

Aus dem Lehrstuhl für Chirurgie  
Prof. Dr. med. Hans Jürgen Schlitt  
der Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

**Die Sonografie als Screeningmethode posttraumatischer  
Wachstumsstörungen des distalen Radius  
im Kindes- und Jugendalter**

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin

der  
Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

vorgelegt von  
Sophie Petronella Haarbeck

2024



Aus dem Lehrstuhl für Chirurgie  
Prof. Dr. med. Hans Jürgen Schlitt  
der Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

**Die Sonografie als Screeningmethode posttraumatischer  
Wachstumsstörungen des distalen Radius  
im Kindes- und Jugendalter**

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin

der  
Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

vorgelegt von  
Sophie Petronella Haarbeck

2024

Dekan: Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Hans Jürgen Schlitt

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Michael Melter

Tag der mündlichen Prüfung: 09.04.2024

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Definition distaler Radius	2
2.2	Epidemiologie	2
2.2.1	Frakturen am distalen Unterarm	2
2.2.2	Isolierte Frakturen des distalen Radius	3
2.2.3	Kombinierte Frakturen des distalen Unterarms	3
2.3	Frakturklassifikationen	3
2.3.1	Typische Frakturen des Kindes- und Jugendalters ohne Beteiligung der Epiphysenfuge	4
2.3.2	Typische Frakturen des Kindes- und Jugendalters mit Beteiligung der Epiphysenfuge	4
2.3.3	Häufigkeit der Frakturtypen am distalen Radius	4
2.4	Ätiologie	5
2.5	Physiologisches Wachstum des Unterarms	5
2.5.1	Beteiligung der verschiedenen Epiphysenfugen am Längenwachstum des Radius	5
2.5.2	Wachstumsgeschwindigkeit des Radius	6
2.6	Wachstumsstörungen des Unterarms	7
2.6.1	Stimulative und hemmende Wachstumsstörungen	7
2.6.2	Häufigkeit hemmender Wachstumsstörungen nach distaler Radiusfraktur	8
2.6.3	Häufigkeit hemmender Wachstumsstörungen nach distaler Ulnafraktur	8
2.6.4	Untersuchungsmethoden	8
2.7	Begriffsdefinition Ulnavarianz	9
2.7.1	Messmethoden der Ulnavarianz	10

2.7.2	Normwerte der Ulnavarianz bei Kindern und Jugendlichen .....	11
2.8	Einsatzmöglichkeiten der Sonografie zur Diagnostik am Handgelenk .....	12
<b>3</b>	<b>Materialien und Methoden .....</b>	<b>14</b>
3.1	Probekollektiv und Interrater-Reliabilität .....	14
3.2	Ein- und Ausschlusskriterien des Patientenkollektivs .....	14
3.3	Patientenrekrutierung .....	15
3.4	Follow-Up.....	16
3.5	Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna .....	16
3.5.1	Definition zentraler Begriffe und der verwendeten Vorzeichen .....	16
3.5.2	Messmethode Röntgen.....	17
3.5.3	Messmethode Sonografie.....	21
3.6	Verwendung der per Sonografie und Röntgen erhobenen Längendifferenzen von Radius und Ulna zur Diagnostik einer hemmenden Wachstumsstörung des distalen Radius .....	24
3.7	Statistische Analyse.....	25
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>26</b>
4.1	Probekollektiv .....	26
4.1.1	Intraklassen-Korrelationskoeffizient .....	26
4.2	Gesamte Studienpopulation.....	27
4.2.1	Statistische Daten .....	27
4.2.2	Längendifferenz von Radius und Ulna gemessen per Röntgen .....	28
4.2.3	Längendifferenz von Radius und Ulna gemessen per Sonografie .....	29
4.2.4	Sonografie und Röntgen im Vergleich .....	31
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>32</b>
5.1	Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna per Röntgen.....	32
5.2	Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna per Sonografie .....	35
5.2.1	Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Probekollektivs .....	35

5.2.2	Vergleich der sonografisch ermittelten Werte zur bestehenden Literatur	36
5.2.3	Vorteile der selbst entwickelten sonografischen Methode	36
5.2.4	Nachteile der selbst entwickelten sonografischen Methode	37
5.3	Lassen sich Wachstumsstörungen des distalen Radius anhand der Differenz von den per Sonografie und Röntgen erhobenen Werten diagnostizieren? ..	38
5.3.1	Die anfängliche Hypothese	38
5.3.2	Vergleich von röntgenologischer und sonografischer Methode	39
5.4	Sind Wachstumsstörungen am distalen Unterarm mittels der selbst entwickelten sonografischen Methode diagnostizierbar? ..	41
5.4.1	Isolierte Wachstumsstörungen des distalen Radius	41
5.4.2	Kombinierte Wachstumsstörungen von distalem Radius und distaler Ulna	44
5.4.3	Isolierte Wachstumsstörungen der distalen Ulna	44
5.5	Zukünftige Studien	46
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>49</b>
7.1	Fragebogen	49
7.2	Längendifferenz von Radius und Ulna gemessen per Sonografie im Probekollektiv	50
7.3	Abbildungsverzeichnis	51
7.4	Tabellenverzeichnis	52
7.5	Abkürzungsverzeichnis	52
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>53</b>

# 1 Einleitung

Distale Radiusfrakturen sind die häufigsten Frakturen im Kindes- und Jugendalter (Randsborg et al. 2013). Bei gleichzeitiger Verletzung der Wachstumsfuge oder sie versorgender Gefäße besteht das Risiko einer Wachstumsstörung. Eine kurzfristige überschießende Wachstumsreaktion ist häufig und unproblematisch. Verschließt sich die Wachstumsfuge jedoch frühzeitig, kann dies zu schwerwiegenden Komplikationen wie Schmerzen und Bewegungseinschränkungen führen. Bis heute sind Röntgen und CT die etablierten Verfahren zur Diagnostik von Wachstumsstörungen. Da im Vergleich zum Erwachsenen das kindliche Gewebe eine ca. zehnfach höhere Strahlensensibilität (Brenner et al. 2001) (Hall 2002) aufweist, ist die Entwicklung einer alternativen Diagnostikmethode dringend sinnvoll. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Sonografie als strahlenfreie, schnell und einfach im klinischen Alltag anwendbare Screeningmethode von Wachstumsstörungen des distalen Radius zu testen. In zwei Schritten soll die Längendifferenz von Ulna und Radius einerseits auf Röntgenbildern, welche zum Zeitpunkt des Traumas entstanden, und andererseits auf sonografischen Bildern, die im Rahmen eines Follow-Ups erhoben werden, ermittelt werden. Hierbei sollen Praktikabilität, diagnostische Sicherheit und eventuelle Einschränkungen der Methode erarbeitet werden. Lässt sich die Längendifferenz von Radius und Ulna per Sonografie messen? Bis zu welchem Alter lässt sich die Wachstumsfuge sonografisch darstellen? Inwieweit stimmen die Werte der per Sonografie erhobenen Längendifferenz mit denen, die im Röntgen gemessen wurden, überein?

Die vorliegende Arbeit ist Teil einer größeren Fragestellung. Bewährt sich die Methode, soll in einer weiteren Arbeit die Inzidenz von Wachstumsstörungen nach distaler Radiusfraktur im Kindes- und Jugendalter ermittelt werden. Bei vorliegender Indikation zur operativen Versorgung einer distalen Radius- bzw. Unterarmfraktur ist das etablierte Verfahren die geschlossene, in Ausnahmefällen offene, Reposition der Fraktur und die Kirschnerdraht-Osteosynthese. Zur Einbringung des Drahtes gibt es zwei verschiedenen Methoden. Die biomechanisch stabilere Variante ist ein Draht, der möglichst senkrecht zur Frakturlinie und somit fugenkreuzend eingebracht wird. Kritiker dieses Verfahrens sind der Meinung, dass durch den Bohrkanal des Drahtes durch die Fuge vermehrt Wachstumsstörungen hervorgerufen werden und bringen

den Draht, biomechanisch ungünstiger, proximal der Fuge ein. Die Hypothese des zweiten, parallel laufenden Forschungsprojekts besagt, dass es keinen signifikanten Unterschied bezüglich Wachstumsstörungen zwischen operativ mittels fugen-kreuzender Methode und konservativ versorgten Kindern gibt. Um diese Hypothese zu unterstützen, werden operativ versorgte Kinder im Vergleich mit konservativ behandelten Kindern, bei denen postoperative Komplikationen ausgeschlossen sind, nachuntersucht. Somit könnte die biomechanisch stabilere Variante empfohlen werden, da es durch diese zusätzlich zu weniger sekundären Dislokationen kommen soll.

## **2 Grundlagen**

### **2.1 Definition distaler Radius**

Der Bereich des distalen Radius setzt sich zusammen aus Epiphyse, Epiphysenfuge und Metaphyse des distalen Radius. Nach der *AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF)* (2018) ist die Metaphyse als Quadrat auf der Epiphysenfuge definiert, dessen Seitenlängen der längsten Ausbreitung der Epiphysenfuge entsprechen. Bei paarigen Knochen wird das Quadrat über die Breite beider Epiphysenfugen gezogen. Frakturen am distalen Radius entsprechen nach der *AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF)* (2018) dem Code 23r-M oder 23r-E.

### **2.2 Epidemiologie**

Bei Kindern und Jugendlichen finden sich 70,0 % (Brudvik und Hove 2003) bis 82,2 % (Rennie et al. 2007) der Frakturen an den oberen Extremitäten. Neben Frauen ab dem 50. Lebensjahr mit postmenopausaler Osteoporose, zählen Jugendliche zwischen 9 - 18 Jahren zu den zwei Gruppen mit erhöhtem Risiko für distale Radiusfrakturen (Siebert und Klönz 2006).

#### **2.2.1 Frakturen am distalen Unterarm**

Der distale Unterarm ist bei 19,4 % (Laer et al. 2007) bis 32,0 % (Rennie et al. 2007) der Frakturen im Kindes- und Jugendalter betroffen. Die große Differenz lässt sich durch die unterschiedlichen Alterseinschränkungen der Patientenkollektive erklären. Kraus et al. (2005) beschrieben einen Anteil von 41,6 % distaler Unterarmfrakturen

an Frakturen der langen Röhrenknochen im Kindes- und Jugendalter. Da sie einen Anteil von 55,0 % Frakturen der langen Röhrenknochen an sämtlichen Frakturen im Kindes- und Jugendalter voraussetzten, errechneten sie einen Anteil von 23,1 % distaler Unterarmfrakturen an allen knöchernen Frakturen.

### **2.2.2 Isolierte Frakturen des distalen Radius**

Studien, die konkret die Epidemiologie des distalen Radius untersuchen, gibt es weniger. In der Altersgruppe der unter 16-Jährigen befinden sich 27,0 % (Brudvik und Hove 2003) bis 31,0 % (Randsborg et al. 2013), bei den unter 17-Jährigen 25,5 % (Mizuta et al. 1987) der knöchernen Verletzungen am distalen Radius.

Mizuta et al. (1987) untersuchten 1974 Frakturen von Kindern mit einem Durchschnittsalter von 8,2 Jahren. Mit 28,3 % aller Salter-Harris-Frakturen, war die distale radiale Epiphysenfuge die häufigste betroffene Fuge der Röhrenknochen. Innerhalb der distalen Radiusfrakturen zeigten 20,5 % eine Beteiligung der Epiphysenfuge.

### **2.2.3 Kombinierte Frakturen des distalen Unterarms**

In der Literatur ist die Beteiligung der Ulna bei distalen Radiusfrakturen mit sehr unterschiedlichen Zahlen beschrieben. Dies lässt sich anhand der verschiedenen Einschlusskriterien für Patienten der jeweiligen Studien erklären. Kraus et al. (2005) entdeckten in ihrer Studie zu insgesamt 681 Frakturen der langen Röhrenknochen gleich viel isolierte wie kombinierte distale Radiusfrakturen, somit 50,0% Ulnabeteiligung. Nur dislozierte, extraphyseale distale Radiusfrakturen betrachtend, wiesen Goldstein et al. (2013) 52,0 % Ulnabeteiligung bei 45 Patienten nach. Mit 11,0 % beschrieben Zoetsch et al. (2013) die niedrigste Beteiligung der Ulna. Sie beschränkten sich in ihrer Studie auf Begleitfrakturen des Proc. styloideus ulnae und erhoben in einem Kollektiv von 471 Kindern mit distaler Radiusfraktur 51 mit der genannten, spezifischen Kombination.

## **2.3 Frakturklassifikationen**

Die besondere Beschaffenheit des wachsenden Knochens führt zu Frakturtypen, welche im Erwachsenenalter nicht mehr auftreten. Frakturen, bei denen die Epiphysenfuge verschont bleibt, sind dabei deutlich häufiger als jene mit Epiphysenfugenbeteiligung.

### **2.3.1 Typische Frakturen des Kindes- und Jugendalters ohne Beteiligung der Epiphysenfuge**

Wulst- bzw. Stauchungsbrüche entstehen durch starke Kompression des Knochens. Die Kortikalis bleibt intakt und es entsteht nur eine „Beule“, die auf dem Röntgenbild teilweise schwer zu erkennen ist. Diese Frakturen sind stabil und heilen normalerweise durch Ruhigstellung in einem Gips oder einer Schiene komplikationslos aus.

Wenn die Kortikalis nur auf einer Seite des Knochens frakturiert ist, wird dies als Grünholzfraktur bezeichnet. Die konvexe Seite des Knochens, auf welche Druck ausgeübt wird, bricht. Die konkave Seite, welche komprimiert wird, bleibt intakt. Auf Grund des unsymmetrischen Verletzungsmusters besteht bei der Grünholzfraktur die Gefahr einer sekundären Dislokation.

Nach der *AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF)* (2018) entsprechen diese zwei Frakturtypen am distalen Unterarm dem Code 23-M/2.1.

### **2.3.2 Typische Frakturen des Kindes- und Jugendalters mit Beteiligung der Epiphysenfuge**

Frakturen mit Beteiligung der Epiphysenfuge sind aufgrund der aufgelockerten Epiphysenfuge im pubertären Wachstumsschub besonders häufig. Die Einteilung dieser Frakturen erfolgt entweder nach Salter und Harris (1963) oder Aitken (1965).

Nach der *AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF)* (2018) entsprechen diese Frakturtypen am distalen Unterarm dem Code 23-E/1-9.1-2.

