerz		
	Häufigkeit	Prozent
Nein	63	98,4%
Ja	1	1,6%

Bewegungseinschränkung

In der klinischen Untersuchung des Bewegungsausmaßes konnte in 93,8% kein Unterschied zur gesunden Gegenseite festgestellt werden. Jeweils 1,6% zeigten eine auffällig eingeschränkte Dorsalextension beziehungsweise Radialabduktion. Bei

einem Patienten waren sowohl Palmarflexion als auch Dorsalextension vermindert, dies war jedoch bereits präoperativ bekannt.

Tabelle 30: Bewegungsausmaß Handgelenk (operative Therapie)

Bewegungsausmaß		
	Häufigkeit	Prozent
Seitengleich	61	95,2%
Verminderte Dorsalextension	1	1,6%
Verminderte Radialabduktion	1	1,6%
Verminderung der Palmarflexion und Dorsalextension	1	1,6%

Länge des Unterarms

Hier wurde, wie oben bereits beschrieben, die Differenz zwischen rechtem und linkem Radius, unabhängig von der Frakturseite gemessen. Die Werte bewegten sich zwischen -0,5cm und 0,7 cm. Gehäufte Werte fanden sich bei -0,2 cm und 0,3 cm.

4.3.3 Ulnavarianz – Vergleich der sonographischen und röntgenologischen Messung

Im Röntgen zeigte die gemessene Ulnavarianz eine annähernde Normalverteilung mit einem Häufigkeitsgipfel entsprechend einem Mittelwert bei -2,5 mm. Das Minimum lag bei -6,70 mm, das Maximum bei 0,0 mm. So wurden im Röntgen folglich nur Ulna-minus-Varianten mit einem längeren Radius gemessen. In der sonographischen Untersuchung fand sich ein Mittelwert von -7,5 mm, ein Minimum von -14,1 mm und ein Maximum von -2,2 mm, was ebenfalls der Ulna-minus-Variante entsprach. Bei einer Wachstumsstörung des distalen Radius würde der Wert der Ulnavarianz im Zeitverlauf vom initialen Röntgen zur Sonographie der Nachuntersuchung positiver werden. Im Durchschnitt veränderte sich die Ulnavarianz um -4,9 mm, der Radius war somit durchschnittlich um diesen Wert in der sonographischen im Vergleich zur röntgenologischen Untersuchung länger als die Ulna. Zwar können vermutlich die auf unterschiedliche Methoden gemessenen Werte nicht direkt miteinander verglichen werden, jedoch konnte beobachtet werden, dass

alle Ulna-minus-Varianten auf jeden Fall auch in der Kontrolluntersuchung Ulna-minus-Varianten geblieben sind und dadurch kein relatives Mehrwachstum der Ulna bei einer bestehenden Wachstumsstörung des distalen Radius festgestellt werden konnte.

Bei gleichzeitiger Ulnafraktur könnte theoretisch bei sehr negativer Ulnavarianz zusätzlich eine Wachstumsstörung der Ulna vorliegen. Von den 7 Patienten mit einer Differenz der Ulnavarianz kleiner -8 mm und somit einer sehr ausgeprägten Minus-Varianz-Variante hatten nur 5 eine begleitende Ulnafraktur, die aber bei allen Patienten mehr als 1 Jahr zurücklag.

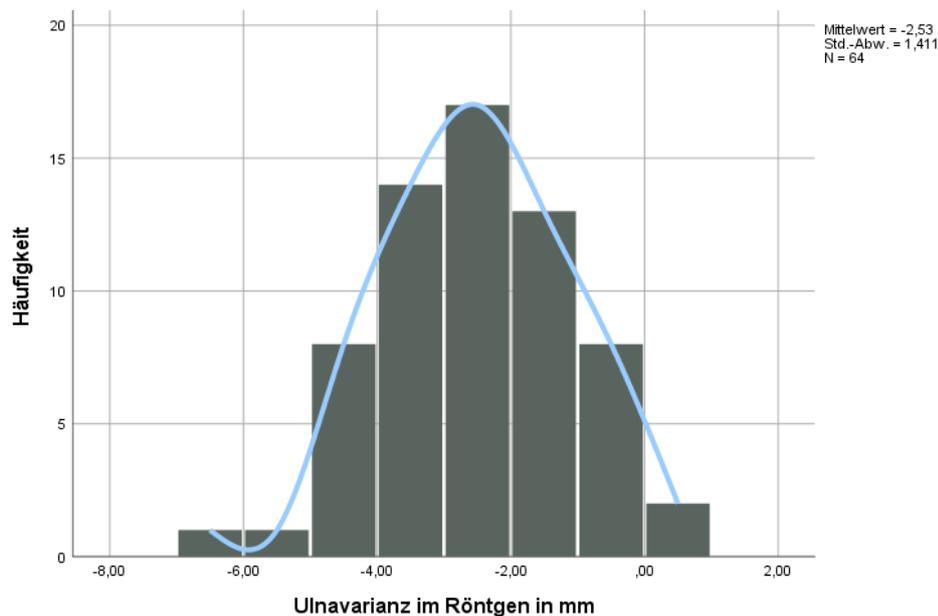


Abbildung 26: Häufigkeit der Ulnavarianz-Werte im Röntgen in mm (operative Therapie)

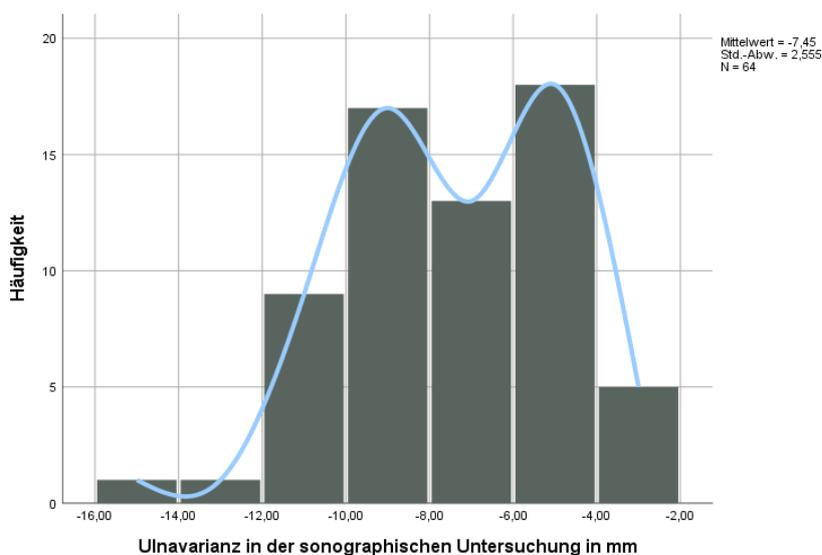


Abbildung 27: Häufigkeit der Ulnavarianz-Werte in der sonographischen Untersuchung in mm (konservative Therapie)

Tabelle 31: Vergleich Werte der Ulnavarianz im Röntgen und in der sonographischen Untersuchung (operative Therapie)

Ulnavarianz im Vergleich		
	Ulnavarianz im Röntgen	Ulnavarianz im Sono
Minimum	-6,7 mm	-14,1 mm
Maximum	0,0 mm	-2,2 mm
Mittelwert	-2,5 mm	-7,5 mm
Std.-Abweichung	1,4	2,5

5 Diskussion

5.1 Studiendesign

Während der ausführlichen Literaturrecherche konnte keine andere Studie gefunden werden, welche die Ulnavarianz in einer a.p.-Röntgenaufnahme und in einer sonographischen Nachuntersuchung vergleicht. In der Literatur sind bisher nur vergleichende Untersuchungen der Ulnavarianz zwischen Röntgen und Röntgen, Röntgen und CT sowie Röntgen und MRT beschrieben (90,91).

Der Vorteil einer sonographischen Untersuchung ist zum einen die strahlungsfreie, aber auch die dynamische Untersuchungsmöglichkeit. Vor allem bei Kindern ist auch eine kurze Untersuchungszeit ohne notwendige Sedierung, wie zum Beispiel bei einer MRT, von deutlichem Vorteil. Um genauere Schlüsse ziehen zu können, wären weitere Studien notwendig, welche diese beiden Untersuchungsarten zum gleichen Zeitpunkt miteinander vergleichen. Eine Möglichkeit wäre, Handgelenke, welche zum Frakturausschluss geröntgt wurden, zeitgleich sonographisch zu untersuchen und in beiden Untersuchungen die Ulnavarianz zu bemessen. Eine Nachuntersuchung mittels Röntgenaufnahmen, wie in anderen Studien durchgeführt, zum Beispiel in der Studie zur Ulnavarianz von Knapnik et al, sollte aufgrund der Strahlensensibilität des kindlichen Gewebes sowie der möglichen Alternativen nicht durchgeführt werden (62, 88, 92).