### **2.3.3 Häufigkeit der Frakturtypen am distalen Radius**

Pechlaner et al. (1988) untersuchten in ihrer Studie 222 Kinder- und Jugendliche mit distalen Radiusfrakturen. Mit 59,0 % war der Wulstbruch die häufigste Form. Diese Frakturen treten in jedem Alter auf, vermehrt jedoch zwischen dem 7. und 15. Lebensjahr. Grünholzfrakturen kommen ebenfalls in allen Altersgruppen vor und zeigten sich in der Studie von Pechlaner et al. (1988) mit 23,0 % als zweit häufigste Fraktur des distalen Radius. 17,5 % stellten Salter-Harris-Frakturen dar, die im Alter von 10 bis 15 Jahren eine deutlich erhöhte Inzidenz aufweisen. Mit 0,5 % sind

komplette, metaphysäre Querfrakturen des distalen Radius im Kindes- und Jugendalter selten (Pechlaner et al. 1988).

Je nach Stellung des Handgelenkes zum Zeitpunkt der Fraktur, lassen sich distale Radiusfrakturen weiterhin in Flexions- und Extensionsbrüche unterteilen. Extensionsbrüche, auch als „Colles-Fraktur“ bezeichnet, treten mit 90,0 % deutlich häufiger auf als „Smith“ – bzw. Flexionsfrakturen, die nur 10,0 % ausmachen (Schünke et al. 2007).

## **2.4 Ätiologie**

Laut der Studie von Brudvik und Hove (2003) ist Fußball mit 16,0 % die Sportart mit den häufigsten Frakturen im Bereich des distalen Radius. Mit 8,0 % folgt Skateboarden oder Inlineskating und 7,0 % der Frakturen am distalen Radius entstehen beim Fahrradfahren.

## **2.5 Physiologisches Wachstum des Unterarms**

Der primäre Knochenkern entsteht ca. im 2. Fetalmonat in der Diaphyse des Radius. Im Alter von ca. 6 Monaten postnatal bei Mädchen und im 2. Lebensjahr bei Jungen entsteht der distale sekundäre Knochenkern. Der proximale sekundäre Knochenkern schließt sich bei Mädchen im Alter von ca. 3 Jahren und bei Jungen mit ca. 6 Jahren an. Aus den sekundären Knochenkernen entwickeln sich die distale und proximale Epiphyse. Der komplette Verschluss der proximalen Epiphysenfuge geschieht im Alter von 16 - 18 Jahren und im Alter von 20 - 22 Jahren schließt sich die distale Fuge (Schünke et al. 2007).

### **2.5.1 Beteiligung der verschiedenen Epiphysenfugen am Längenwachstum des Radius**

Die proximale und distale Epiphysenfuge des Radius tragen unterschiedlich viel zum Längenwachstum bei. 75,0 % der Länge entstehen aus der distalen Fuge und nur 25,0 % entwickeln sich aus der proximalen Fuge (Exner 2003). Ein frühzeitiger Verschluss der distalen Epiphysenfuge hat somit schwerwiegendere Folgen für die gesamte Länge des Radius als ein Verschluss der proximalen Epiphysenfuge.

## 2.5.2 Wachstumsgeschwindigkeit des Radius

Hensinger (1986) veröffentlichte in seinem Buch „Standards in Pediatric Orthopedics“ röntgenologisch gemessene Längenangaben des Radius von 173 Kindern und Jugendlichen im Alter von 1 bis 18 Jahren. In der Gruppe der 1- bis 10-Jährigen wurde der Radius zwischen den Epiphysenfugen vermessen, danach wurden die Epiphysen in die Vermessung mit einbezogen. Anhand der Werte für die 50. Perzentile lässt sich errechnen, dass der Radius pro Jahr im Durchschnitt 0,99 cm bei Jungen und 0,96 cm bei Mädchen wächst. Eine Phase des gesteigerten Wachstums mit Werten bis 1,65 cm pro Jahr findet sich sowohl bei Mädchen, als auch bei Jungen im Alter von 1 bis 5 Jahren. Der zweite Wachstumsschub bei Jungen, mit Werten über 1 cm Wachstum pro Jahr, findet im Alter von 12 bis 14 Jahren statt. Bei Mädchen ereignet sich diese Phase des vermehrten Wachstums bereits im Alter von 10 bis 12 Jahren. Laut Hensinger (1986) endet das röntgenologisch messbare Wachstum des Radius bei Mädchen im Schnitt mit 16 und bei Jungen mit 18 Jahren.

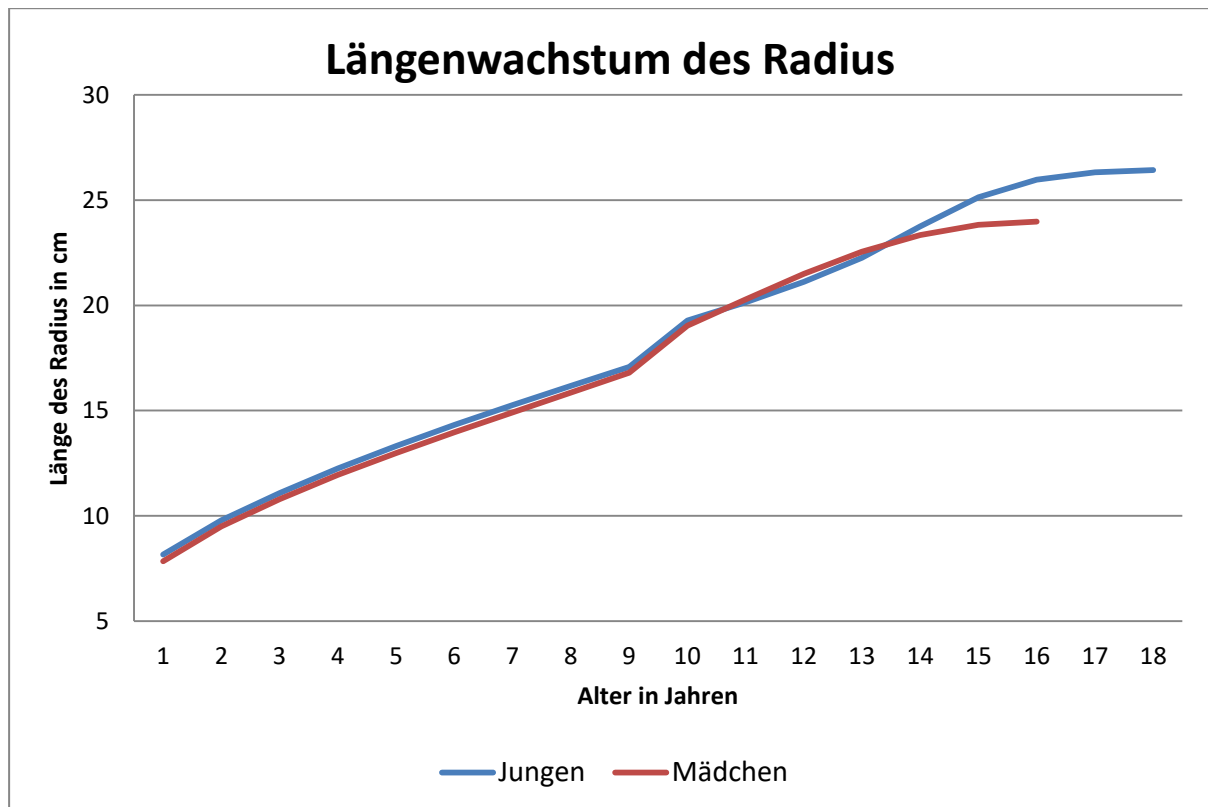


Abbildung 1: Länge des Radius in Abhängigkeit vom Alter, Sprung zwischen 9. und 10. Lebensjahr, da sich die Messmethode ändert (Eigene Darstellung in Anlehnung an Hensinger (1986))

## **2.6 Wachstumsstörungen des Unterarms**

### **2.6.1 Stimulative und hemmende Wachstumsstörungen**

Wachstumsstörungen nach Frakturen können entweder als stimulative oder hemmende Form auftreten. Das Ausmaß und die Schwere der Folgen sind grundsätzlich vom Alter des Patienten zum Zeitpunkt des Unfalls abhängig (Laer et al. 2007).

Stimulative Wachstumsstörungen sind nach jeder Fraktur im Wachstumsalter zu erwarten, da sie als Funktionssteigerung der Fuge der normalen Reaktion auf ein Trauma entsprechen. Sie treten sowohl bei Frakturen, die die Fuge betreffen, als auch bei fugenfernen Frakturen auf und sind zeitlich begrenzt. Ist der Patient jünger als zehn Jahre und erleidet die Fraktur in der eigentlichen Wachstumsphase der Fuge, kann die stimulative Wachstumsstörung zu einer Verlängerung des Knochens im Vergleich zur anderen Seite führen. Bei älteren Patienten, deren Wachstumsfuge sich bereits in der Ruhe- oder Verschlussphase befindet, kann die Fraktur durch Beschleunigung dieser Phase eine Verkürzung auslösen. Die Stimulationszeit und das daraus resultierende Ausmaß hängen dabei jeweils von der Dauer des Remodeling ab, welches durch starke Achsabweichungen oder Seit-zu-Seit-Verschiebungen verlängert wird. Selten kommt es jedoch zu einer Differenz von mehr als 1 cm (Marzi 2010).

Hemmende Wachstumsstörungen entstehen fakultativ und nur nach fugenkreuzenden oder fugennahen Frakturen. Sie dauern bis zum Wachstumsabschluss an und somit deutlich länger als stimulative Wachstumsstörungen. Häufiger kommt es zum partiellen Fugenverschluss und daraus resultierender Achsabweichung als zum totalen Fugenverschluss, der zu einer achsgerechten Verkürzung führt. Ursachen können Gefäßschädigungen sein, die zum Untergang des Wachstumsknorpels und somit zur Verknöcherung führen. Weiterhin können sich knöcherne Brücken im Frakturspalt der Fuge bilden, die in kleinem Ausmaß während des Wachstums gesprengt werden, bei größerer Ausprägung jedoch zu Fehlwachstum führen. Mit bis zu 30,0 % treten hemmende Wachstumsstörungen deutlich häufiger an den unteren Extremitäten auf, als mit ca. 5,0 % an den oberen Extremitäten (Marzi 2010). Weiterhin ist das Risiko für eine hemmende Wachstumsstörung nach dislozierten Frakturen häufiger als nach achsgerecht stehenden Frakturen.

### **2.6.2 Häufigkeit hemmender Wachstumsstörungen nach distaler Radiusfraktur**

Cannata et al. (2003) untersuchten 157 Frakturen der distalen radialen Epiphysenfuge mittels eines Langzeit-Follow-Ups. In diesem Kollektiv befanden sich 18 Salter-Harris Typ I und 139 Salter-Harris Typ II Frakturen. Zum Zeitpunkt des Traumas waren die Patienten im Durchschnitt 11,6 Jahre, zum Zeitpunkt des Follow-Ups 35,5 Jahre alt. Alle wurden konservativ in einem Gips für 6 Wochen behandelt. Sie entdeckten 24,2 % klinisch unauffällige Verkürzungen des Radius von 0,2 bis 0,9 cm und 4,4 % symptomatischer Verkürzungen von 1 bis 6,5 cm mit Symptomen wie Schmerzen, eingeschränkter Beweglichkeit oder verminderter Kraft im Handgelenk.

In der Studie von Davis und Green (1976) wurde nur bei einem Kind ein frühzeitiger Fugenschluss des distalen Radius festgestellt. Diese Komplikation ereignete sich nach 1 von 53 Salter-Harris-Frakturen der insgesamt 547 untersuchten Unterarmfrakturen. Alle Salter-Harris-Frakturen entsprachen dem Typ II.

### **2.6.3 Häufigkeit hemmender Wachstumsstörungen nach distaler Ulnafraktur**

Im Rahmen einer größeren Studie entdeckten Cannata et al. (2003) drei Wachstumsstörungen der distalen Ulna mit Verkürzungen um 2,5 - 3,5 cm. Bei nur 6 untersuchten Salter-Harris-Frakturen der distalen Ulna fielen somit 50,0 % der Patienten mit einer Wachstumsstörung auf. Golz et al. (1991) untersuchten 18 Patienten mit Frakturen der distalen Ulna in einem Langzeit-Follow-up. Nur das Styloid betreffende Frakturen wurden explizit ausgeschlossen. Bei allen 18 Frakturen der Ulna lag gleichzeitig eine Fraktur des Radius vor. Mittels Vermessen der Ulnavarianz fielen 10 Patienten bzw. 55,0 % mit frühzeitigem Verschluss der distalen ulnaren Epiphysenfuge auf. In einem durchschnittlichen Zeitraum von 3,5 Jahren entwickelten sich Ulna-Minusvarianten zwischen 2 und 30 mm. Nur 3 Patienten mit Wachstumsstörung zeigten Symptome wie Schmerzen oder Einschränkung des Bewegungsausmaßes.

### **2.6.4 Untersuchungsmethoden**

Ein frühzeitiger Verschluss der distalen radialen Epiphysenfuge kann sich unterschiedlich darstellen. Klinische Hinweise können ein stark hervorstehender Ulnakopf, Schmerzen, Bewegungseinschränkungen, Kraftminderung oder ein schnappendes Geräusch bei Bewegung des Handgelenks sein (Abzug et al. 2014) (Cannata et al. 2003). Neben der klinischen Untersuchung ist die Abklärung mittels bildgebender

Diagnostik essentiell. Hierbei wird auf Abweichungen im Vergleich zum physiologischen Wachstumsfugenverschluss wie Wachstumsfugenbrücken, einen frühzeitigen Verschluss der Fuge oder Asymmetrien geachtet (Jawetz et al. 2015). Die unterschiedlichen diagnostischen Verfahren bieten verschiedene Vor- und Nachteile.

Das Röntgen ist auf Grund geringer Kosten und leichter Zugänglichkeit das Verfahren der ersten Wahl. Es eignet sich besonders gut zur Darstellung von knöchernen Strukturen, knorpelige Anteile der Epiphysenfuge oder des Gelenks lassen sich jedoch nur schlecht darstellen (Jawetz et al. 2015). Weiterhin ist beim Röntgen, ebenso bei CT-Aufnahmen, besonders im Kindesalter eine strenge Indikationsstellung geboten. Kinder haben ein erhöhtes Risiko für Nebenwirkungen ionisierender Strahlen. Dies lässt sich einerseits durch die hohe Mitoserate in wachsendem Gewebe und dem gesteigerten Wassergehalt erklären. Weiterhin erleben Kinder aufgrund ihres jungen Alters strahleninduzierte Malignome mit einer hohen Latenzzeit eher als Erwachsene in fortgeschrittenem Alter (Alzen und Benz-Bohm 2011).

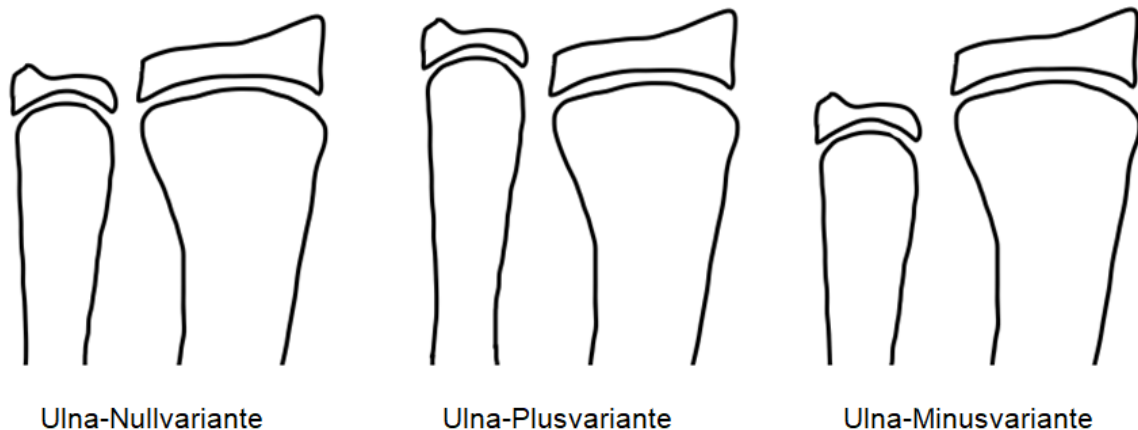
Im CT lassen sich das Ausmaß und die genaue Lokalisation von knöchernen Wachstumsfugenbrücken besser erkennen als im Röntgen. Auf Grund der erhöhten Strahlenbelastung muss der Einsatz jedoch noch genauer abgewogen werden als beim Röntgen. Zur genaueren Beurteilung von Weichteilstrukturen eignen sich weder Röntgen noch CT (Jawetz et al. 2015).

Der große Vorteil der MRT ist die gute Darstellung von Weichteilen wie Knorpel, Sehnen und Gefäßen. Dadurch lassen sich bindegewebige Epiphysenfugenbrücken und periphyseale Nekrosen gut darstellen und Morphologie und Größe einer Epiphysenfugenverletzung genau beschreiben. Der Nachteil dieser Methode ist der gesteigerte zeitliche Aufwand sowie die Herausforderung lange still zu liegen, was gerade bei kleinen Kindern oft nur in Sedierung möglich ist (Jawetz et al. 2015).

## **2.7 Begriffsdefinition Ulnavarianz**

Die Ulnavarianz gibt den Längenunterschied der Ulna im Vergleich zum Radius an, welche an den distalen Enden beider Knochen vermessen wird. Erstmals prägte Hulten (1928) diesen Begriff im Jahr 1928. Von posterioranteren Röntgenbildern des Handgelenks ausgehend, unterschied er drei Varianten, die auch heute noch etabliert sind. Die Ulna-Nullvariante beschreibt eine Längendifferenz von weniger als 1 mm. Als Ulna-Plusvariante wird eine Abweichung der Ulna größer 1 mm in distaler

Richtung bezeichnet. Gegenteilig dazu beschreibt die Ulna-Minusvariante einen Längenunterschied größer 1 mm in proximaler Richtung. Somit ergeben sich nach dieser Definition für Ulna-Plusvarianten positive Werte und für Ulna-Minusvarianten negative Werte. Hulten (1928) untersuchte 400 Patienten, die älter als 15 Jahre alt waren. Mit 61 % trat die Ulna-Nullvariante am häufigsten auf, gefolgt von der Ulna-Minusvariante mit 23 % und der Ulna-Plusvariante mit 16 %.



**Abbildung 2: Varianten der Ulnavarianz nach Hulten (1928) (Eigene Darstellung in Anlehnung an Hafner et al. (1989))**

### 2.7.1 Messmethoden der Ulnavarianz

Die bisher einzige etablierte Methode zur Messung der Ulnavarianz ist das Röntgen. Um standardisierte und vergleichbare Werte zu erhalten, ist die Stellung des Unterarms entscheidend. Epner et al. (1982) stellten fest, dass die Ulnavarianz in Supination um durchschnittlich 1 mm länger ist als in Pronation.

Zur Vermessung der Ulnavarianz auf Röntgenbildern sind in der Literatur verschiedene Möglichkeiten für Patienten mit geschlossenen Epiphysenfugen beschrieben. Steyers und Blair (1989) verglichen die Methoden der konzentrischen Kreise (Palmer et al. 1982), der senkrechten Linien und der Linienprojektion miteinander. Die Vermessung der kindlichen Ulnavarianz stellt aufgrund der noch offenen Epiphysenfugen und teilweise noch nicht ausgeprägten Epiphysen eine besondere Herausforderung dar. Dieser Fragestellung nachgehend verglichen Kox et al. (2019) die Methode der senkrechten Linien und die Hafner Methode (Hafner et al. 1989). Bei der erst genannten Methode wird eine Grundlinie senkrecht zum Verlauf des Radius gezogen. An diese werden zwei weitere Linien im rechten Winkel zu der

Grundlinie angelegt, zwischen denen die Ulnavarianz vermessen wird. Die erste Linie verläuft durch den distalsten Punkt der ulnaren Radiusepiphyse. Die zweite Linie kreuzt den distalsten Teil der radialseitigen Ulnaepiphyse. Das genaue Vorgehen der Vermessung nach Hafner et al. (1989) wird im Methodikteil unter 3.5.2 beschrieben. Sie kamen zu dem Schluss, dass Letztere die einzige geeignete Methode für Kinder unter 8 Jahren sei, bei denen die Fugen besonders breit sind. Weiterhin konnten sie für die Altersgruppe von 9 bis 13 Jahren eine höhere Inter-rater-Reliabilität für die Methode von Hafner et al. (1989) im Vergleich zu der Methode der senkrechten Linien nachweisen. Für Jugendliche älter als 14 Jahre empfahlen sie die Methode der senkrechten Linien.

### **2.7.2 Normwerte der Ulnavarianz bei Kindern und Jugendlichen**

Literatur zu Normwerten der Ulnavarianz im Kindes- und Jugendalter gibt es bisher wenig. Die existierenden Studien variieren, abhängig von der gewählten Messmethode, stark in ihren Ergebnissen.

Goldfarb et al. (2011) vermaßen mit Hilfe der Methode der senkrechten Linien (Steyers und Blair 1989) 138 gesunde Patienten zwischen 12 und 18 Jahren. Dabei ergab sich eine mittlere Ulnavarianz von -0,5 mm (SD 1,2 mm).

Hafner et al. (1989) führten ihre Studie an 535 gesunden Kindern im Alter von 1,5 bis 15,5 Jahren durch. Aufgrund ihrer selbst entwickelten Messmethode, stehen in dieser Studie positive Werte für eine Ulna-Minusvariante und umgekehrt negative Werte für eine Ulna-Plusvariante. Je nach Messpunkt betraf die durchschnittliche Ulnavarianz 2,2 mm (Methode A) bzw. 2,6 mm (Methode B). Somit entsprach die Großzahl der vermessenen Handgelenke einer Ulna-Minusvariante.

Kox et al. (2019) analysierten Röntgenbilder von 350 gesunden Kindern und Jugendlichen im Alter von 4 bis 18 Jahren. Mittels der Methode von Hafner et al. (1989) ermittelten sie eine mittlere Längendifferenz von Ulna und Radius von -2,1 mm mit einer Standardabweichung von 1,8. Die Methode der senkrechten Linien verwendend, ergab sich für das gleiche Kollektiv eine Längendifferenz von -1,4 mm mit einer Standardabweichung von 1,3.

## **2.8 Einsatzmöglichkeiten der Sonografie zur Diagnostik am Handgelenk**

Die Sonografie ist als sichere Methode zur Diagnostik von Weichteilschäden bereits lange etabliert. Der sinnvolle Einsatz im Bereich von Knochendarstellung und Frakturen des distalen Unterarms wird in der Literatur jedoch kontrovers diskutiert. Dank der technischen Entwicklung und signifikanten Verbesserung der Bildqualität, hat die Sonografie in den letzten Jahrzehnten auch hier immer mehr Zuspruch gefunden. Im Bereich der Epiphysendarstellung ist die Sonografie noch neu und es existieren bisher wenige Studien.

In der Studie zum Thema Bildgebung in der Sportmedizin von Heuck et al. (1997) wird der sinnvolle Einsatz der Sonografie auf die Diagnostik von Weichteilverletzungen beschränkt. Sehnenrisse, Nervenschädigungen und Hämatome seien gut erkennbar, knöcherne Strukturen in der Sonografie jedoch nicht ausreichend beurteilbar.

Hübner et al. (2000) verglichen 224 Sonografie- und Röntgenbefunde unterschiedlicher Knochen von Kindern mit Verdacht auf Fraktur. Allgemein ließen sich Frakturen der Diaphyse von Femur, Humerus und Unterarm besser darstellen als Frakturen der kleinen Hand- und Fußknochen, periartikuläre Frakturen oder nicht-dislozierte Epiphysenfrakturen. Für den distalen Radius ergaben sich eine Sensitivität von 98,3 % und eine Spezifität von 69,3 % per Sonografie. Für bestimmte Indikationen wie Wulstbrüche, unkomplizierte oder nur leicht dislozierte Frakturen empfehlen Hübner et al. (2000) ganz auf die Strahlenbelastung zu verzichten und allein die Sonografie zur Diagnostik heranzuziehen. Bei stark dislozierten oder nahe am Gelenk liegenden Frakturen die auf eine Operation hinauslaufen, ist eine Röntgenaufnahme weiterhin nicht verzichtbar.

Eckert et al. (2012) untersuchten in einer prospektiven Studie 115 Patienten mit klinischem und anamnestischem Verdacht auf distale Radiusfraktur per Sonografie. Ausschlusskriterien waren offene Frakturen, offensichtliche Fehlstellungen oder der Verdacht auf neurale oder vaskuläre Begleitverletzungen. Die Untersuchung wurde mittels eines 10-MHz-Linearschallkopfs in sechs Projektionen durchgeführt. Zur Kontrolle wurde die Standardröntgenuntersuchung des distalen Unterarms in zwei Ebenen angeschlossen. Für distale Unterarmfrakturen allgemein ergaben sich eine Sensitivität von 94,4 % und eine Spezifität von 98,0 %. Die Ergebnisse für eine

isolierte Radiusfraktur waren mit einer Sensitivität von 100 % und einer Spezifität von 96,3 % noch besser. Eckert et al. (2012) erklärten somit die Sonografie als sichere diagnostische Alternative zum Röntgen sowohl für unkomplizierte Wulst- und Grünholzfrakturen als auch für komplizierte dislozierte Frakturen oder Salter-Harris-Frakturen.

Ng et al. (2014) entwickelten eine Methode um per Sonografie die Epiphysenfugen von Kindern zu vermessen. An 95 Kindern im Alter von null bis zwölf Jahren wurde die Weite der Epiphysenfugen von Radius, Ulna, Tibia und Fibula beidseits gemessen und somit Durchschnittswerte berechnet. Diese Studie zeigt, dass die Epiphysenfuge des distalen Radius per Sonografie gut darstellbar ist. Als Einschränkungen ihrer Methode führen Ng et al. (2014) die Abhängigkeit des Ergebnisses von der Erfahrung des sonografierenden Arztes an. Weiterhin gab es kein Standardvorgehen, an welchem Punkt der Fuge die Weite gemessen wurde. Die weiteste Stelle wurde nur mit dem Auge abgeschätzt.

Schmidt et al. (2013) verwendeten die Sonografie zur Darstellung der Epiphysenfuge ebenfalls erfolgreich. Sie definierten vier Gruppen verschiedener Ossifikationsstufen der distalen Epiphysenfuge des Radius und untersuchten anhand von 615 Patienten, in welchen Altersgruppen, welche Stufe wie häufig vorkam. Somit entwickelten sie eine Methode zur strahlenfreien Identifikation des skelettalen Alters. Als Nachteil der Sonografie stellte sich die niedrigere Auflösung heraus, wegen der, im Vergleich zum Röntgen, erste Anzeichen von Verknöcherung der Epiphysenfuge später erkannt wurden.

Der Trend in der Diagnostik des distalen Radius geht eindeutig zu strahlenfreien Methoden. Die oben genannten Studien zeigen, dass per Sonografie sowohl die knöchernen Teile der Epi- und Metaphyse des distalen Radius als auch die knorpelige Epiphysenfuge gut darstellbar sind. Der Autorin ist jedoch in der aktuellen Literatur keine Studie bekannt, in der die Ulnavarianz per Sonografie gemessen wurde.

## **3 Materialien und Methoden**

### **3.1 Probekollektiv und Interrater-Reliabilität**

Bevor die sonografische Messung an studienrelevanten Patienten durchgeführt wurde, erklärten sich einige Patienten der kinderchirurgischen Notaufnahme der Klinik St. Hedwig, Regensburg, bereit, die Methode an sich testen zu lassen. Diese Kinder hatten keine Verletzungen des Unterarms und stellten sich aufgrund anderer Beschwerden in der Notaufnahme vor. Ziel der Voruntersuchung war, mit Hilfe des Intraklassen-Korrelations-Koeffizient (ICC) die sonografische Untersuchungsmethode auf Unabhängigkeit von unterschiedlichen Untersuchern zu testen. Hierfür wurden 25 Patienten jeweils von 3 Untersuchern, einem Facharzt für Kinderchirurgie und 2 Doktorandinnen, sonografiert. Jeder Untersucher hat unabhängig von den anderen die Längendifferenz von Radius und Ulna vermessen. Mit den erhobenen Werten konnte der ICC berechnet werden.