Bei der Konzipierung des standardisierten Fragebogens wurde sich an international anerkannten Fragebögen wie dem DASH-Score und dem Mayo Wrist Score orientiert und an diese Studie sowie an das pädiatrische Patientenklientel angepasst. So werden die vielfältigen Aspekte der möglichen Folgen einer Fraktur kindgerecht bewertet. Bei der röntgenologischen Messung der Ulnavarianz wurde nach ausgiebiger Literaturrecherche ebenfalls auf eine anerkannte Messmethode zurückgegriffen. Die hier verwendete Hafner-Methode ist vor allem bei Kindern und Jugendlichen bis zu 14. Lebensjahr sehr gut geeignet (93).

Da die sonographische Messung der Ulnavarianz noch recht unerforscht ist, wurde in Zusammenarbeit mit einem Oberarzt der Kinderchirurgie und -orthopädie eine neue Methode entwickelt, um möglichst genau und untersucherunabhängig zu arbeiten.

Diese strahlungsfreie und kindgerechte Untersuchung sowie die Wichtigkeit der kindlichen Gesundheit für das weitere Leben kann die hohe Rücklaufquote von 41% der angefragten Patienten bzw. deren Familien erklären.

5.2 Vergleich der Ergebnisse der konservativen und operativen Patientengruppe sowie Einordnung in die Literatur

Als häufigste Fraktur im Kindesalter besteht großes Interesse an der optimalen Versorgung distaler Radiusfrakturen, mit den wenigsten Komplikationen und Langzeitschäden wie Wachstumsstörungen. Aus diesem Grund wurden in dieser Studie sowohl konservativ als auch operativ mittels fugenkreuzender K-Draht-Osteosynthese behandelte distale Radiusfrakturen nachuntersucht, da ein signifikantes Ergebnis die Wahl der Therapie beeinflussen könnte.

Im Folgenden werden zunächst die untersuchten Kriterien bei konservativ und operativ behandelten Patienten verglichen.

Insgesamt wurden in dieser Studie 125 Patienten nachuntersucht, davon 64 operativ mit fugenkreuzender K-Draht-Osteosynthese und 62 konservativ mit Gipsanlage behandelte Kinder. Operativ versorgte Patienten wurden im Durchschnitt 3,2 Jahre nach ihrer Behandlung nachuntersucht, während es bei konservativ Behandelten nur 1,8 Jahre waren. Dieser um durchschnittlich 1,4 Jahre längere Zeitraum bis zum Follow-Up beim operierten Patientenkollektiv erklärt sich durch die Tatsache, dass die operative Therapie nur bei gewisser Frakturschwere indiziert ist und dadurch weitaus seltener durchgeführt wird. Um auf vergleichbare Patientenzahlen zu kommen, wurde als Einschlusskriterium für die Studie eine OP im Zeitraum zwischen 2010 bis 2016 gewählt, während für die konservative Therapie nur das Jahr 2015 herangezogen wurde. Operativ behandelte Kinder wurden im Durchschnitt mit 12,4 Jahren und konservativ Behandelte mit 10,2 Jahren nachuntersucht. Der Altersdurchschnitt zum Zeitpunkt der Fraktur liegt beim operativen Patientenkollektiv (8,6 Jahre) ebenfalls höher als beim konservativen (7,9 Jahre). Zwischen den Jahren 5 und 12 liegen beim konservativen Patientengut 71% der Frakturen, beim operativen sogar 82,8%. Genaue Altersgipfel sind bei der Betrachtung beider Geschlechter gemeinsam nur schwer auszumachen. Am ehesten finden sich die Häufigkeitsschwerpunkte in beiden Vergleichsgruppen in den Jahren 6, 9 und 11. Zum Vergleich weisen die in der Studie von Zimmermann et al untersuchten Kinder einen ähnlichen Wert mit durchschnittlich 9 Jahren zum Unfallzeitpunkt auf (94). In der Literatur herrschen jedoch auch größere Unterschiede bezüglich des Altersdurchschnitts, wie die Metaanalyse von Rai et al zeigt. Bei den 8 hier

berücksichtigten Studien mit insgesamt 1030 untersuchten Patienten liegt der Altersdurchschnitt zwischen 7,9 und 12,4 Jahren (95).

Beide hier untersuchten Gruppen zeigen eine ähnliche Verteilung des Geschlechts. Hier unterscheiden sich konservativ und operativ nur um etwa 3%. Durchschnittlich 64% der untersuchten Patienten sind männlich. Dies entspricht der aktuellen Studienlage, in welcher Jungen aufgrund ihres gesteigerten Aktivitätslevels und höherer Risikobereitschaft auch ein höheres Risiko haben eine knöcherne Verletzung zu erleiden (1, 96, 97). Zudem wird vermutet, dass Jungen eher Sportarten und Aktivitäten wählen, welche ein erhöhtes Frakturrisiko haben (14).

In beiden Gruppen überwiegen Rechtshänder mit circa 90%, was sowohl der Inzidenz in der Allgemeinbevölkerung als auch den Studien zu distalen Radiusfrakturen entspricht (96). Die Fraktur erlitten 51,6% der konservativ Behandelten auf der rechten Seite, in der operativen Gruppe waren es nur 45,3% rechts. Bei operierten Rechtshändern war die Fraktur in 57,1% der Fälle auf der nicht-dominanten linken Seite. Bei den konservativ behandelten Rechtshändern lag die Fraktur zu 53,6% auf der nicht-dominanten linken Seite. Bei Linkshändern, welche operativ versorgt wurden, frakturierte zu 62,5% die nicht-dominante rechte Seite, während bei konservativ Behandelten dieser Wert bei 100% liegt. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Fraktur sowohl bei Rechtshändern als auch bei Linkshändern mit insgesamt 58% bevorzugt an der nicht-dominanten Seite ereignet. Ein Erklärungsansatz wäre, dass Kinder beim Spielen das Spielzeug meist in der dominanten Hand tragen. Ereignet sich zu diesem Zeitpunkt ein Sturz, bleibt zum Abstützen nur die nicht-dominante Hand (96, 98). Außerdem ist die nicht-dominante Hand motorisch weniger darin geübt, komplexe Bewegungsabläufe wie das Abfangen eines Sturzes durchzuführen, weshalb es hier eher zu einer Fraktur kommen könnte. In der Literatur zeigen sich die Ergebnisse nicht ganz einheitlich. Während Borton nach der Untersuchung von 426 Kindern mit distaler Radiusfraktur zu einem mit diesen Daten übereinstimmenden Ergebnis kam, beschrieb Hassan, dass bei Linkshändern der linke Radius signifikant häufiger frakturierte (96, 98).

Unterschiede zeigen sich auch in der Verteilung der Frakturart. Die metaphysäre Fraktur erreicht im konservativen Patientengut mit 85,5% einen etwa 20% höheren Wert als in der operativen Vergleichsgruppe. In dieser nehmen nach der metaphysären Verletzung die diaphysäre Fraktur mit 17,2 % und vor allem die Salter-Harris Typ II Fraktur mit 14,1% einen höheren Stellenwert in der

Frakturverteilung ein. Insgesamt sind in dieser Studie nur Salter-Harris Typ I und II vertreten. Auffällig ist, dass Frakturen mit komplizierteren Epiphysenfugenverletzungen dreimal häufiger bei operativ versorgten Kindern zu finden sind. Erklärbar ist dies durch die Tendenz zur Reposition und K-Drahtosteosynthese bei komplizierteren Frakturen, um die Fraktur zu stabilisieren und sekundäre Dislokationen zu vermeiden. Bei 81,3% der operativ versorgten Frakturen brachte die Verwendung nur eines K-Drahtes bereits genug Stabilität. In 18,7% war dies ungenügend, weshalb ein zweiter K-Draht eingeführt wurde. Werden alle nachuntersuchten Patienten gemeinsam betrachtet, so lagen zu 75% reine metaphysäre Frakturen, zu 12% Frakturen im diaphysären Bereich und zu 13% Frakturen mit Wachstumsfugenbeteiligung vor. Lieber et al geben in ihrer Studie bei Epiphysiolyse sogar eine Häufigkeit von 30% an (6). In der Literatur wird oft eine Wachstumsfugenbeteiligung als Einschlusskriterium verwendet. Da diese mit einer höheren Wahrscheinlichkeit einer Wachstumsstörung vergesellschaftet ist, kann durch den in dieser Studie nur geringen Anteil dieser Frakturen das Gesamtbild im Vergleich zur Literatur verzerrt und die Wahrscheinlichkeit von Wachstumsstörungen unterrepräsentiert sein. Auch Kallini et al bestätigten eine wesentlich höhere Rate an Wachstumsstörungen bei Wachstumsfugen-beteiligenden Frakturen (99).