### **3.2 Ein- und Ausschlusskriterien des Patientenkollektivs**

Mit Vorliegen des Ethikvotums wurden im ersten Schritt alle ehemaligen Patienten der Klinik St. Hedwig, die aufgrund einer distalen Radiusfraktur behandelt wurden, im Klinikinformationssystem (SAP) aufgesucht. Die für die Studie in Frage kommenden Frakturtypen waren wie folgt klassifiziert: distale Fraktur des Radius, Extensionsfraktur (S52.51); distale Fraktur des Radius, Flexionsfraktur (S52.52); distale Fraktur des Radius, nicht näher bezeichnet (S52.50); distale Fraktur der Ulna und des Radius, kombiniert (S52.6). Zum Ausschluss führten: operative Versorgung mit ESINs, operative Versorgung mit einer Plattenosteosynthese, nicht ausreichende Daten zur Operation (Bsp.: Datum der Operation oder Uhrzeit der Operation nicht vorhanden), kein standardgemäßes Röntgenbild in zwei Ebenen, keine gesicherte Fraktur, Wohnsitz außerhalb von Deutschland. Es wurden bewusst sowohl konservativ behandelte als auch operativ versorgte Kinder in die Studie eingeschlossen, um vergleichen zu können, wie häufig Wachstumsstörungen bei den verschiedenen Behandlungsoptionen auftreten. Konservativ bedeutete hierbei eine Ruhigstellung mittels Gips oder Schiene ohne Reposition. Das Frakturereignis wurde auf die Jahre 2010 bis 2016 beschränkt. Einerseits war ein gewisser zeitlicher Abstand wichtig, damit eine potentielle Wachstumsstörung ausreichend genug ausgeprägt wäre, um sie in der Sonografie erkennen zu können.

Andererseits durften die Patienten zum Zeitpunkt des Follow-Ups nicht zu alt sein, da der Verschluss der Epiphysenfugen zu weit fortgeschritten gewesen wäre, um die Anhaltspunkte für die Längendifferenzvermessung zu erkennen. Aus diesen Gründen wurde die Kohorte weiterhin auf die Geburtsjahrgänge von 2000 bis 2016 beschränkt. Patienten, bei denen das Wachstum der Epiphysenfuge für eine aussagekräftige Messung in der sonografischen Darstellung zu weit fortgeschritten war, mussten nachträglich ausgeschlossen werden. Insgesamt wurden 305 Kinder und Jugendliche in das Kollektiv eingeschlossen und kontaktiert, 126 von ihnen erklärten sich mit einer sonografischen Nachuntersuchung einverstanden.

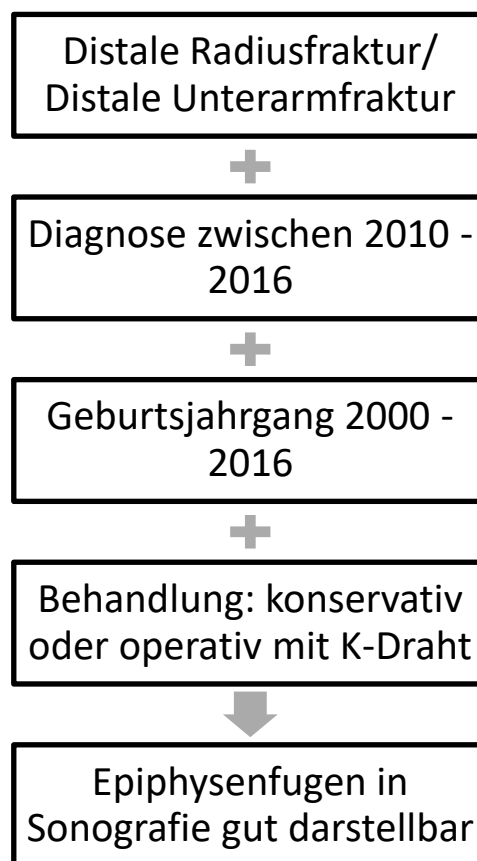


Abbildung 3: Einschlusskriterien des Patientenkollektivs (Eigene Darstellung)

### 3.3 Patientenrekrutierung

Alle Patienten, die den Auswahlkriterien entsprachen, wurden per Brief kontaktiert. Die Briefe waren explizit gemeinsam an die Eltern und ihre Kinder gerichtet. Sie enthielten neben einem Informationsschreiben auch eine Auflistung mit unterschiedlichen Möglichkeiten zur Terminvereinbarung. Als erste Möglichkeit stand das online

Terminvereinbarungstool Doodle zur Verfügung. Hierfür hat jeder Patient eine persönliche Patienten-ID zugeteilt bekommen, damit die Terminvergabe pseudonymisiert ablaufen konnte. Weitere Möglichkeiten zur Kontaktaufnahme bestanden per Telefon oder E-Mail.

### **3.4 Follow-Up**

Im Rahmen des vereinbarten Termins erfolgten die sonografische Vermessung der Längendifferenz, eine klinische Untersuchung der Unterarme beidseits sowie das gemeinsame Ausfüllen des Fragebogens mit den Eltern und dem Patienten. Dabei wurden anamnestisch die Händigkeit, Refrakturen und potentielle, posttraumatische Bewegungseinschränkungen und Schmerzen erhoben. Der Fragebogen ist im Anhang 7.1 beigefügt. Zur klinischen Untersuchung wurden Ulna- und Radialabduktion, Palmarflexion, Dorsalextension, Supination und Pronation aktiv getestet. Hierbei wurde auf Seitengleichheit geachtet und Abweichungen größer als 10° wurden vermerkt. Auf Druckschmerz wurde von lateral, medial, palmar und dorsal getestet, indem Druck auf den distalen Radius ausgeübt wurde. Weiterhin wurde die Länge des Radius mit Hilfe eines Maßbandes vermessen. Die Orientierungspunkte waren der Processus styloideus radii und der Epicondylus lateralis humeri. Die Beschreibung der sonografischen Methode zur Vermessung der Längendifferenz von Radius und Ulna erfolgt unter 3.5.3.

### **3.5 Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna**

#### **3.5.1 Definition zentraler Begriffe und der verwendeten Vorzeichen**

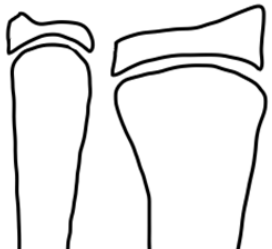

Im Folgenden werden die zwei, in dieser Arbeit angewendeten, Messmethoden für die Längendifferenz von Radius und Ulna erörtert. Zum besseren Verständnis werden vorher wichtige Begriffe und ihre Bedeutung in dieser Arbeit definiert.

Der Begriff Ulnavarianz bezieht sich nach Definition von Hulten (1928) auf die Position der Ulna im Vergleich zum Radius und wird anhand von Röntgenbildern gemessen. Da in dieser Studie jedoch Verkürzungen des Radius und deren sonografische Ermittlung im Vordergrund stehen, wird im weiteren Text der Begriff der „Längendifferenz“ gegenüber dem der „Ulnavarianz“ bevorzugt.

Weiterhin ist die Definition der Vorzeichen für die Längendifferenz wichtig. Aufgrund der Zielsetzung, posttraumatische Verkürzungen des Radius zu unter-

suchen, standen am Anfang der Überlegungen negative Längendifferenzen für einen kürzeren Radius und positive Werte für einen längeren Radius im Vergleich zur Ulna. Auf die gleiche Art setzte auch Hafner et al. (1989) die Vorzeichen ein. Die Verwendung ist beim bestehenden Begriff der Ulnavarianz jedoch genau gegenteilig. Um die Werte dieser Studie anschließend in der Diskussion besser mit der bestehenden Literatur vergleichen zu können, wurden die erhobenen Werte mit minus eins multipliziert und somit die Vorzeichen an die des bestehenden Begriffs der Ulnavarianz angepasst. Daraus resultierend steht bei den folgenden Werten ein negatives Vorzeichen für einen längeren Radius und positive Werte für einen kürzeren Radius im Vergleich zur Ulna. Der Gebrauch der Vorzeichen in den verschiedenen Studien ist in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Verschiedene Studien und ihre Verwendung von Vorzeichen für die Längendifferenz von Radius und Ulna**

Ulnavarianten/Studien		
Methode nach Hafner et al. (1989)	-	+
Ulnavarianz nach Hulten (1928) und im Großteil der Literatur	+	-
Angepasste Vorzeichen im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit	+	-

### 3.5.2 Messmethode Röntgen

Die per Röntgen gemessene Längendifferenz der Unterarmknochen wurde an Aufnahmen durchgeführt, welche zum Zeitpunkt der Fraktur entstanden. Sowohl die a.-p. Bilder, als auch die seitlichen Aufnahmen entstanden in Neutralstellung. Grundlage der röntgenologischen Vermessung ist die Methode von Hafner et al. (1989), welche entwickelt wurde, um die rheumatisch bedingte Verkürzung der Ulna im Kindesalter zu bestimmen. Die Grundlage dieser Methode ist eine Linie, welche parallel zur Längsachse der Ulna verläuft. Senkrecht zu der ersten Linie werden zwei weitere Linien gezogen, zwischen denen anschließend die Längendifferenz gemess-

sen werden kann. Hafner et al. (1989) testeten vier verschiedene Ansatzpunkte für die zwei senkrechten Linien.

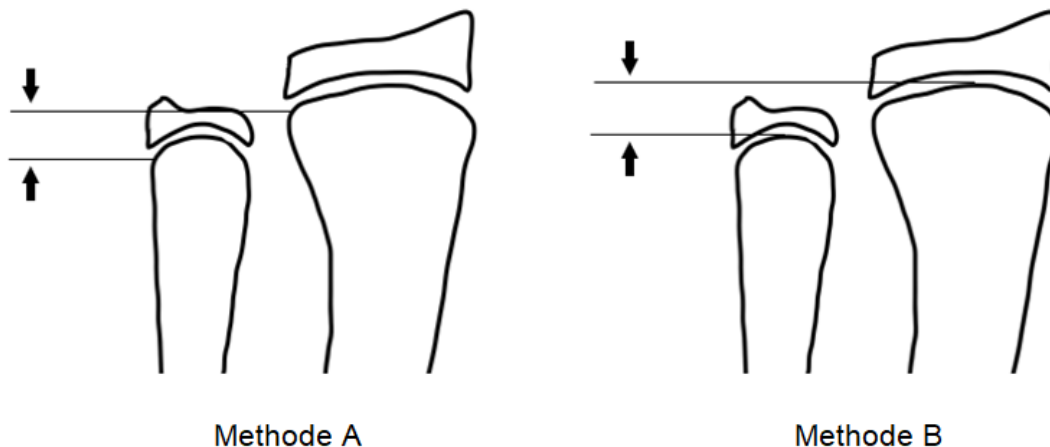
Methode A: proximalster Punkt der ulnaren Metaphyse bis proximalster Punkt der radialen Metaphyse

Methode B: distalster Punkt der ulnaren Metaphyse bis distalster Punkt der radialen Metaphyse

Methode C: proximalster Punkt der ulnaren Metaphyse bis distalster Punkt der radialen Metaphyse

Methode D: distalster Punkt der ulnaren Metaphyse bis proximalster Punkt der radialen Metaphyse

Von dem proximalsten Punkt der Metaphyse sprechend, ist bei Hafner et al. (1989) der Teil der Metaphyse gemeint, welcher der proximalsten Begrenzung der Epiphysenfuge entspricht. Es ist nicht von der insgesamt proximalsten Stelle der Metaphyse die Rede, welche dem Übergang zur Diaphyse entsprechen würde. Abbildung 4 zeigt die Messpunkte von Methode A und B im Vergleich.



**Abbildung 4: Methode A und B zur Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna per Röntgen (Eigene Darstellung in Anlehnung an Hafner et al. (1989))**

Aufgrund zweier Argumenten wurde sich für die Methode B entschieden. Erstens weist diese laut Hafner et al. (1989) den kleinsten Fehler auf. Weiterhin ist die distalste Stelle der Metaphyse, besonders in der Sonografie, besser abzugrenzen.

Für die Datenerhebung lagen nur Bilder des Handgelenkes vor, sodass es nicht möglich war eine Linie parallel zur Längsachse der ganzen Ulna verlaufend zu

ziehen. Auf Grund dessen wurde die Messmethode für diese Arbeit leicht abgeändert. Im ersten Schritt der Messung wurde eine Linie zwischen den zwei proximalsten Punkten der radialen Epiphysenfuge gezogen. Diese entsprach in bestmöglicher Annäherung einer Senkrechten auf die Längsachse des Radius. Im zweiten Schritt wurde diese Linie auf den distalsten Punkt der Metaphyse des Radius verschoben. Als letztes wurde der Abstand vom distalsten Punkt der ulnaren Metaphyse zu der Messlinie, die vom distalsten Punkt der radialen Metaphyse ausging, gemessen. Somit konnte die Längendifferenz der Metaphysen von Radius und Ulna von allen Studienpatienten zum Zeitpunkt der Fraktur nachwirkend bestimmt werden. Die Röntgenbilder wurden mit dem Programm JiveX 2.0 gesichtet und vermessen. Nach der Methode von Hafner et al. (1989) stehen positive Werte für eine Ulna-Minusvariante und negative Werte für eine Ulna-Plusvariante. Wie bereits unter 3.5.1 erwähnt, wurde bei diesen Werten zur besseren Vergleichbarkeit das Vorzeichen geändert. In den Abbildungen 5 bis 7 werden die Vermessungsschritte anhand von Röntgenbildern verdeutlicht.



**Abbildung 5: Vermessung der Längendifferenz per Röntgen. Erster Schritt: Linie durch proximale Begrenzungen der radialen Epiphysenfuge, 10-jähriger Patient (Eigene Darstellung)**



Abbildung 6: Vermessung der Längendifferenz per Röntgen. Zweiter Schritt: Verschieben der Linie zum distalsten Punkt der radialen Metaphyse, 10-jähriger Patient (Eigene Darstellung)



Abbildung 7: Vermessung der Längendifferenz per Röntgen. Dritter Schritt: Abstand zwischen distalstem Punkt der ulnaren Metaphyse und gezogener Linie, 10-jähriger Patient (Eigene Darstellung)

### **3.5.3 Messmethode Sonografie**

Die per Sonografie gemessenen Werte für die Längendifferenz von Radius und Ulna wurden im Rahmen des Follow-Ups aufgenommen, welches mindestens ein Jahr posttraumatisch erfolgte. Die Bilder wurden mit einem Xario SSA-660A Ultraschallgerät von Toshiba dargestellt. Für die Messung der Längendifferenz wurde eine Linear-Array-Sonde mit 8 MHz verwendet. Diese Sonde eignet sich besonders für oberflächlich gelegene Strukturen wie Knochen (Weinberg et al. 2010) (Ng et al. 2014). Für die Untersuchung befand sich der Unterarm in Pronation, das Handgelenk in Neutralposition und der Schallkopf wurde in der Sagittalebene dorsal auf den distalen Radius aufgesetzt. Im ersten Schritt wurde die distale Epiphysenfuge des Radius aufgesucht. Die Aufmerksamkeit galt dabei besonders der Frage, ob die Epiphysenfuge noch altersentsprechend geöffnet war. Vor der eigentlichen Längendifferenzmessung kann eine Wachstumsstörung hier bereits durch die frühzeitig verschlossene Fuge auffallen. Anschließend wurde der Schallkopf so positioniert, dass die Messskala auf Höhe des distalsten Punktes der Metaphyse des Radius lag. Für den letzten Schritt wurde der Schallkopf nach ulnar geschwenkt, bis die Ulna im Bild erschien. In dieser Ansicht konnte nun der Abstand vom distalsten Punkt der Metaphyse der Ulna bis zur Messskala erhoben werden. Dieser Wert entsprach der Längendifferenz von Radius zu Ulna. Damit die Messung möglichst genau der Anatomie des Patienten entsprach, war es wichtig, dass der Schallkopf parallel zu der Achse der Unterarmknochen bewegt wurde. Hierfür erwies es sich als praktisch die Hand, die den Schallkopf führte, auf dem Oberschenkel des Patienten abzusetzen und den Schallkopf mit der zweiten Hand zu stützen. In den Abbildungen 8 bis 10 werden die Vermessungsschritte anhand von Sonografiebildern verdeutlicht.

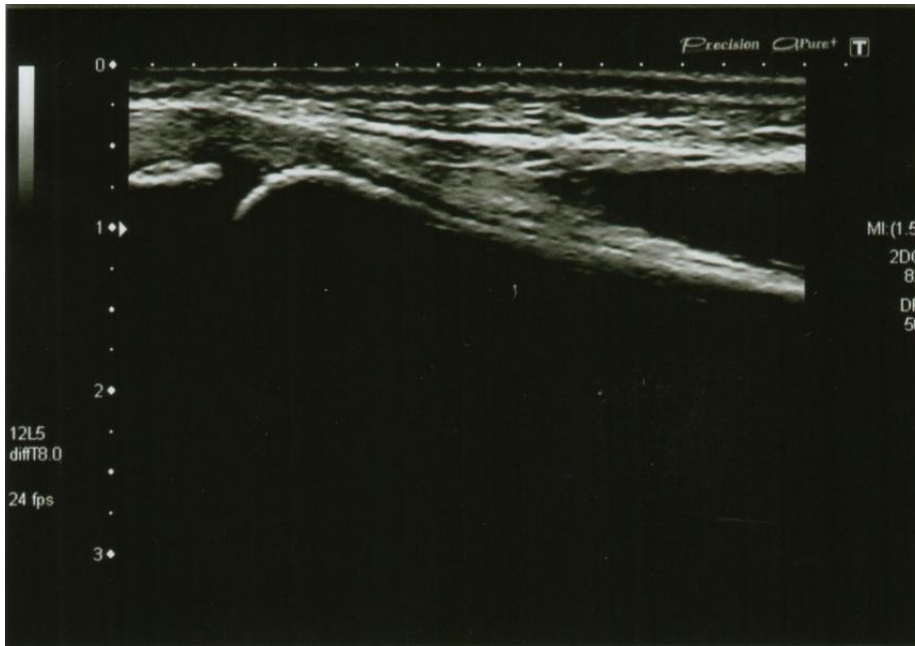


Abbildung 8: Vermessung der Längendifferenz per Sonografie. Erster Schritt: Übersichtseinstellung des distalen Radius, 13-jähriger Patient (Eigene Darstellung)

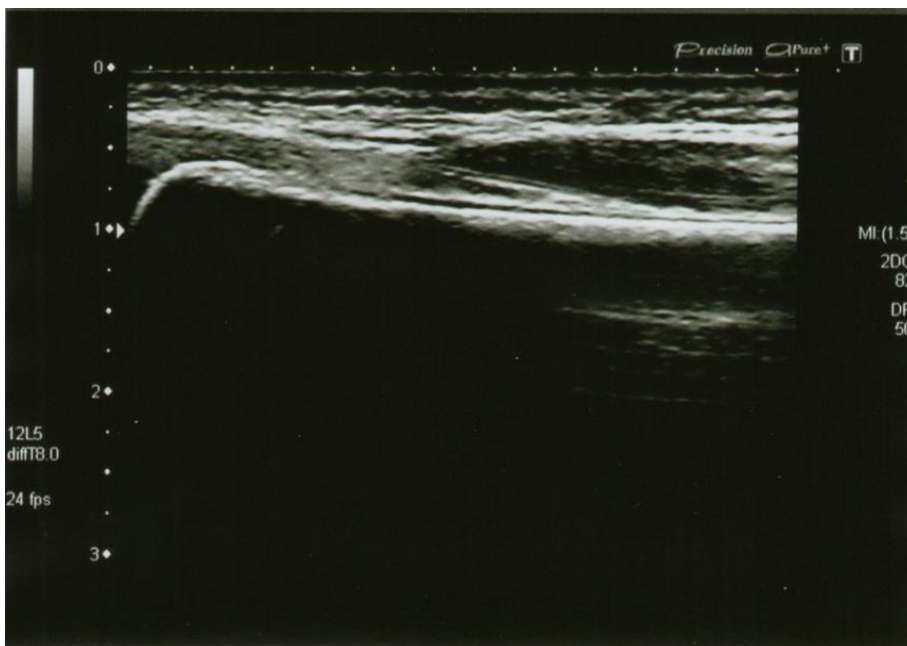


Abbildung 9: Vermessung der Längendifferenz per Sonografie. Zweiter Schritt: Einstellen des distalen Endes der Metaphyse des Radius auf die Höhe der Messleiste, 13-jähriger Patient (Eigene Darstellung)



Abbildung 10: Vermessung der Längendifferenz per Sonografie. Dritter Schritt: Schwenken zu der distalen Ulna und Vermessen des Abstandes vom distalen Ende der Metaphyse der Ulna zur Messleiste, 13-jähriger Patient (Eigene Darstellung)

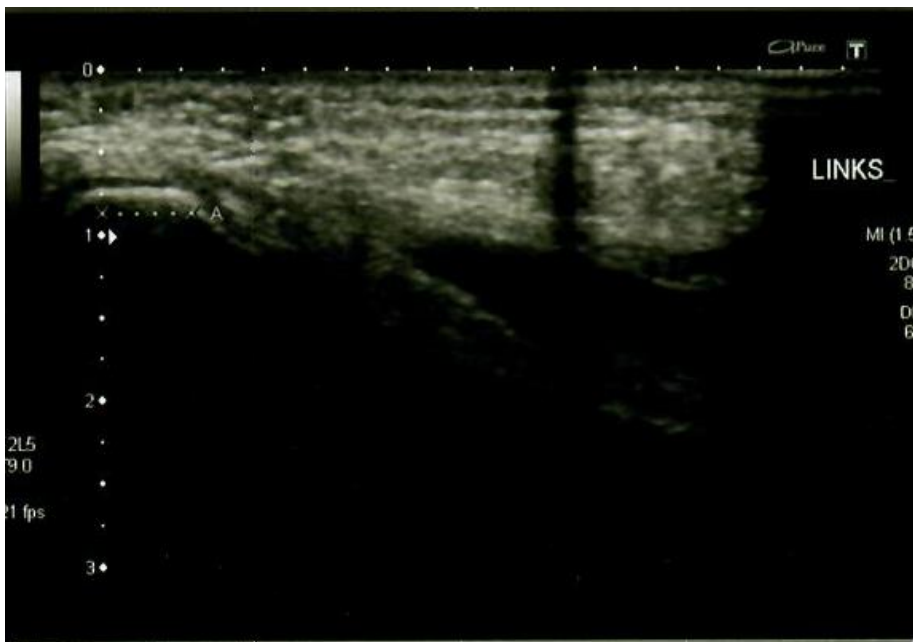
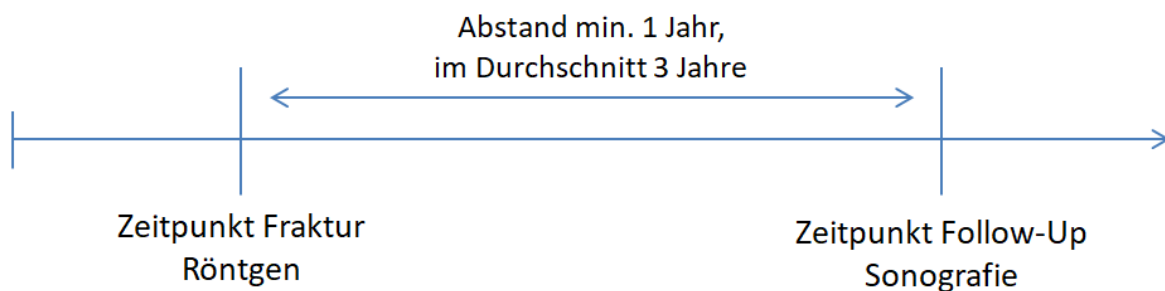


Abbildung 11: Geschätzte Längendifferenz einer 17-jährigen Patientin, deren Epiphysenfugen bereits zu weit verschlossen waren, um die Messpunkte genau definieren zu können (Eigene Darstellung)

Abbildung 11 zeigt das Beispiel einer Patientin, welche zum Zeitpunkt des Follow-Ups 17 Jahre alt war. Die Epiphysenfugen am distalen Unterarm zeigten sich altersentsprechend bereits zu weit verschlossen, um die Messpunkte genau abgrenzen zu können.

### 3.6 Verwendung der per Sonografie und Röntgen erhobenen Längendifferenzen von Radius und Ulna zur Diagnostik einer hemmenden Wachstumsstörung des distalen Radius

Die Grundidee dieser Studie besagt, dass eine hemmende Wachstumsstörung des distalen Radius anhand einer veränderten Längendifferenz von Radius und Ulna auffällt. Um potentielle Veränderungen zu erkennen, wurde die Längendifferenz zu zwei Zeitpunkten erhoben und anschließend die Differenz beider Werte gebildet. Der erste Wert wurde auf Röntgenbildern ermittelt, welche zum Zeitpunkt der Fraktur entstanden und somit bereits vorlagen. Für die Erhebung des Zweiten wurde ein Follow-Up geplant und die Längendifferenz per eigens entwickelter, sonografischer Methode gemessen. Um sicher zu gehen, dass der Abstand von Radius und Ulna bei einer potentiellen hemmenden Wachstumsstörung ausreichend ausgeprägt wäre, um sie messen zu können, erfolgte das Follow-Up mit mindestens einem Jahr Abstand zu der Fraktur. Der zeitliche Verlauf und der Einsatz der verschiedenen Untersuchungsmethoden sind in Abbildung 12 dargestellt.



**Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf und Einsatz der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zur Vermessung der Längendifferenz von Radius und Ulna (Eigene Darstellung)**

Wie unter 2.5.2 bereits erläutert, ließ sich aus den Ergebnissen der Studie von Hensinger (1986) berechnen, dass der Radius pro Jahr durchschnittlich bei Jungen 0,99 cm und bei Mädchen 0,96 cm wächst. Dieses Wissen vorausgesetzt, müsste sich die Längendifferenz von Radius und Ulna im Fall einer hemmenden Wach-

tumsstörung pro posttraumatisch vergangenem Jahr um ca. 1 cm verändern. Somit wurde für die vorliegende Studie eine hemmende Wachstumsstörung des distalen Radius als Unterschied von mindestens 1 cm zwischen den radiologisch und sonografisch gemessenen Längendifferenzen von Radius und Ulna definiert. Nach den in 3.5.1. erfolgten Erläuterungen, entsprach eine Verkürzung des Radius einer Zunahme der Längendifferenz in positive Richtung.

Um neben der selbst entwickelten, neuen Methode zusätzliche Hinweise auf eine potentiell vorliegende hemmende Wachstumsstörung zu erhalten, wurde jedes Kind weiteren Untersuchungen unterzogen. Wie unter 3.4 bereits erwähnt erfolgte eine ausführliche klinische Untersuchung und das anamnestische erheben möglicher Symptome einer hemmenden Wachstumsstörung. Zusätzlich wurden per Maßband die äußeren Längen des linken und des rechten Radius verglichen. Da sich die vorliegende Studie auf die sonografische Methode konzentriert, wurden die zusätzlichen Untersuchungen in einer zweiten wissenschaftlichen Arbeit ausführlich ausgewertet.

### **3.7 Statistische Analyse**

Alle patientenbezogenen Daten entstammen dem SAP der Klinik St. Hedwig, Regensburg. Die Datenerfassung und Strukturierung erfolgte anonymisiert mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Microsoft Office Excel, Version 2010. Für die Berechnung des Intraklassen-Korrelationskoeffizient, des T-Tests und der ANOVA wurde das Programm IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24 (IBM Corp., Armonk, N.Y, USA) verwendet.

Der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) eignet sich zur Quantifizierung der Übereinstimmung metrischer, kontinuierlicher Daten, die von zwei oder mehr Untersuchern erhoben wurden (Koo und Li 2016). Nach der Einteilung von McGraw und Wong (1996), auf der auch die Berechnung in IBM SPSS basiert, wurde der „Two-way mixed effects, absolute agreement, single rater/measurement“-Typ für die Fragestellung dieser Arbeit gewählt. Die Werte des Intraklassen-Korrelationskoeffizienten liegen per Definition zwischen null und eins. Im Detail stehen laut Cicchetti (1994) Werte zwischen 0,4 und 0,59 für eine ausreichende, zwischen 0,6 und 0,74 für eine gute und Werte größer als 0,75 für eine exzellente Korrelation.