Während in der konservativen Gruppe nur 19,4% eine begleitende Ulnafraktur erlitten haben, erreicht dieser Wert in der operativen Gruppe mit 60,9% den dreifachen Wert. So kann vermutet werden, dass die operativ versorgten Patienten allgemein ein größeres Trauma erlitten haben. Insgesamt liegt in 40% der Fälle eine komplette Unterarmfraktur vor. In der Studie von Lieber et al sind nur 20% der distalen Radiusfrakturen kombiniert mit einer distalen Ulnafraktur (6).

In der Kategorie Refraktur zeigt sich nur wenig Unterschied. Im operativen Patientengut ereignete sich keine Refraktur an gleicher Lokalisation, während im konservativen ein Patient, entsprechend 1,6%, eine erneute Fraktur erlitt.

Ähnliche Werte zeigen sich auch die Schmerzen betreffend: Konservativ behandelt haben zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung etwa 80% keine Schmerzen, operativ fast 88%. Jeweils 1,6% haben auch ohne Belastung Schmerzen und um die 10% nur bei starker Belastung. Jedoch stellt dies in beiden Gruppen kein Hindernis in der Alltagsbewältigung dar. Allen Patienten mit anhaltender Schmerzsymptomatik wurde eine Vorstellung in der kinderchirurgischen Sprechstunde empfohlen, um gegebenenfalls weitere Diagnostik durchzuführen.

In der klinischen Untersuchung zeigten sich bei weit über 90% keine weiteren Probleme. In der operativen Gruppe wurde mit 6,2% etwas häufiger ein Knacksen des Handgelenks bemerkt, während in der konservativen Gruppe mit jeweils 1,6% Knacksen, Subluxation der Ulna bei Pro- und Supination und eine Deformität des Handgelenks beklagt wurden. Anhaltende Beschwerden müssen jedoch nicht unbedingt einer Wachstumsstörung zugrunde liegen. So sind zum Beispiel eine Scapho-Lunäre-Band-Läsion bei scapholunärer Dissoziation oder eine Pseudarthrose bei ehemaliger Fraktur des Processus styloideus ulnae eine mögliche Ursache (100).

Den Druckschmerz betreffend ergaben sich mit 98,4% ohne Schmerzen in beiden Gruppen identische Werte. Jeweils nur ein Patient hatte Schmerzen bei radio-ulnar ausgeübtem Druck.

In der klinischen Untersuchung des Bewegungsausmaßes zeigten sich in der konservativen Gruppe etwas bessere Werte. Hier präsentierten 98,4% ein seitengleiches Ergebnis. Bei einem Patienten war das Bewegungsausmaß auf der ehemals frakturierten Seite vergrößert. Die distale Radiusfraktur könnte hier zu einer Lockerung des Bandapparates des Handgelenks mit etwas erweitertem Bewegungsausmaß geführt haben. Im operativen Patientengut jedoch stellten sich 4 Patienten mit Auffälligkeiten im Vergleich zur gesunden Seite vor wie eingeschränkte Dorsalextension, Palmarflexion, Radialabduktion oder Schmerzen bei Dorsalextension. Da es immer nur Abweichungen von wenigen Graden waren, kann hier dennoch von einem sehr zufriedenstellenden Ergebnis gesprochen werden.

Die klinische Maßbandmessung des Radius ergab in der konservativen Gruppe einen Mittelwert von -0,03 cm mit einem Minimum von -0,50 cm und einem Maximum von 0,50 cm, im operativen Kollektiv einen Mittelwert von 0,02 cm mit einem Minimum von -0,50 cm und einem Maximum von 0,70 cm. Der maximale Unterschied zwischen rechtem und linkem Radius waren demnach 0,70 cm. Obwohl die klinische Messung anhand der Knochenpunkte gewisse Ungenauigkeiten zulässt, so kann hiermit dennoch eine gravierende Wachstumsstörung bereits ausgeschlossen werden. Auch der sehr unwahrscheinliche Fall, dass es nach einer kompletten Unterarmfraktur zu einem Wachstumsstopp sowohl des Radius als auch der Ulna kommen könnte und die Ulnavarianz deshalb unverändert wäre, würde hierbei zu einem auffälligen Ergebnis führen. Außerdem sei nach Pritchett eine unterschiedliche Länge der Unterarme normal, denn durch die muskuläre Mehr-Beanspruchung sei

der dominante Unterarm sogar um durchschnittlich 0,4cm länger als der nicht-dominante (101). Da in der hier vorliegenden Studie immer die Differenz zwischen rechtem und linkem Radius unabhängig von Frakturseite und Händigkeit gemessen wurde, sind keine Rückschlüsse hierzu möglich.

In dieser Studie wurde ein Zurückbleiben des Wachstums des Radius um 1 cm im Vergleich zur Ulna, also eine um 1 cm positivere Ulnavarianz in der Nachuntersuchung im Vergleich zum initialen Röntgenbild, als Wachstumsstörung definiert. Da der Radius etwa 0,8 cm pro Jahr wächst, wäre die Ulnavarianz bei einem Wachstumsstopp bereits ein Jahr nach Fraktur auffällig.

In beiden Patientenkollektiven ergab die sonographische Messung fast ausschließlich einen negativeren Wert der Ulnavarianz als die röntgenologische Messung. Alle Patienten zeigten sowohl im Röntgen als auch in der sonographischen Untersuchung eine Ulna-minus-Varianz. Dadurch kann ein im Rahmen einer radialen Wachstumsstörung auftretendes relatives Mehrwachstum der Ulna und somit Veränderung der Ulnavarianz in Richtung Ulna-plus-Varianz oder zumindest Gleichstellung von distaler Ulna und distalem Radius ausgeschlossen werden. Es kam also in keinem Fall zu einem Fraktur- oder K-Draht-bedingten Wachstumsstopp des distalen Radius. Eine Wachstumsstörung kann so in beiden Gruppen anhand des Vergleichs zwischen sonographischer Ulnavarianz zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und dem Messwert initial nach der Fraktur ausgeschlossen werden.

Allgemein betrachtet sind die Mittelwerte der sonographisch gemessenen Ulnavarianz negativer als die im Röntgen gemessenen, im konservativen Patientengut um durchschnittlich -3,8 mm, im operativen um -4,9 mm. Dies stärkt die Vermutung, dass die negativeren Werte der sonographischen Messung an der Methode liegen, jedoch sind weitere Erkenntnisse nötig. Ein denkbarer Grund wäre, dass durch das Schwenken des Schallkopfes in Richtung Ulna und die so größere Entfernung zwischen Ulna und Schallkopf als zwischen Radius und Schallkopf zu einer negativer gemessenen Ulnavarianz führt als die eigentlich vorliegende und röntgenologisch gemessene Ulnavarianz. In der Studie von Sallam et al wurden die Ulnavarianz von 896 pädiatrischen Patienten ebenfalls mit der hier verwendeten Hafner-Methode bestimmt. Die Aufschlüsselung in verschiedene Altersgruppen zeigte, dass im Kindesalter die Ulna-minus-Variante dominierend ist und sich auch im Verlauf bis etwa zum 14. Lebensjahr sehr stabil zeigt. Erst ab der Pubertät kommt

es durch die komplette Ossifizierung der distalen Ulna zu einem Anstieg der Ulnavarianz zu einer neutralen Varianz oder gar Ulna-plus-Varianz (92, 102). Im Erwachsenenalter ist die Ulna-neutral-Varianz mit ca. 60% vorherrschend, gefolgt von der Ulna-minus-Varianz mit ca. 23% und der Ulna-plus-Varianz mit 17% (103). Um die sonographischen und röntgenologischen Normwerte miteinander zu vergleichen, sollten weitere Studien diese beiden Messwerte zum gleichen Zeitpunkt untersuchen. Hierfür könnten beispielsweise Kinder, welche in der Notaufnahme bei einem Verdacht auf distale Radiusfraktur geröntgt werden, zeitgleich eine sonographische Messung der Ulnavarianz erhalten. So kann betrachtet werden, wie sich die sonographisch und röntgenologisch gemessene Ulnavarianz ohne den Einfluss einer möglichen Wachstumsstörung zueinander verhalten.

5.3 Wachstumsstörungen nach distalen Radiusfrakturen – eine Einordnung der Literatur

Obwohl in dieser vorliegenden Studie keine Wachstumsstörungen aufgezeigt werden konnten, darf die Relevanz dieser Komplikation aufgrund ihrer Tragweite nicht vernachlässigt werden.

Verglichen mit der Metaanalyse von Rai et al aus dem Jahr 2020, welche 8 Studien bezüglich des Managements bei distaler Radiusfraktur einschließt, zeigt sich ein ähnlicher Trend. Alle inkludierten Studien nutzten den Vorteil der transepiphysären K-Draht-Osteosynthese bei instabilen Frakturen. Die unterschiedlichen Qualitäten und die Heterogenität bezüglich der Ein- und Ausschlusskriterien mindern jedoch die Aussagekraft. Bei den insgesamt 1030 in dieser Metaanalyse berücksichtigten Patienten, sowohl operativ als auch konservativ therapiert, trat keine Wachstumsstörung auf (95).

Bei der zwar älteren aber größer angelegten Studie von Davis und Green 1972 zeigte einer von 547 untersuchten Patienten eine hemmende Wachstumsstörung nach konservativ behandelter distaler Radiusfraktur (36). In der ebenfalls älteren Studie von Lee et al fand sich bei 7% der Patienten mit Epiphysenfugenverletzungen ein vorzeitiger Fugenschluss. Bei 57% dieser betroffenen Patienten sei ein Kompressionsmechanismus bei Fraktur nachvollziehbar gewesen, was für eine mögliche Salter-Harris Typ V-Fraktur sprechen kann. Sie sprechen deshalb dem Frakturmechanismus eine größere Vorhersagekraft als der Frakturklassifikation nach

Salter und Harris zu. Betrachtet man allerdings nur die Patienten mit mehreren Repositionsversuchen, so erleiden sogar 27% eine Wachstumshemmung (37). Dies entspricht dem allgemeinen Konsens möglichst nur eine einmalige Reposition vorzunehmen.

Bei den 157 von Cannata nachuntersuchten Patienten waren zehn symptomatisch mit Schmerzen, verkürztem Radius, Knacksen des Handgelenkes (snapping sound) und eingeschränkter Bewegung (40).

In der Studie von Kallini et al wurden 28 Patienten mit gelenkbeteiligten Frakturen bezüglich einer Wachstumsstörung nachuntersucht. Auch hier wurde die klinische Untersuchung mithilfe des DASH-Scores und einem modifizierten Mayo-Wrist-Score konzipiert. Bei den hier nachuntersuchten Frakturen kam es bei 43% zu einer Wachstumsstörung. Davon waren 25% Salter-Harris-III und 75% Salter-Harris-IV Frakturen. Von den 12 Patienten mit Wachstumsstörung wurden 9 ohne Osteosynthese, sondern nur mit geschlossener Reposition und Gipsanlage behandelt. Der hohe Anteil an Wachstumsstörungen bei diesen Frakturen kann am ehesten die Schwere der Traumata erklärt werden (99).

Bei den von Brahee et al untersuchten 377 Patienten mit konservativ behandelter Salter-Harris-II-Fraktur des distalen Radius wurden bei insgesamt 5 Patienten, entsprechend 1,3%, eine Knochenbrücke im Bereich der radialen Wachstumsfuge festgestellt (104).

Wichtig bei der transepiphysären K-Draht-Osteosynthese ist die Positionierung des Drahtes. So konnte bei der Durchbohrung femoraler Epiphysen an Kaninchen kein Unterschied zwischen zentraler und peripherer Positionierung gefunden werden (105). Mit einem ähnlichen Versuch fanden Janarv et al heraus, dass die relative Größe der Wachstumsfugenverletzung durch den Draht 7-9% der gesamten Fuge einnehmen müsste, um eine Wachstumsstörung zu verursachen (81). Dennoch sei eine „konsequente Primärtherapie [...] mit Respekt vor der vulnerablen Biologie der Wachstumsfugen“ wichtig, um iatrogene Wachstumsstörungen zu vermeiden (30).

Diese Studien legen nahe, dass nicht nur die Therapiewahl die ausschlaggebende Ursache für eine Wachstumsstörung ist, sondern dass vor allem das erlittene Trauma, welches zur Fraktur führte und eine mögliche Epiphysenfugenbeteiligung zu einer höheren Rate an Wachstumsstörungen führt. Aufgrund ihrer Seltenheit konnten jedoch in dieser Studie keine Salter-Harris-III- und IV-Verletzungen eingeschlossen werden und dieser Umstand bekräftigt werden.

Bei der Nachuntersuchung aller distalen Radiusfrakturen, besonders jedoch solcher mit Gelenk- und Wachstumsfugenbeteiligung, sollten etwaige Wachstumsstörungen immer im Hinterkopf behalten werden und der Patient sowie die Eltern darauf sensibilisiert werden. Dies erfordert regelmäßige Nachuntersuchungen sowie eine ausführliche Aufklärung (99). Bei langfristigen, engmaschigen klinischen und radiologischen Nachkontrollen stellt sich zudem die Kosten-Nutzen-Frage nicht nur bezüglich finanzieller Aspekte, sondern auch die Strahlung bei wiederholten Röntgenbildern betreffend. Da Wachstumsstörungen sehr selten sind, muss die radiologische Diagnostik besonders bei asymptomatischen Patienten gut überlegt sein, da auch nicht jede diagnostizierte Wachstumsstörung eine therapeutische Konsequenz nach sich zieht (104). Obwohl der Schaden durch das Trauma nicht rückgängig gemacht werden kann, ist es in der weiteren Behandlung wichtig, durch die bestmögliche Therapie den weiteren Schaden und das Risiko einer Wachstumsfugenschädigung möglichst gering zu halten (99).

5.4 Stärken und Limitierungen

Da es sich bei Wachstumsstörungen um eine seltene Komplikation handelt, sollte die Prävalenz dieser auch in die Patientenanzahl miteinbezogen werden. Aus diesem Grund ist es möglich, dass die vorhandene Patientenzahl von 125 zu gering ist, um diese Komplikation darzustellen. Um genauere und valide Aussagen treffen zu können, sollte eine ähnliche Studie über einen längeren Zeitraum und mit einer größeren Patientenzahl durchgeführt werden. Das hier gewählte Zeitfenster von 6 Jahren wurde deswegen gewählt, um zu gewährleisten, dass das Follow-up zum Zeitpunkt noch offener Wachstumsfugen stattfindet. Ein multizentrisches Studiendesign könnte zu größeren Patientenzahlen führen und somit die Aussagekraft verbessern.

Da die Auswahl der Patienten durch die Selektierung der ICD-10-Codes erfolgte, könnte bereits durch eine falsche Kodierung bei initialer Behandlung der Patienten ein möglicher Ausgangsfehler der Datenlage entstanden sein. So könnten Frakturen nicht erkannt oder falsch kodiert worden sein, wodurch es zu Fehlern der Datenbank gekommen sein könnte. Bei allen Frakturen, welche durch den ICD-10-Code in die Studie eingeschlossen wurden, wurde jedoch erneut das Röntgenbild kontrolliert und

die Fraktur nochmalig bewertet und bei Nicht-Entsprechen der Kriterien aus der Studie ausgeschlossen.

Ferner wäre ein Vergleich mit der nicht-frakturierten Gegenseite interessant gewesen, um hier Unterschiede in der radioulnaren Niveaudifferenz festzustellen. Bei Zimmermann gaben 75% der Patienten mit einem Niveauunterschied von nur 2mm zwischen verletzter und unverletzter Seite Schmerzen im ulnarseitigen Handgelenk an (94).