Mittels einer ANOVA lassen sich die Mittelwerte von mehr als zwei Gruppen vergleichen (Rumsey 2013). Somit konnte der Zusammenhang des Alters der Patienten mit der jeweils per Röntgen und Sonografie ermittelten Längendifferenz von Radius und Ulna ermittelt werden. Dabei steht ein p-Wert größer 0,05 für keinen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Altersgruppen und somit für keine Abhängigkeit vom Alter. Bei einem p-Wert kleiner als 0,05 unterscheiden sich mindestens zwei Gruppen in ihrem Mittelwert und die Methode ist dadurch abhängig vom Alter. Die Bedingungen für diesen Test wurden ebenfalls mit SPSS überprüft. Mittels des Shapiro-Wilk-Tests wurde die Normalverteilung der Daten bewiesen ( $p > 0,05$ ) und der Levene-Test hat die Varianzhomogenität bestätigt ( $p > 0,05$ ).

Ein T-Test wurde verwendet um die Mittelwerte von der röntgenologisch und sonografisch gemessenen Längendifferenz von Radius und Ulna miteinander zu vergleichen. Da die Werte jeweils am gleichen Patienten erhoben wurden, wurde der Test für abhängige Stichproben gewählt. Auf Grund des hohen Stichprobenumfangs von jeweils 121 Patienten, lässt sich durch den Zentralen Grenzwertsatz eine ungefähre Normalverteilung annehmen (Rumsey 2015).

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Probekollektiv**

Im Probekollektiv konnte die sonografische Methode an 25 Patienten getestet werden. Im Schnitt lag der Unterschied der 3 Untersucher innerhalb eines Patienten bei 2,0 mm mit einem 95%-Konfidenzintervall von 1,5 bis 2,5 mm und einer Standardabweichung von 1,2 mm. Bei 7 Patienten (28,0 %) lag der Unterschied bei 1 mm oder weniger. Der größte Unterschied zwischen den 3 Untersuchern innerhalb eines Patienten entsprach 5,2 mm.

#### **4.1.1 Intraklassen-Korrelationskoeffizient**

Die Berechnung des Intraklassen-Korrelationskoeffizienten ergab 0,655. Dieser Wert zeigt eine gute Interrater-Reliabilität an. Das 95%-Konfidenzintervall lag zwischen 0,45 und 0,81 und ist somit der Einteilung von Cicchetti (1994) nach in den Bereich von mäßiger bis exzellenter Reliabilität einzuordnen.

### Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0			
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1	df2	Sig.
Einzelne Maße	0,655	0,452	0,814	6,705	24,000	48,000	0,000

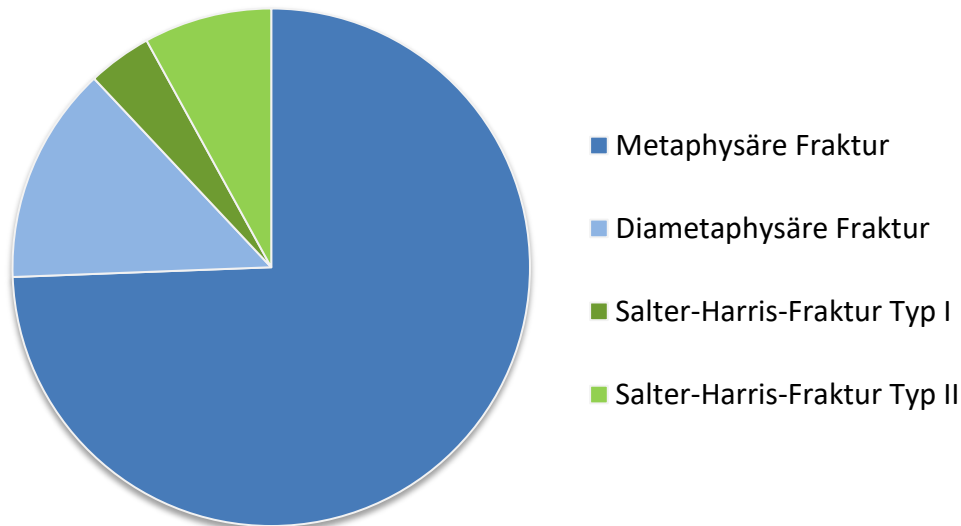
Abbildung 13: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Probekollektivs (Daten aus IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA))

## 4.2 Gesamte Studienpopulation

### 4.2.1 Statistische Daten

126 Kinder und Jugendliche konnten im Rahmen der Studie nachuntersucht werden. Da die sonografische Darstellung der Epiphysenfuge bei 5 Patienten nicht ausreichend gut bewertbar war, wurden diese Patienten aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Von den verbliebenen 121 Kindern und Jugendlichen waren 78 Patienten (64,5 %) männlich und 43 (35,5 %) weiblich. Ihre Altersspanne lag zwischen 2,8 und 17,5 Jahren. 60 Kinder (49,6 %) wurden operativ mit einem Kirschnerdraht versorgt, bei 61 Kindern (50,4 %) war eine konservative Therapie ausreichend. Bei 49 (40,5 %) Patienten lag zusätzlich zu der distalen Radiusfraktur eine Fraktur der distalen Ulna vor, die restlichen 72 (59,5 %) Patienten zeigten isolierte distale Radiusfrakturen.

Insgesamt wurden 125 distale Radiusfrakturen bei den 121, in die Studie eingeschlossenen, Kindern diagnostiziert. Von den 4 Patienten mit jeweils 2 Frakturen zeigten 2 gleichzeitig eine metaphysäre Fraktur und eine Salter-Harris-Fraktur Typ I, die anderen 2 Patienten wiesen eine diaphysäre Fraktur in Kombination mit einer Salter-Harris-Fraktur Typ I auf. Von den insgesamt 125 distalen Radiusfrakturen entsprachen 93 (74,4 %) einer metaphysären Fraktur, 17 (13,6 %) einer diaphysären Fraktur, 5 (4,0 %) einer Salter-Harris-Fraktur Typ I und 10 (8,0 %) einer Salter-Harris-Fraktur Typ II. Insgesamt war bei 15 (12,0 %) Frakturen die Epiphysenfuge betroffen.



**Abbildung 14: Vorkommende Frakturtypen und deren Häufigkeiten (Eigene Darstellung)**

Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Fraktur betrug 8,1 Jahre (0,6 bis 15 Jahre). Zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung waren die Kinder im Schnitt 11,1 Jahre alt (2,8 bis 17,5 Jahre). Das durchschnittliche Follow-Up erfolgte in einem Zeitraum von 3 Jahren. Zwischen dem Zeitpunkt der Fraktur und dem Nachuntersuchungstermin lag bei 120 Kindern (99,2 %) mindestens 1 Jahr. Nur ein Patient (0,8 %) hatte ein Follow-Up von lediglich 11 Monaten.

#### **4.2.2 Längendifferenz von Radius und Ulna gemessen per Röntgen**

Der Mittelwert der per Röntgen gemessenen Längendifferenz von Ulna und Radius liegt bei -2,4 mm mit einer Standardabweichung von 1,4 mm. Die Werte variieren zwischen 0 mm und -6,7 mm. Ihre Verteilung ist in Abbildung 15 dargestellt. Nach der Definition von Hulten (1928) ergaben sich 21 Ulna-Nullvarianten, 100 Ulna-Minusvarianten und null Ulna-Plusvarianten. Die Methode konnte auf den Röntgenbildern von allen 121 Patienten problemlos angewandt werden.

## Röntgen

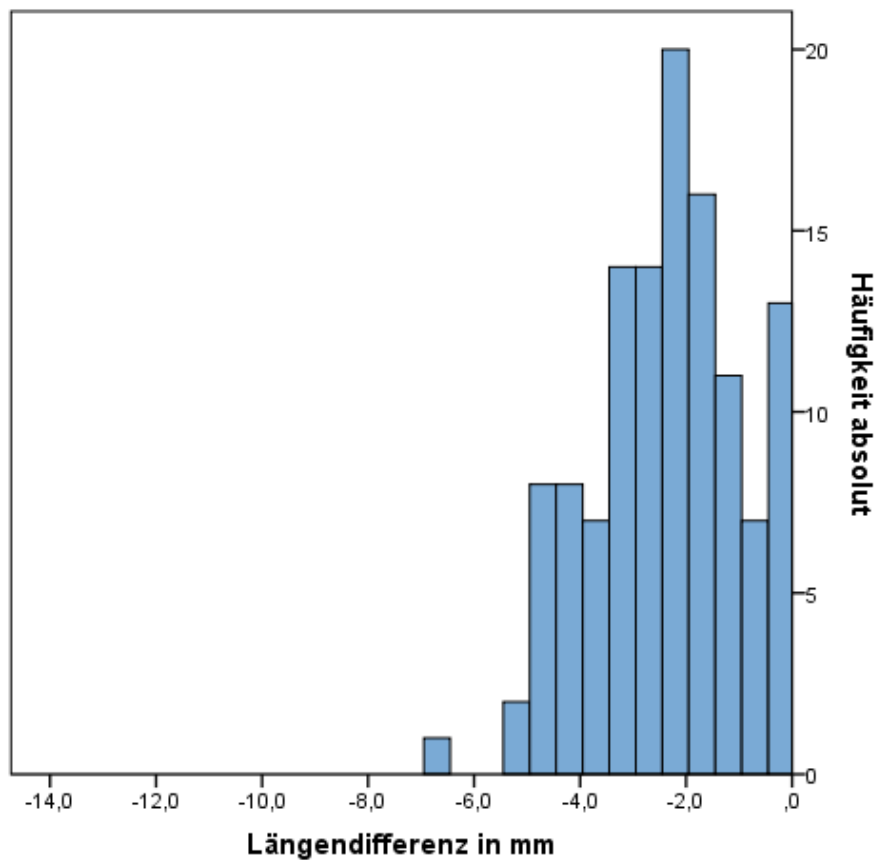
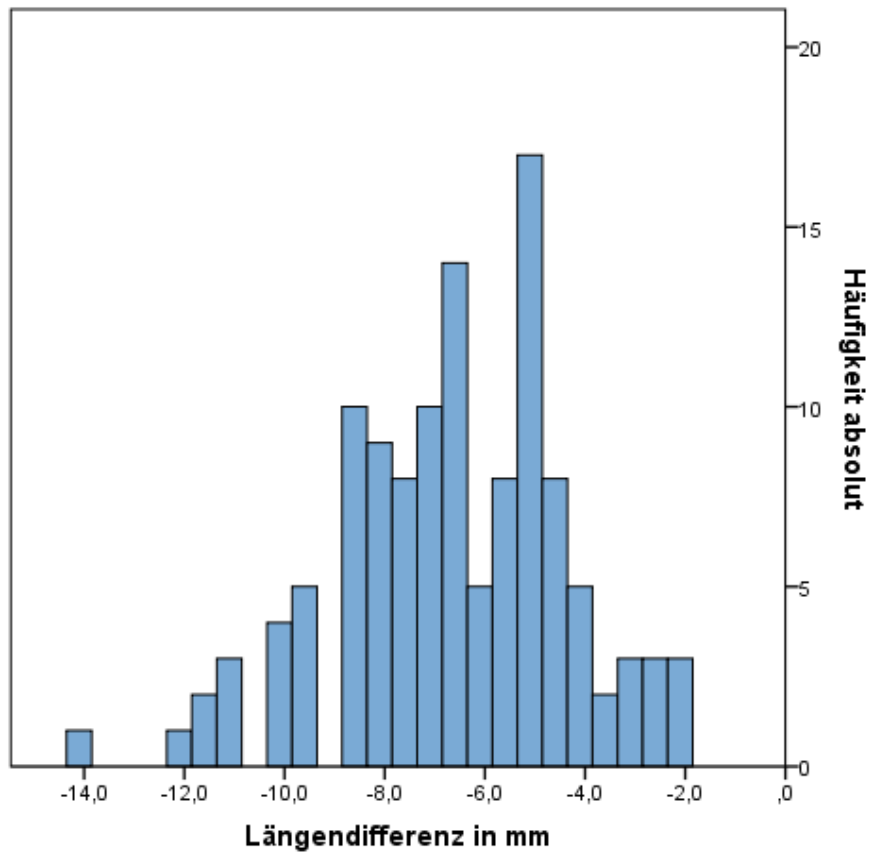


Abbildung 15: Verteilung der per Röntgen gemessenen Längendifferenzen zwischen Radius und Ulna (Eigene Darstellung)

### 4.2.3 Längendifferenz von Radius und Ulna gemessen per Sonografie

Der Mittelwert der per Sonografie gemessenen Längendifferenz von Ulna und Radius liegt bei -6,7 mm mit einer Standardabweichung von 2,3 mm. Die Werte variieren zwischen -1,9 mm und -14,1 mm. Ihre Verteilung ist in Abbildung 16 dargestellt. Nach der Definition von Hulten (1928) ergaben sich 121 Ulna-Minusvarianten, 0 Ulna-Plusvarianten und 0 Ulna-Nullvarianten. Bei 10 Patienten ergab sich eine Längendifferenz negativer als -10,0 mm.

## Sonografie



**Abbildung 16 : Verteilung der per Sonografie gemessenen Längendifferenzen zwischen Radius und Ulna (Eigene Darstellung)**

Wie unter 4.2.1 bereits erwähnt, konnte die sonografische Nachuntersuchung bei 5 von anfänglich 126 Patienten (4,0 %) nur eingeschränkt angewendet werden. Bei allen 5 Jugendlichen (3 Jungen und 2 Mädchen) war der Schluss der Wachstumsfuge bereits zu weit fortgeschritten um die, für die entwickelte Messmethode wichtigen, anatomischen Leitstrukturen sicher darstellen zu können. In Tabelle 2 ist die Altersverteilung dargestellt. Bei einer Patientin erschwerte zusätzlich ein adipös stark vergrößerter Armumfang die Darstellung.