Das wichtigste Defizit der Studie ist die Unwissenheit, wie sich die Ulnavarianz im Röntgen und in der sonographischen Nachuntersuchung zueinander verhalten. Um herauszufinden, wie sich die Ulnavarianz im Röntgen und in der Sonographie beim Gesunden zueinander verhalten, sollte eine erneute Studie angesetzt werden, welche bei Patienten mit aktuellem Röntgen zeitgleich eine sonographische Messung untersucht. In der parallel an der Klinik St. Hedwig durchgeführten Studie zur sonographischen Ulnavarianz-Messung kam man zum Ergebnis, dass die erhobenen Daten der röntgenologisch und sonographisch gemessenen Werte zur Ulnavarianz ohne weitere Nachforschungen nicht miteinander verglichen werden können. In der hier vorliegenden Studie wurden jedoch vor allem klinische Aspekte und die sonographisch sichtbare Offenheit der Fuge herangezogen. Außerdem dient die sonographische Messung der Ulnavarianz auch einer Beurteilung der Wachstumsfuge. Eine im Rahmen einer Wachstumsstörung frühzeitig verschlossene Fuge wäre sonographisch auch unabhängig von der Ulnavarianz auffällig gewesen. Die in dieser Studie angewandte Beurteilung stützt sich also auf mehrere, verschiedene Parameter, was genauere Rückschlüsse erlaubt und bei Auftreten einer Wachstumsstörung in mehreren Aspekten auffällig gewesen wäre.

In dieser Studie wurden Patienten mit geschlossenen Wachstumsfugen aufgrund des Studiendesigns bereits im Voraus ausgeschlossen. Jedoch können auch diese Patienten an einer Wachstumsstörung des distalen Radius gelitten haben, beziehungsweise immer noch an den Folgen dieser leiden. In einer größer angelegten Studie könnte man alle Patienten mit ehemaliger distaler Radiusfraktur zur Nachuntersuchung einschließen, um auch Folgen einer Wachstumsstörung bei bereits ausgewachsenen Patienten zu erkennen. Hier könnte jedoch die fehlende Schnittstelle zwischen Kinder- und Erwachsenenambulanz ab einem Alter von 18 Jahren zu einem Problem führen.

Zwar ist der Nutzen der Sonographie in dieser Studie überwiegend, jedoch ist es dadurch erst retrospektiv möglich, eine Wachstumsstörung festzustellen. Eine Früherkennung potenziell gefährdeter Frakturen wäre nur mittels MRT zu erkennen. Eine unerkannte Salter-Harris Typ-V-Fraktur ist hierbei ein gutes Beispiel, um die Grenzen des Röntgens und der Sonographie aufzuzeigen. Eine größere Chance einer gesicherten Diagnose bietet ein MRT durch die Bestätigung eines perifokalen Ödems oder später auch durch das Nachweisen von Knochenbrücken oder frühzeitigem Fugenschluss. Durch die niedrige Inzidenz schwerer Wachstumsstörungen ist der Nutzen einer MRT-Untersuchung trotz effektiver Erkennung von Fugenverletzungen aus Kosten- und Zeitgründen sowie der erschwerten Durchführbarkeit bei Kindern nicht praktikabel (39). Dies gilt nicht nur für Frakturen vom Salter-Harris Typ V, sondern kann auf alle Frakturen des distalen Radius angewandt werden, da diese ebenfalls potenziell die Gefahr einer Wachstumsstörung haben. Auch die initiale therapeutische Konsequenz bei Erkennen eines perifokalen Ödems im Rahmen frischer knöcherner Verletzungen ist gering, trotzdem hat die Untersuchung eine prognostische Bedeutung (58).

Positiv zu bewerten ist, dass eine Follow-up-Zeit von mindestens einem Jahr bei allen eingeschlossenen Patienten eingehalten werden konnte. So konnten die Patienten über einen adäquaten Zeitraum beurteilt werden. Bei einem Knochenwachstum von ungefähr 8mm pro Jahr wären Wachstumsstörungen somit mit großer Wahrscheinlichkeit auffällig geworden (25).

In dieser Studie orientierte man sich bei der Gestaltung des Fragebogens und der klinischen Untersuchung an internationalen Scores mit bereits erprobten Items. Dadurch kann eine hohe Aussagekraft erzielt werden.

Ein weiterer ausschlaggebender Vorteil dieser Studie ist die Nutzung der Sonographie. Als dynamische Untersuchung erlaubt die Sonographie eine komplette und getrennte Darstellung der Unterarmknochen, wodurch Überlagerungen, welche bei einer röntgenologischen Untersuchung auftreten können, vermieden werden. Bei Unsicherheiten kann zudem einfach die Gegenseite zum Vergleich sonographiert werden. Dies sind Vorteile gegenüber des Röntgens. Denn durch die im Vergleich zum Erwachsenen 10-fach erhöhte Strahlensensibilität des kindlichen Gewebes sollte, wenn möglich, auf ionisierende Strahlung zur Diagnostik verzichtet werden (62, 88).

Ist man, wie in dieser Studie, zudem auf die Teilnahmebereitschaft ehemaliger Patienten angewiesen, ist die hohe Akzeptanz in der Bevölkerung sowie die schnelle Untersuchung in Anwesenheit der Erziehungsberechtigten ein großer Vorteil (88). Außerdem konnte in dieser Studie durch den Interobserver Koeffizienten aufgezeigt werden, dass die hier gewählte sonographische Nachuntersuchung untersucherunabhängig ist.

6 Zusammenfassung

Da die distale Radiusfraktur die häufigste Fraktur im Kindesalter darstellt, ist die adäquate Behandlung mit einer Minimierung der Risiken besonders wichtig. Um das Outcome vor allem in Bezug auf Wachstumsstörungen zu untersuchen, wurden in dieser retrospektiven Kohortenstudie Röntgenbilder von Patienten mit distaler Radiusfraktur analysiert, welche in der Klinik für Kinderchirurgie und Kinderorthopädie in der Klinik St. Hedwig Regensburg behandelt wurden. Die ausgewählten Patienten wurden mindestens ein Jahr nach Fraktur zur sonographischen und klinischen Nachuntersuchung einbestellt. In dieser Studie wurden 125 Patienten mit insgesamt 126 Frakturen untersucht, wovon ehemals 62 konservativ mit Ruhigstellung im Gips und 64 operativ mittels fugenkreuzender K-Draht-Osteosynthese behandelt wurden. Beide Gruppen zeigten gute bis sehr gute Nachuntersuchungsergebnisse. Insbesondere eine Wachstumsstörung wurde in keiner der Gruppen festgestellt. Diese zwar seltene Komplikation hat weitreichende Folgen, nicht nur bezüglich Schmerzen, sondern auch das Bewegungsausmaß im Handgelenk, die Optik und Einschränkungen beim Bewältigen des alltäglichen Lebens betreffend. Um die Wahrscheinlichkeit einer Wachstumsstörung zu minimieren, ist es wichtig die Risikofaktoren dafür zu kennen. Dazu gehören nicht nur der Frakturtyp, sondern auch Maßnahmen bei der Therapie, auf die es zu achten gilt. Neben schonender Reposition sollte auch die Wachstumsfuge bei einer transepiphysären K-Draht-Osteosynthese ein möglichst geringes Trauma erleiden. In dieser Studie wurden die konservative und operative Therapie mit fugenkreuzender Osteosynthese als ebenbürtig in Bezug auf mögliche Wachstumsstörungen erwiesen. So kann aufgrund der hier gewonnenen Datenlage bei vorliegender OP-Indikation eine fugenkreuzende Osteosynthese ohne vermehrtes Risiko einer folgenden Wachstumsstörung durchgeführt werden.

Nichtsdestotrotz ist es wichtig, sowohl bei ärztlichem Personal als auch bei Patienten und Erziehungsberechtigten die Sensibilität für Wachstumsstörungen als posttraumatische oder iatrogene Komplikation zu schärfen. Hierzu gehören gute Aufklärungsgespräche und regelmäßige Kontrollen.

Aufgrund diverser Limitierungen dieser Studie und dem Potential weiterführender Forschung sollten größere Studien folgen.

7 Anhang

Genutzter Fragebogen zur Anamnese und klinischen Untersuchung

Datum der Untersuchung: _____

Untersucher: _____

Patienten-ID:

Geburtsdatum:

Frakturseite:

Datum Fraktur/Versorgung:

Art der Fraktur:

K-Draht:

Anmerkungen:

mit **Ultraschall gemessener Abstand in mm:** _____

Anamnese (*Unzutreffendes bitte streichen*)

- Händigkeit?: links/rechts
- Schmerzen?: nein/ja _____
- Erneute Fraktur auf dieser Seite?: nein/ja, wann: _____
- Funktionseinschränkungen:
 - Schreiben: ja/nein
 - Essen: ja/nein
 - Sonstige Auffälligkeiten: _____

Klinische Untersuchung

- Druckschmerz:
- Bewegungseinschränkungen im Vergleich zur gesunden Seite:
 - Ulnaabduktion
 - Radialabduktion
 - Palmarflexion
 - Dorsalextension
 - Pronation
 - Supination
- Länge des Unterarms:
 - Rechts:
 - Links:

8 Literatur

1. Kraus R. Epidemiologie. In: Marzi I, Hrsg. Kindertraumatologie. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg; 2016. S. 35–9.
2. Kraus R. Distale Radiusfraktur im Wachstumsalter. Trauma und Berufskrankheit 2014; 16(S1):53–60. doi: 10.1007/s10039-013-1932-y.
3. Laurer H, Sander A, Wutzler S, Walcher F, Marzi I. Therapieprinzipien distaler Unterarmfrakturen im Kindesalter. Chirurg 2009; 80(11):1042–52 [Stand: 31.07.2018]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00104-009-1750-8.pdf>.
4. Strassmair M, Wilhelm K, Friedel R, Dönicke T, Weinberg A-M, Schmidt B. Distale Radiusfraktur (Verletzung der distalen radioulnaren Funktionseinheit). In: Towfigh H, Hrsg. Frakturen und Luxationen der Hand. Berlin: Springer; 2014. S. 295–352 [Stand: 13.08.2018].
5. Salter RB, Harris RW. Injuries Involving the Epiphyseal Plate. Bone Joint J 1963; 45(3):587–622. doi: 10.2106/00004623-196345030-00019.
6. Lieber J. Wachstumsverhalten nach Frakturen des distalen Unterarms: Gründe für die hohe Rate an Übertherapie. Unfallchirurg 2014; 117(12):1092–8. doi: 10.1007/s00113-014-2633-0.
7. Waters PM, Bae DS. Fractures of the Distal Radius and Ulna. In: Beaty JH, Kasser JR, Hrsg. Rockwood and Wilkins Fractures in Children, 7th Edition; 2010. 292-346.
8. Kraus R, Wessel L. Frakturbehandlung an der oberen Extremität bei Kindern und Jugendlichen. Dtsch Arztebl Int 2010; 107(51-52):903–10. doi: 10.3238/arztebl.2010.0903.
9. Matussek J. Kindertraumatologie. In: Matussek J, Hrsg. Kinderorthopädie und Kindertraumatologie. Berlin: Springer; 2013. S. 129–38 (SpringerLink) [Stand: 14.08.2018].
10. Täger G, Podleska LE, Ruchholtz S, Sommerfeldt D, Nast-Kolb D. Epiphysennahe Frakturen bei Kindern : Teil I: Obere Extremität. Unfallchirurg 2007; 110(10):867-82; quiz 883. doi: 10.1007/s00113-007-1336-1.
11. Nguyen JC, Markhardt BK, Mellow AC, Dwek JR. Imaging of Pediatric Growth Plate Disturbances. Radiographics 2017; 37(6):1791–812. doi: 10.1148/rg.2017170029.
12. Laer Lv. Verletzungsformen. In: Marzi I, Hrsg. Kindertraumatologie. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg; 2016. S. 15–22.
13. Kertai M, Reingruber B. Frakturen des Unterarms beim Kind. Trauma und Berufskrankheit 2015; 17(S1):83–8. doi: 10.1007/s10039-013-1988-8.
14. Peterson HA. Epiphyseal Growth Plate Fractures. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-33802-4>.

15. Frank J, Pralle H, Marzi I. Funktionelle Anatomie und Biomechanik des Handgelenkes und distalen Radioulnargelenkes. *OP-Journal* 2003; 19(1):4–9. doi: 10.1055/s-2007-979464.
16. Hultén O. Über Anatomische Variationen der Handgelenkknochen. *Acta Radiologica* 1928; 9(2):155–68. doi: 10.3109/00016922809176658.
17. Krukhaug Y. Biomechanics and Kinematics of the Wrist. In: Hove LM, Lindau T, Hølmer P, Hrsg. *Distal Radius Fractures*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2014. S. 31–5.
18. Weinberg A-M, Altermatt S, Hell A, Reilmann H. Unterarm. In: Weinberg A-M, Tscherne H, Henkel R, Hrsg. *Tscherne Unfallchirurgie: Unfallchirurgie im Kindesalter*. Dordrecht: Springer; 2006. 303-404 [Stand: 13.08.2018].
19. Palmer AK, Werner FW. Biomechanics of the distal radioulnar joint. *Clin Orthop Relat Res* 1984; (187):26–35.
20. Adams BD. Effects of radial deformity on distal radioulnar joint mechanics. *The Journal of Hand Surgery* 1993; 18(3):492–8. doi: 10.1016/0363-5023(93)90098-N.
21. Ploss C, Rose S, Marzi I. Unterarm. In: Marzi I, Hrsg. *Kindertraumatologie*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg; 2016. S. 209–48.
22. Xian CJ, Foster BK. The Biologic Aspects of Children's Fractures. In: Beaty JH, Kasser JR, Hrsg. *Rockwood and Wilkins Fractures in Children, 7th Edition*; 2010. 18-44 [Stand: 08.08.2018].
23. Weinberg A-M, Hofmann A, Claus P. Molekulare, physiologische und anatomische Grundlagen der Knochenentwicklung. In: Weinberg A-M, Tscherne H, Henkel R, Hrsg. *Tscherne Unfallchirurgie: Unfallchirurgie im Kindesalter*. Dordrecht: Springer; 2006. S. 3–14 [Stand: 13.08.2018].
24. Laer Lv. Knochenwachstum und Knochenheilung. In: Marzi I, Hrsg. *Kindertraumatologie*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg; 2016. S. 3–13.
25. Rathjen KE, Birch JG. Physeal Injuries and Growth Disturbances. In: Beaty JH, Kasser JR, Hrsg. *Rockwood and Wilkins Fractures in Children, 7th Edition*; 2010. S. 91–119 [Stand: 01.08.2018].
26. Breitfuss H, Weinberg A-M, Muhr G. Wachstumsphänomene bei Frakturen im Kindesalter: Spontankorrekturen und Wachstumsstörungen. In: Weinberg A-M, Tscherne H, Henkel R, Hrsg. *Tscherne Unfallchirurgie: Unfallchirurgie im Kindesalter*. Dordrecht: Springer; 2006. S. 39–49 [Stand: 13.08.2018].
27. Kraus R, Reyers J, Alt V, Schnettler R, Berthold LD. Physiological closure of the physeal plate of the distal radius: An MRI analysis. *Clin Anat* 2011; 24(8):1010–5. doi: 10.1002/ca.21199.
28. Duncan RD. Growth and Its Variants. In: Bleck EE, Benson M, Hrsg. *Children's orthopaedics and fractures*. 3rd ed. London, New York: Springer; 2010. S. 11–22.

29. Dietz H-G, Illing P, Schmittenebecher P, Slongo T, Sommerfeldt D, Hrsg. Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011.
30. Schmittenebecher P. Posttraumatische (Wachstums-)Störungen am Unterarm im Kindesalter. Trauma Berufskrankh 2012; 14(4):255–62. doi: 10.1007/s10039-012-1915-4.
31. Gauger EM, Casnovsky LL, Gauger EJ, Bohn DC, van Heest AE. Acquired Upper Extremity Growth Arrest 2017; 40(1):e95-e103. doi: 10.3928/01477447-20160926-07.
32. Laer Lv. Wachstumsverhalten nach Fugenverletzungen: Bedeutung von "wasserdichten" Osteosynthesen. Unfallchirurg 2014; 117(12):1071–84. doi: 10.1007/s00113-014-2631-2.
33. Carsi B, Abril JC, Epeldegui T. Longitudinal growth after nonphyseal forearm fractures. J Pediatr Orthop B 2003; 23(2):203–7.
34. Crilly RG. Longitudinal overgrowth of chicken radius. J Anat 1972; 112(Pt 1):11–8.
35. Mizuta T, Benson WM, Foster BK, Paterson DC, Morris LL. Statistical analysis of the incidence of physeal injuries. J Pediatr Orthop B 1987; 7(5):518–23.
36. Donald R. Davis, David P. Green. Forearm Fractures in Children: Pitfalls and Complications 1972:172–84.
37. Lee BS, Esterhai JL, Das M. Fracture of the distal radial epiphysis. Characteristics and surgical treatment of premature, post-traumatic epiphyseal closure. Clin Orthop Relat Res 1984; (185):90–6.
38. Doarn MC. Premature Physeal Closure of an Extraphyseal Distal Radius Fracture Secondary to Smooth Kirschner Wire Fixation: A Case Report. Open J Trauma 2017; 2(1):1–4. doi: 10.17352/ojt.000016.
39. Tang CW, Kay RM, Skaggs DL. Growth arrest of the distal radius following a metaphyseal fracture: Case report and review of the literature. J Pediatr Orthop B 2002; 11(1):89–92.
40. Cannata, Giuseppe; De Maio, Fernando; Mancini, Federico; Ippolito, Ernesto. Physeal Fractures of the Distal Radius and Ulna: Long-Term Prognosis. J Orthop Trauma 2003.
41. Waters PM, Bae DS, Montgomery KD. Surgical Management of Posttraumatic Distal Radial Growth Arrest in Adolescents. J Pediatr Orthop B 2002; 22(6):717–24. doi: 10.1097/01241398-200211000-00004.
42. Chimenti P, Hammert W. Posttraumatic distal ulnar physeal arrest: a case report and review of the literature. Hand (N Y) 2013; 8(1):115–9 [Stand: 24.10.2023]. Verfügbar unter:
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3574474/pdf/11552_2012_Article_9464.pdf.