**Tabelle 2: Patienten, bei denen die sonografische Darstellung des distalen Handgelenks nur eingeschränkt möglich war**

<b>Geschlecht</b>	<b>Alter zum Zeitpunkt der Untersuchung</b>	<b>Anzahl Patienten dieser Altersgruppe insgesamt (n=126)</b>	<b>Anzahl Patienten bei denen die Methode nicht funktioniert hat</b>
Weiblich	15	4	1
	17	2	1
Männlich	15	12	1
	16	5	1
	17	5	1

#### **4.2.4 Sonografie und Röntgen im Vergleich**

Die Werte der per Sonografie gemessenen Längendifferenzen ( $M = -6,7$  mm,  $SD = 2,3$  mm) waren durchschnittlich länger als die, für die per Röntgen gemessenen Längendifferenzen ( $M = -2,4$  mm,  $SD = 1,4$  mm). Dieser Unterschied ist hoch signifikant ( $t(120) = -21,4$ ;  $p < 0,001$ ). Die Differenz der Mittelwerte von Sonografie und Röntgen betrug 4,3 mm. Bei keinem Patienten konnten exakt gleiche Werte mittels der zwei verschiedenen Methoden gemessen werden. Bei 10 Patienten ergab sich in den Untersuchungen zwischen Röntgen und Sonografie ein Unterschied von 1 mm oder weniger.

Der Zusammenhang zwischen der Längendifferenz von Radius und Ulna mit dem Alter der Patienten wurde mittels einer einfaktoriellen ANOVA jeweils für das Röntgen und die Sonografie ermittelt. Als Voraussetzungen für die ANOVA konnte für beide Gruppen mittels des Levene-Tests Varianzhomogenität ( $p > 0,05$ ) und mittels des Shapiro-Wilk-Tests ( $p > 0,05$ ) Normalverteilung nachgewiesen werden. Für die röntgenologischen Werte konnte ein statistisch schwach signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen ( $F(15,105) = 1,79$ ;  $p = 0,045$ ) festgestellt werden. Die ANOVA für die per Sonografie bestimmten Längendifferenzen ergab, dass mindestens zwei Altersgruppen statistisch hoch signifikant unterschiedlich sind ( $F(15,105) = 5,09$ ;  $p < 0,001$ ).

In Abbildung 17 sind die Mittelwerte von Röntgen und Sonografie im Zusammenhang mit dem Alter dargestellt. Sie veranschaulicht die durchschnittlich längeren sonografischen Werte im Vergleich zum Röntgen sowie die größere Abhängigkeit der sonografischen Werte vom Alter.

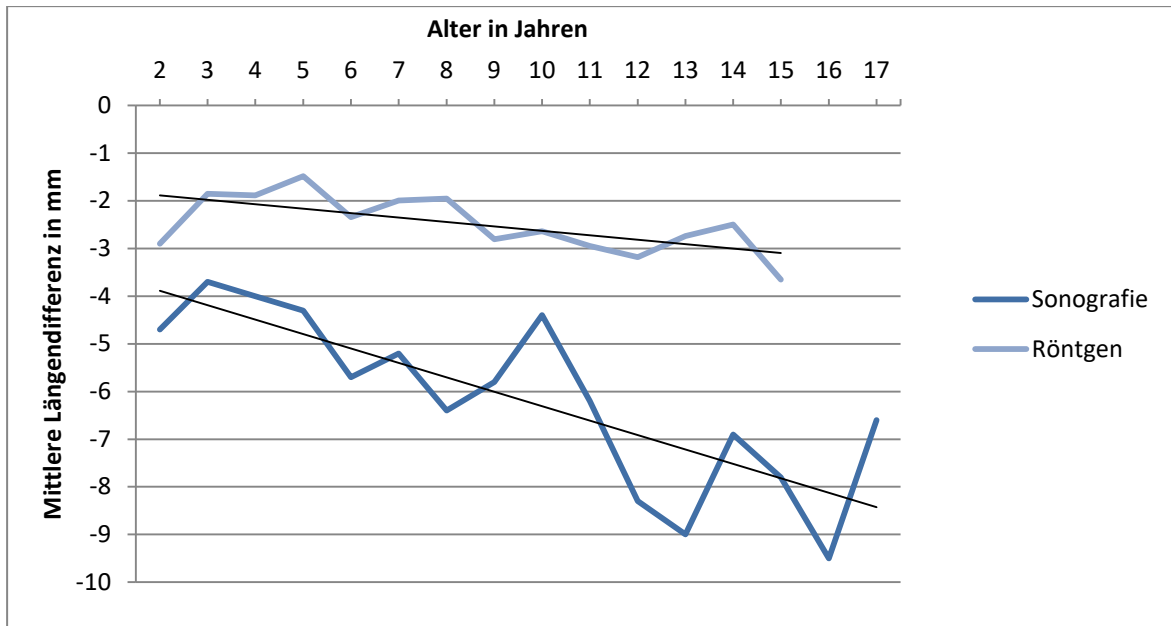


Abbildung 17: Mittelwerte der Längendifferenz von Radius und Ulna im Röntgen und in der Sonografie im Vergleich zum Alter (Eigene Darstellung)

## 5 Diskussion

### 5.1 Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna per Röntgen

Für die Vermessung der Längendifferenz von Radius und Ulna per Röntgen bei Erwachsenen gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Methoden. Steyers und Blair (1989) verglichen die Methoden der Konzentrischen Kreise, der Linienprojektion und der senkrechten Linien und fanden für letztere die höchste Inter- und Intrarater-Reliabilität. Auf der Basis dieser Empfehlung und mit der Frage, welches Vorgehen sich am besten für Kinder eignet, verglichen Kox et al. (2019) die Methode der senkrechten Linien mit der von Hafner et al. (1989). Ihre Ergebnisse zeigten, dass die Methode von Hafner et al. (1989) Einschränkungen bei Jugendlichen aufweist, die älter als 13 Jahre sind und deren Epiphysenfugen bereits teilweise verschlossen sind. Gegenteilig dazu funktionierte die Methode der Senkrechten bei Patienten jünger als 9 Jahre nicht. Für Kinder im Alter von 9 bis 13 Jahren, würden sich beide Techniken anwenden lassen, für die Methode von Hafner et al. (1989) ermittelten Kox et al. (2019) jedoch eine höhere Interrater-Reliabilität. Da das mittlere Alter des Patientenkollektivs der vorliegenden Studie bei 8,3 Jahren lag und nur 8 Patienten zum Zeitpunkt der Fraktur 14 Jahre oder älter waren, wurde sich zur Vermessung der Längendifferenz von Radius und Ulna für die Methode von Hafner et al. (1989)

entschieden. In einem Kollektiv mit mehr Patienten, die älter als 14 Jahre alt sind, sollte für diese Altersgruppe die Methode der senkrechten Linien bevorzugt werden. Anders als bei den meisten Messmethoden orientiert sich das Vorgehen von Hafner et al. (1989) nicht an der distalen Epiphyse, sondern nutzt die distale Metaphyse als Anhaltspunkt. Dadurch entstehen Werte, die mit anderen Methoden schlecht vergleichbar sind. Dieser Nachteil der Methode ist jedoch zu vernachlässigen, da das Ziel dieser Studie der Vergleich zweier Methoden an einem Patient ist und nicht des ganzen Kollektivs mit bereits bestehenden Daten.

**Tabelle 3: Röntgenologisch vermessene Mittelwerte der Längendifferenz von Radius und Ulna in verschiedenen Studien**

Studientitel	Autor	Mittelwert (mm)	Methode	Anzahl der Probanden	Alter der Probanden (Jahre)
Die Sonografie als Screeningmethode posttraumatischer Wachstumsstörungen des distalen Radius im Kindes- und Jugendalter	Sophie Haarbeck	-2,4	Hafner Methode	121	0,6 - 15,0
„Ulnar variance in children“	(Hafner et al. 1989)	-2,6	Hafner Methode	535	1,5 - 15,5
„A comparison of established techniques for measuring ulnar variance in healthy children and adolescents“	(Kox et al. 2019)	-2,1	Hafner Methode	350	4,0 - 18,0
		-1,4	Senkrechte Linien	350	4,0 - 18,0
„Defining ulnar variance in the adolescent wrist“	(Goldfarb et al. 2011)	-0,5	Senkrechte Linien	138	12,0 - 18,0

Der Mittelwert der per Röntgen gemessenen Längendifferenz von Radius und Ulna mittels der Methodik von Hafner et al. (1989) der vorliegenden Studie betrug -2,4 mm mit einer Standardabweichung von 1,4 mm. In der Studie „Ulnar variance in children“ (Hafner et al. 1989) ergab sich für die gleiche Messmethode ein Mittelwert von -2,6 mm bei 535 gesunden Probanden im Alter von 1,5 bis 15,5 Jahren. Kox et al. (2019) vermaßen Röntgenbilder von 350 gesunden Kindern mit einem mittleren Alter von 12,3 Jahren und einer Range von 4 bis 18 Jahren. Mittels der Methode von Hafner et al. (1989) ermittelten sie eine mittlere Längendifferenz von Ulna und Radius von -2,1 mm mit einer Standardabweichung von 1,8. Die Methode der senkrechten Linien verwendend, ergab sich für das gleiche Kollektiv eine Längendifferenz

von -1,4 mm mit einer Standardabweichung von 1,3 mm. Goldfarb et al. (2011) vermaßen mit Hilfe der Methode der senkrechten Linien (Steyers und Blair 1989) 138 gesunde Patienten zwischen 12 und 18 Jahren. Sie kamen zu dem Ergebnis einer mittleren Längendifferenz von -0,5 mm (SD 1,2 mm).

Als Gemeinsamkeit der oben genannten Studien weißt jede mittlere Längendifferenz ein negatives Vorzeichen auf. Somit hat die Mehrzahl der untersuchten Probanden eine kürzere Ulna im Vergleich zum Radius, einer Ulna-Minusvariante entsprechend. Es zeigte sich jedoch grundsätzlich ein Unterschied der Mittelwerte je nach Messmethode. Alle Studien, die die Hafner Methode (Hafner et al. 1989) anwendeten, erhielten Mittelwerte zwischen -2,1 mm (Kox et al. 2019) und -2,6 mm (Hafner et al. 1989). Mit -2,4 mm liegt der Mittelwert der vorliegenden Studie genau dazwischen. Die Methode der senkrechten Linien verwendend, ergaben sich mit -0,5 mm von Goldfarb et al. (2011) und -1,4 mm von Kox et al. (2019) positivere Werte für die Längendifferenz von Radius zu Ulna und somit geringere Abstände. Der Grund für die kürzeren Abstände lässt sich höchst wahrscheinlich in den unterschiedlichen Messpunkten der zwei Methoden begründen. Die Methode der senkrechten Linien verwendet den ulnaren distalsten Punkt der radialen Epiphyse als Messansatz. Im Vergleich dazu misst die Methode von Hafner et al. (1989) zwischen den generell distalsten Stellen der Metaphysen von Radius und Ulna. Die Metaphyse ist in der a.p.-Aufnahme leicht konvex, somit liegt der Messpunkt mittig auf dem distalen Radiusende. Die Epiphyse ist je nach Alter mehr oder weniger schräg, jedoch radiallyseitig immer deutlich länger. Dadurch lassen sich die unterschiedlichen Messpunkte schlecht vergleichen. Würde die Methode der senkrechten Linien den radialsten distalsten Punkt der radialen Epiphyse als Messpunkt verwenden, wäre die Längendifferenz von Radius und Ulna wahrscheinlich länger als die der Hafner Methode (Hafner et al. 1989). Ein weiterer wesentlicher Unterschied der verschiedenen Studien ist, dass im vorliegenden Patientenkollektiv jedes Kind eine distale Radiusfraktur erlitten hat. Die Patienten der Vergleichsstudien waren zum Zeitpunkt der Untersuchung alle gesund und soweit feststellbar auch in der Vorgeschichte frakturfrei. Dieser Unterschied dürfte die Messwerte jedoch nicht beeinflussen, da die Kinder bis zum Zeitpunkt der Fraktur, vorhergehende Frakturen ausgeschlossen, ein normales Wachstum gehabt haben dürften. Wären vor der Erhebung der Röntgenbilder der vorliegenden Studie am gleichen Radius Frakturen aufgetreten, müsste

man die obligatorische stimulative Wachstumsstörung, die im Wachstumsalter besteht (Marzi 2010), berücksichtigen.

Die Unterschiede der verschiedenen Messmethoden berücksichtigend, ist die in dieser Studie per Röntgen ermittelte mittlere Längendifferenz von -2,4 mm zwischen Ulna und Radius gut mit dem aktuellen Forschungsstand zu vereinbaren.

## **5.2 Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna per Sonografie**

### **5.2.1 Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Probekollektivs**

Der ICC-Wert von 0,655 für die Vermessung der 25 Patienten des Probekollektivs entspricht nach Cicchetti (1994) einer guten Interrater-Reliabilität. Somit wurde nachgewiesen, dass die Messgenauigkeit zwischen den drei Untersuchern akzeptabel ist. Ab Werten von 0,75 hätte man von einer exzellenten Übereinstimmung sprechen können. Das 95%-Konfidenzintervall liegt zwischen 0,45 und 0,81 und ist somit in den Bereich von mäßiger bis exzellenter Reliabilität einzuordnen (Cicchetti 1994).

Es gibt mehrere Gründe die das nicht optimale ICC-Niveau erklären können. Als Erstes ist zu nennen, dass zwei der drei Untersucher Studentinnen waren, die über keine langjährige Erfahrung in der Sonografie verfügen. Obwohl die Methode auch für Ärzte mit viel sonografischer Erfahrung neu ist, bringen der gelernte Umgang mit dem Sonografiegerät und die optimale Einstellung des Bildes Vorteile. Weiterhin wurden die Werte für die Berechnung des ICC vom ersten Anwendungsversuch der Methode an aufgezeichnet. Ein vorheriges Training der Untersucher hätte den ICC-Wert verbessern können. Zusätzlich liegen der Berechnung des Intraklassen-Korrelationskoeffizienten zu wenig Probanden zu Grunde. Laut Koo und Li (2016) soll das Kollektiv zur Berechnung optimaler Weise aus mindestens 30 Patienten bestehen. Dieser Studie standen jedoch nur 25 Probanden zur Verfügung.