43. Horii E, Tamura Y, Nakamura R, Miura T. Premature closure of the distal radial physis. *J Hand Surg Br* 1993; 18(1):11–6.
44. Kennon JC, Ganey TM, Gaston RG, Ogden JA. Continued growth after limited physeal bridging. *J Pediatr Orthop B* 2013; 33(8):857–61. doi: 10.1097/BPO.0b013e31829c008b.
45. Abzug JM, Little K, Kozin SH. Physeal arrest of the distal radius. *J Am Acad Orthop Surg* 2014; 22(6):381–9. doi: 10.5435/JAAOS-22-06-381.
46. Ramoutar DN, Shivji FS, Rodrigues JN, Hunter JB. The outcomes of displaced paediatric distal radius fractures treated with percutaneous Kirschner wire fixation: A review of 248 cases. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2015; 25(3):471–6. doi: 10.1007/s00590-014-1553-6.
47. Strassmair M. Unterarmfraktur beim Kind: Wann konservativ, wann operativ behandeln? *Orthop. Rheuma* 2016; 19(3):18–21 [Stand: 24.10.2023]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs15002-016-0909-1.pdf>.
48. Dallek M, Meenen NM, Herresthal-Mohr D, Jungbluth K-H. Interne Kallusdistraktion im Epiphysenfugendefektein physiologischer Weg der Spontankorrektur. *Unfallchirurgie* 1993; 19(4):202–7. doi: 10.1007/BF02588054.
49. Ogden JA. Transphyseal linear ossific striations of the distal radius and ulna. *Skeletal Radiology* 1990; 19(3):173–80.
50. Gkiokas A, Brilakis E. Spontaneous correction of partial physeal arrest: report of a case and review of the literature. *J Pediatr Orthop B* 2012; 21(4):369–72. doi: 10.1097/BPB.0b013e328347a42d.
51. Nordentoft EL. Experimental epiphyseal injuries. Grading of traumas and attempts at treating traumatic epiphyseal arrest in animals. *Acta Orthop Scand* 1969; 40(2):176–92.
52. Strobino LJ, French GO, Colonna PC. The effect of increasing tensions on the growth of epiphyseal bone. *Surg Gynecol Obstet* 1952; 95(6):694–700.
53. Safran MR, Eckardt JJ, Kabo JM, Oppenheim WL. Continued growth of the proximal part of the tibia after prosthetic reconstruction of the skeletally immature knee. Estimation of the minimum growth force in vivo in humans. *Bone Joint J* 1992; 74(8):1172–9.
54. Campbell CJ, Grisolia A, Zanconato G. The effects produced in the cartilaginous epiphyseal plate of immature dogs by experimental surgical traumata. *J Bone Joint Surg Am* 1959; 41-A:1221–42.
55. Laer Lv, Kraus R, Linhart W. *Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter*. 6., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2013.
56. Laer Lv, Gruber R, Dallek M, Dietz H-G, Kurz W, Linhart W et al. Classification and Documentation of Children's Fractures. *Eur J Trauma* 2000; 26(1):2–14. doi: 10.1007/PL00002434.

57. Mayr J. Epiphysen- und Apophysenverletzungen. In: Weinberg A-M, Tscherne H, Henkel R, Hrsg. Tscherne Unfallchirurgie: Unfallchirurgie im Kindesalter. Dordrecht: Springer; 2006. S. 15–37 [Stand: 13.08.2018].
58. Jungbluth K-H, Dallek M, Meenen NM. Verletzungen der Wachstumsfugen. Unfallchirurg 1997; 100(7):571–86. doi: 10.1007/s001130050160.
59. Macnicol M, Parsch K. Wrist and Hand Fractures. In: Bleck EE, Benson M, Hrsg. Children's orthopaedics and fractures. 3rd ed. London, New York: Springer; 2010. S. 743–50 [Stand: 13.08.2018].
60. Accadbled F, Foster BK. Management of Growth Plate Injuries. In: Bleck EE, Benson M, Hrsg. Children's orthopaedics and fractures. 3rd ed. London, New York: Springer; 2010. S. 687–99 [Stand: 13.08.2018].
61. Worel AM, Slongo T. Behandlungsprinzipien. In: Marzi I, Hrsg. Kindertraumatologie. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg; 2016. S. 53–78.
62. Eckert K, Ackermann O. Fraktursonografie im Kindesalter. Unfallchirurg 2014; 117(4):355–68 [Stand: 24.10.2023]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00113-014-2561-z.pdf>.
63. Beslikas TA, Dadoukis DJ, Nenopoulos SP, Chrestoforides JE. A completely displaced Salter-Harris I fracture of the distal radial epiphysis with intact ulna: a case report and review of the literature. Acta Chir Belg 2005; 105(5):539–42.
64. Pachucki A, Freudenschuss B. Korrektur der in Fehlstellung verheilten distalen Radiusfraktur. In: Towfigh H, Hrsg. Frakturen und Luxationen der Hand. Berlin: Springer; 2014. S. 353–75 [Stand: 24.10.2023].
65. Strohm PC, Müller CA, Boll T, Pfister U. Two procedures for Kirschner wire osteosynthesis of distal radial fractures. A randomized trial. Bone Joint J 2004; 86-A(12):2621–8.
66. Illian C, Veigel B, Chylarecki C. Osteosyntheseverfahren in der Kinder- und Jugendtraumatologie 2013:578-583.
67. Kosuge D, Barry M. Changing trends in the management of children's fractures. Bone Joint J 2015; 97-B(4):442–8 [Stand: 24.10.2023]. Verfügbar unter: <https://online.boneandjoint.org.uk/doi/pdf/10.1302/0301-620X.97B4.34723>.
68. Meier R, Krettek C, Probst C. Die Versorgung der distalen Radiusfraktur. Kirschner-Draht-Osteosynthese oder palmare winkelstabile Platte? Unfallchirurg 2012; 115(7):598–605. doi: 10.1007/s00113-012-2180-5.
69. Fritz T, Heyer T, Krieglstein C, Mattern R, Kallieris D, Friedl W. Biomechanik der kombinierten Kirschnerdraht-Osteosynthese am humanen Modell der dorsal instabilen, distalen Radiusfraktur (Colles-Typ). Chirurg 1997; 68(5):496–502. doi: 10.1007/s001040050219.
70. Wittner B, Holz U. Die geschlossene Reposition und Spickdrahtosteosynthese dislozierter distaler Radiusfrakturen. Operat Orthop Traumatol 1993; 5(4):286–90. doi: 10.1007/BF02511312.

71. Schweigkofler U, Hofmann T, Hoffmann R. Isolierte und additive Kirschner-Draht-Osteosynthese der distalen Radiusfraktur. *Trauma und Berufskrankheit* 2007; 9(1):14–8. doi: 10.1007/s10039-007-1209-4.
72. Czerny F, Linhart W, Rueger JM, Sommerfeldt D, Pannike A. Frakturen im Bereich des Unterarms bei Kindern. *Unfallchirurgie* 1994; 20(4):203–10 [Stand: 24.10.2023]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F02588713.pdf>.
73. Hotz T. Osteosynthese distaler Radiusfrakturen mit der Kirschner-Draht-Osteosynthese. *OP-Journal* 2003; 19(1):21–7. doi: 10.1055/s-2007-977610.
74. Ali AM, El-Alfy B, Attia H. Is there a safe zone to avoid superficial radial nerve injury with Kirschner wire fixation in the treatment of distal radius? A cadaveric study. *J Clin Orthop Trauma* 2014; 5(4):240–4. doi: 10.1016/j.jcot.2014.05.012.
75. Schneidmüller D, Kertai M, Bühren V, Rüden C von. Kirschner-Draht-Osteosynthese bei Frakturen im Kindesalter: Drähte versenken oder nicht? : Ergebnisse einer Umfrage zur Versorgungsrealität in Deutschland. *Unfallchirurg* 2018. doi: 10.1007/s00113-018-0465-z.
76. Firth GB, Robertson AJ. Treatment of distal radius metaphyseal fractures in children: a case report and literature review. *SA orthop. j.* 2017; 16(4). doi: 10.17159/2309-8309/2017/v16n4a10.
77. Battle J, Carmichael KD. Incidence of pin track infections in children's fractures treated with Kirschner wire fixation. *J Pediatr Orthop* 2007; 27(2):154–7. doi: 10.1097/bpo.0b013e3180317a22.
78. Tosti R, Foroohar A, Pizzutillo PD, Herman MJ. Kirschner wire infections in pediatric orthopaedic surgery. *J Pediatr Orthop* 2015; 35(1):69–73. doi: 10.1097/BPO.000000000000208.
79. Smith JT, Kasser JR, Waters PM, Jaramillo D, Kocher MS. The Effect of Pinning Across the Pysis for Stabilization of Fractures in Children: An MRI Evaluation 2008:99–102.
80. Horn J, Kristiansen LP, Steen H. Partial physeal arrest after temporary transphyseal pinning—a case report. *Acta Orthop* 2008; 79(6):867–9. doi: 10.1080/17453670810016975.
81. Janarv P-M, Wikström B, Hirsch G. The Influence of Transphyseal Drilling and Tendon Grafting on Bone Growth: An Experimental Study in the Rabbit. *J Pediatr Orthop B* 1998; 18(2). Verfügbar unter: https://journals.lww.com/pedorthopaedics/Fulltext/1998/03000/The_Influence_of_Transphyseal_Drilling_and_Tendon.4.aspx.
82. Gál P, Teyschl O, Kecová H, Fabián P, Bibrová Š. Influence of Transphyseal Pin Placement on Bone Growth: an Experimental Study in Pigs. *Acta Vet. Brno* 2002; 71(3):319–25. doi: 10.2754/avb200271030319.
83. Boelitz R, Dallek M, Meenen NM, Jungbluth K-H. Die Reaktion der Epiphysenfuge auf fügenkreuzende Bohrdrahtosteosynthesen. *Unfallchirurgie* 1994; 20(3):131–7. doi: 10.1007/BF02588157.

84. Hajdu S, Schwendenwein E, Kaltenecker G, László I, Lang S, Vécsei V et al. The effect of drilling and screw fixation of the growth plate--an experimental study in rabbits. *J Orthop Res* 2011; 29(12):1834–9. doi: 10.1002/jor.21463.
85. Haas SL. Restriction of bone growth by pins through the epiphyseal cartilaginous plate. *Bone Joint J* 1950; 32(2):338–50. doi: 10.2106/00004623-195032020-00012.
86. Großmann D, Barthlen W. Dislozierte distale Unterarmfraktur im Kindesalter. *Trauma Berufskrankh* 2014; 16(S2):197–201 [Stand: 24.10.2023]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10039-013-2012-z.pdf>.
87. Hafner R, Poznanski AK, Donovan JM. Ulnar variance in children ? : Standard measurements for evaluation of ulnar shortening in juvenile rheumatoid arthritis, hereditary multiple exostosis and other bone or joint disorders in childhood. *Skeletal Radiology* 1989; 18(7):513–6. doi: 10.1007/BF00351750.
88. Eckert K, Ackermann O, Schweiger B, Radeloff E, Liedgens P. Die Sonografie als sichere Alternative zur konventionellen Röntgendiagnostik bei distalen Unterarmfrakturen im Kindesalter. *Z Orthop Unfall* 2012; 150(4):409–14. doi: 10.1055/s-0032-1314974.
89. Ng L, Saul T, Lewiss RE. Sonographic baseline physeal plate width measurements in healthy, uninjured children. *Pediatr Emerg Care* 2014; 30(12):871–4. doi: 10.1097/PEC.0000000000000290.
90. Kawanishi Y, Moritomo H, Omori S, Kataoka T, Murase T, Sugamoto K. A comparison of 3-D computed tomography versus 2-D radiography measurements of ulnar variance and ulnolunate distance during forearm rotation. *J Hand Surg Eur Vol* 2014; 39(5):526–32. doi: 10.1177/1753193413516238.
91. Serfaty A, Costa HP, Foelker CE, Filho ENK, Souza FF, Bordalo-Rodrigues M. Evaluation of ulnar variance on wrist MR imaging: is it a reliable measure? *Skeletal Radiology* 2020; 49(5):723–30. doi: 10.1007/s00256-019-03339-1.
92. Knapik DM, Kolaczko JG, Drummond I, Liu RW. Longitudinal analysis of pediatric distal radius alignment parameters in a cohort of serial radiographs. *Clin Anat* 2021; 34(3):365–70. doi: 10.1002/ca.23642.
93. Kox LS, Jens S, Lauf K, Smithuis FF, van Rijn RR, Maas M. Well-founded practice or personal preference: a comparison of established techniques for measuring ulnar variance in healthy children and adolescents. *Eur Radiol* 2020; 30(1):151–62. doi: 10.1007/s00330-019-06354-x.
94. Zimmermann R, Gabl M, Angermann P, Lutz M, Reinhart C, Kralinger F et al. Spätfolgen nach Frakturen im distalen Unterarmdrittel im Wachstumsalter. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2000; 32(4):242–9. doi: 10.1055/s-2000-10933.
95. Rai P, Haque A, Abraham A. A systematic review of displaced paediatric distal radius fracture management: Plaster cast versus Kirschner wiring. *J Clin Orthop Trauma* 2020; 11(2):275–80. doi: 10.1016/j.jcot.2019.03.021.
96. Hassan FOA. Hand dominance and gender in forearm fractures in children. *Strategies Trauma Limb Reconstr* 2008; 3(3):101–3 [Stand: 24.10.2023].

Verfügbar

unter:

https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2599801/pdf/11751_2008_Article_48.pdf

97. Kraus R, Schneidmüller D, Röder C. Häufigkeit von Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter. *Deutsches Ärzteblatt* 2005; 102(12):A 838 - A 842. doi: 10.1007/978-3-322-89929-3_7.
98. Borton David F.R.C.S.I., Masterson, Eric B.Sc, F.R.C.S.I., O'Brien, Timothy M.Ch., F.R.C.S.I. Distal Forearm Fractures in Children: The Role of Hand Dominance. *J Pediatr Orthop B*; July-August 1994(14):496–7.
99. Kallini JR, Fu EC, Shah AS, Waters PM, Bae DS. Growth Disturbance Following Intra-articular Distal Radius Fractures in the Skeletally Immature Patient. *J Pediatr Orthop* 2020. doi: 10.1097/BPO.0000000000001626.
100. Laer Lv, Schneidmüller D, Hell A-K. Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. 7., vollständig überarbeitete Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag; 2020.
101. Pritchett JW. Growth and development of the distal radius and ulna. *J Pediatr Orthop B* 1996; 16(5):575–7.
102. Sallam AA, Briffa N, Mahmoud SS, Imam MA. Normal Wrist Development in Children and Adolescents: A Geometrical Observational Analysis Based on Plain Radiographs. *J Pediatr Orthop* 2020; 40(9):e860-e872. doi: 10.1097/BPO.0000000000001584.
103. Christopoulos G, Fodor S, Hahn P, Heuck A, Horwitz AE, Kalb K et al. Anatomische und funktionelle Grundlagen für die Diagnostik an der Hand: Karpale Funktion und Morphometrie. In: Schmitt R, Lanz U, Hrsg. *Bildgebende Diagnostik der Hand*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2015. S. 184.
104. Brahee DD, Smith EA. Clinical utility and economic impact of routine delayed follow-up radiographs in children with uncomplicated distal radius Salter-Harris 2 fractures. *Pediatr Radiol* 2021; 51(7):1231–6. doi: 10.1007/s00247-021-04967-3.
105. Dahl WJ, Silva S, Vanderhave KL. Distal femoral physeal fixation: are smooth pins really safe? *J Pediatr Orthop B* 2014; 34(2):134–8. doi: 10.1097/BPO.0000000000000083.

9 Selbstständigkeitserklärung

“Ich, Laura Huber, Geburtsname Weichselgartner, geboren am 10.09.1994 in Vilsbiburg, erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Insbesondere habe ich nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Laura Huber, Regensburg