Auch wenn ein ICC-Wert im Bereich „exzellent“ wünschenswert wäre, steht der Wert von 0,655 für eine ausreichend gute Übereinstimmung der Untersucher für die Fragestellung dieser Studie. Weiterhin ist die durchschnittliche Differenz der drei Untersucher von 2,0 mm relativ gering. Vor allem im Verhältnis zu einer potentiellen hemmenden Wachstumsstörung, welche eine Längendifferenz von ca. 1 cm nach einem Follow-Up von einem Jahr ergeben würde, ist diese Abweichung zwischen den Untersuchern von untergeordneter Relevanz. Mit diesen Erkenntnissen konnte die Untersuchung des eigentlichen Patientenkollektivs begonnen werden.

### **5.2.2 Vergleich der sonografisch ermittelten Werte zur bestehenden Literatur**

Für die sonografische Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna der Patienten des Studienkollektivs ergab sich ein Mittelwert von -6,7 mm mit einer Standardabweichung von 2,3 mm. Die Werte variierten zwischen -1,9 mm und -14,1 mm. Somit ergaben sich nur Ulna-Minusvarianten. Da diese Methode, dem aktuellen Kenntnisstand der Autorin nach, in der Literatur noch nicht bekannt ist, lassen sich die Werte nicht mit anderen Studien vergleichen.

### **5.2.3 Vorteile der selbst entwickelten sonografischen Methode**

Die Darstellung des distalen Radius per Sonografie mit der Frage nach hemmenden Wachstumsstörungen weist im Vergleich zum Röntgen mehrere Vorteile auf.

Als Erstes und am relevantesten zu nennen ist die Freiheit von Röntgenstrahlen. Das kindliche Gewebe ist auf Grund der wachstumsbedingt hohen Mitoserate strahlenempfindlicher als das Gewebe eines Erwachsenen. Weiterhin sind die Körperproportionen von Kindern im Vergleich zum Erwachsenen deutlich anfälliger für Streustrahlung. Auch strahleninduzierte Malignome mit einer sehr hohen Latenzzeit haben bei Kindern eine höhere Chance im Laufe des Lebens aufzutreten (Alzen und Benz-Bohm 2011). Nach dem aktuellen Stand der Literatur weist die Sonografie in diagnostischen Maßen keine Nebenwirkungen auf. Im Gegenteil sollen niedrig dosierte Ultraschallwellen sogar den Heilungsprozess nach Knochenbrüchen fördern (Izadifar et al. 2017).

Ein weiterer Vorteil ist der zeitliche Aspekt. Die komplette Untersuchung des betroffenen distalen Unterarms dauert ungefähr eine Minute und kann von dem verantwortlichen Behandler in der Ambulanz eigenständig vorgenommen werden. Dies ist im Vergleich zum Röntgen, bei dem in der Regel in eine andere Abteilung überwiesen werden muss und mit Wartezeiten zu rechnen ist, eine große Zeitersparnis. Zusätzlich können Missverständnisse zwischen Kollegen vermieden werden, da die Untersuchung, die Auswertung der Ergebnisse und die Behandlung von dem gleichen Arzt durchgeführt werden können.

Weiterhin sind die Dynamik und die Möglichkeit der vergleichenden Untersuchung des gesunden Unterarms bei der Sonografie günstig. So kann geprüft werden, ob ein frühzeitig fortgeschrittenes Verschließen einer Fuge pathologisch ist oder zum Beispiel in einem insgesamt vorangeschrittenen Knochenalter begründet ist. Per

Röntgen einen gesunden Unterarm zu untersuchen, um Radius und Ulna beider Seiten vergleichen zu können, ist aus strahlenhygienischer Sicht schon lange obsolet (Eckert et al. 2012).

#### **5.2.4 Nachteile der selbst entwickelten sonografischen Methode**

Neben den oben genannten Vorteilen, bringt die selbst entwickelte sonografische Methode auch vereinzelt Nachteile mit sich.

Einerseits sind Pathologien der Fuge auf Grund der Auflösung und der fehlenden Übersicht schlechter zu erkennen als im Röntgen. Es ist nicht möglich die ganze Breite der Epiphysenfuge in einer Übersichtsaufnahme darzustellen. Dadurch können Knochenbrücken in der Fuge, die das erste Anzeichen einer Wachstumsstörung sein können, nicht sicher gesehen werden. Im Röntgen können solche Veränderungen bereits ab drei Monaten posttraumatisch diagnostiziert werden (Ecklund und Jaramillo 2001). In der Sonografie hingegen kann eine Wachstumsstörung nur an einer deutlichen Längendifferenzzunahme nach längerer Zeit oder dem kompletten Verschluss der Fuge erkannt werden.

Weiterhin ist die oben genannte Dynamik neben den positiven Aspekten auch als Nachteil zu sehen, da es durch das Schwenken des Ultraschallkopfes zu leichten Ungenauigkeiten während der Messung kommen kann. Um nach der Einstellung der distalen radialen Metaphyse auf die Höhe der Messlatte zur distalen Ulna zu gelangen, muss der Ultraschallkopf auf dem Unterarm geschwenkt werden. Verrutscht der Untersucher bei diesem Schritt, entspricht die Position der Messlatte nicht mehr der distalen Metaphyse des Radius. Bei der Entwicklung der Methode wurde erkannt, dass man diesen Fehler möglichst gering halten kann, indem man den Schallkopf auf dem Radius belässt und nur schwenkt und nicht, wie zuerst geplant, von radial nach ulnar verschiebt. Zusätzlich wurde der Schallkopf beim Schwenken mit der zweiten Hand gestützt. Trotzdem lassen sich minimale Messfehler nicht ausschließen.

Zuletzt ist die entwickelte sonografische Methode nicht mehr anwendbar, wenn die Verknöcherung der Wachstumsfugen zu weit fortgeschritten ist. Bei 5 von 24 Patienten, die zum Zeitpunkt des Follow-Ups älter als 15 Jahre alt waren, ließ sich die Epiphyse nicht mehr deutlich von der Metaphyse abgrenzen. Somit waren die Messpunkte ungenügend klar definiert und die Längendifferenz nicht messbar. Im Fall des begründeten Verdachts auf eine hemmende Wachstumsstörung des

distalen Radius müsste zur Therapieplanung, neben der Sonografie, weitere Bildgebung wie Röntgen oder CT erfolgen. Aufgrund der fehlenden Übersicht über das gesamte distale Handgelenk ist die Sonografie nicht ausreichend für die Planung einer potenziell notwendigen Umstellungsosteotomie.

### **5.3 Lassen sich Wachstumsstörungen des distalen Radius anhand der Differenz von den per Sonografie und Röntgen erhobenen Werten diagnostizieren?**

#### **5.3.1 Die anfängliche Hypothese**

Der Grundgedanke der selbst entwickelten Methode war, dass sich die Längendifferenz zwischen Radius und Ulna beim Auftreten einer hemmenden Wachstumsstörung des Radius ändern würde. Um diese Veränderung nachweisen zu können, bedurfte es zweier Messwerte zu verschiedenen Zeitpunkten. Den Ausgangswert stellte die röntgenologisch gemessene Längendifferenz dar, welche zum Zeitpunkt der Fraktur ermittelt wurde. Als zweiter Wert wurde, mindestens ein Jahr posttraumatisch, die Längendifferenz per eigens entwickelter, sonografischer Messung erhoben. Die Grundlage zur Beurteilung der Differenz aus oben erläuterten Werten bildete die Studie „Standards in Pediatric Orthopedics“ von Hensinger (1986). Anhand seiner Daten zur durchschnittlichen Länge des Radius im Kindesalter ließ sich errechnen, dass der kindliche Radius von Jungen im Schnitt 0,99 cm und von Mädchen 0,96 cm pro Jahr wächst. Dieses Wissen voraussetzend entstand die Idee, eine Wachstumsstörung als Differenz von mindestens 1 cm zwischen den per Röntgen und Sonografie erhobenen Werten zu definieren. Der Wert von 1 cm entsprach dabei einem Richtwert. Zu Zeiten von vermehrtem Wachstum wäre ein Jahr posttraumatisch bereits eine größere Differenz als 1 cm zu erwarten. Somit würde die Wachstumsstörung noch deutlicher auffallen. Problematisch wären Zeiten von geringerem Wachstum. Bei Jugendlichen, die nahezu ausgewachsen sind, führt eine hemmende Wachstumsstörung zu minimalen Längenunterschieden. Kinder im Alter von ca. 5 bis 10 Jahren, die sich zwischen den zwei großen Wachstumsphasen befinden, könnten bei einer hemmenden Wachstumsstörung ein Jahr posttraumatisch eine geringere Längendifferenz als 1 cm aufweisen. Aus diesem Grund wurde das Follow-Up in dieser Studie im Schnitt erst nach 3 Jahren durchgeführt. Nach dieser Zeitspanne würde auch bei Kindern mit weniger als durchschnittlich 0,99 cm

bzw. 0,96 cm Wachstum pro Jahr eine Verkürzung des Radius deutlich auffallen. Die Bedingung für sinnvolle Ergebnisse der hier beschriebenen ursprünglichen Idee war, dass die per Röntgen und Sonografie erhobenen Werte vergleichbar sind.

### **5.3.2 Vergleich von röntgenologischer und sonografischer Methode**

Für die röntgenologische Methode ergaben sich 21 Ulna-Nullvarianten und 100 Ulna-Minusvarianten. Die per Sonografie gemessenen Längendifferenzen von Ulna und Radius ergaben 121 Ulna-Minusvarianten. Keine der beiden Methoden ergab eine Ulna-Plusvariante, somit lag in keinem Fall ein deutlich verkürzter Radius im Vergleich zu Ulna vor. Die sonografischen Längendifferenzen ergaben im Durchschnitt ( $M = -6,7$  mm,  $SD 2,3$  mm) deutlich längere Abstände als die per Röntgen ermittelten Längendifferenzen ( $M = -2,4$  mm,  $SD 1,4$  mm). Die Mittelwerte sind hoch signifikant unterschiedlich und somit nicht direkt vergleichbar ( $t = -21,4$ ,  $p < 0,001$ ). Die Differenz von durchschnittlich 4,3 mm zwischen den zwei verschiedenen Methoden lässt sich anhand mehrerer Aspekte erklären.

Wie weiter oben bereits erwähnt, entstehen zwei grundsätzlich verschiedene Bilder bei den unterschiedlichen Methoden. Das Röntgenbild zeigt eine Übersicht vom Handgelenk, auf dem gleichzeitig Ulna und Radius beurteilbar sind und die Unterarmknochen in der gesamten Breite dargestellt werden können. Somit lassen sich die distalsten Stellen der Metaphysen von Ulna und Radius sehr genau festlegen und sich ihr Abstand auf dem Standbild gut messen. In der entwickelten sonografischen Methode können beide Knochen nur nacheinander betrachtet werden. Es ist weiterhin nicht möglich die gesamte Breite der Metaphyse in einem Bild darzustellen, da für die Messung der Schallkopf parallel zum Verlauf des Knochens gehalten werden muss. Aufgrund der konvexen Form der Metaphyse ist es im Längsschnitt schwerer, sich auf den distalsten Punkt festzulegen. So können fälschlicher Weise längere Abstände erhoben werden, wenn zum Beispiel zwischen distalstem Punkt der radialen Metaphyse und einem proximaleren Punkt der ulnaren Metaphyse gemessen wird. Diese Fehlerquelle erklärt ebenfalls die grundsätzlich längeren sonografischen Längendifferenzen.

Ein wesentlicher Unterschied der beiden Methoden ist zusätzlich die Stellung des Unterarms bei der Vermessung. Die Aufnahme des Röntgenbildes erfolgt in Neutralstellung. Diese wird durch Anheben der Schulter um  $90^\circ$  und Beugung im

Ellenbogen um ebenfalls 90° verwirklicht. Im Gegensatz dazu erfolgt die sonografische Untersuchung in Pronationsstellung. Durch die Verdrehung des Radius um die Ulna wird die Längendifferenz der beiden Knochen bei dieser Stellung eigentlich verkürzt. Da der Betrag der sonografisch ermittelten Werte bereits im Mittel um 4,3 mm länger ist als beim Röntgen, dürften die Werte der Sonografie, würde diese auch in Neutralstellung vermessen werden, noch mehr vom Röntgen abweichen.

Weiterhin lassen sich die Werte aus Röntgen und Sonografie schlecht vergleichen, da sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Als die Patienten ihr Röntgenbild erhielten, waren sie im Schnitt 8,1 Jahre alt. Zum Zeitpunkt des Follow-Ups lag das Durchschnittsalter bei 11,1 Jahren. Somit lagen durchschnittlich 3 Jahre zwischen den beiden Untersuchungen. Mittels einer einfaktoriellen ANOVA wurde berechnet, dass beide Methoden vom Alter abhängig sind und die Beträge der Längendifferenzen mit steigendem Alter zunehmen. Für die Sonografie ergab sich ein hoch signifikanter ( $F(15,105)=5,09$ ;  $p<0,001$ ) Unterschied zwischen den Altersgruppen. Da die sonografische Methode in der Literatur noch nicht beschrieben wurde, gibt es keine Vergleichswerte. Bei den per Röntgen erhobenen Werten zeigte sich hingegen nur ein schwach signifikanter Unterschied ( $F(15,105)=1,79$ ;  $p=0,045$ ). Die Korrelation zwischen Längendifferenz und Alter ist für die röntgenologische Vermessung in der Literatur unterschiedlich bewertet. In der Studie „Ulnar variance in children“ von Hafner et al. (1989), welche mittels der Hafner Methode die Längendifferenz von Radius und Ulna auf Röntgenbildern untersucht haben, wurde eine geringe Zunahme der Längendifferenz mit steigendem Alter beschrieben. Dies stimmt mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie, die ebenfalls die Methode von Hafner et al. (1989) verwendete, überein. Goldfarb et al. (2011) nutzten in ihrer Studie die Methode der senkrechten Linien von Steyers und Blair (1989), um die Längendifferenzen zu erheben und konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen den Altersgruppen feststellen. Beide genannten Studien schlossen im Vergleich zu der vorliegenden Studie nur gesunde Kinder ohne Fraktur in der Vorgeschichte ein. Die für beide Methoden nachgewiesene Abhängigkeit der Längendifferenz vom Alter spricht zusätzlich dafür, dass sich die Werte aus Röntgen und Sonografie, welche mit einem zeitlichen Abstand von durchschnittlich 3 Jahren erhoben wurden, nicht vergleichen lassen.

Der zeitliche Abstand zwischen den Aufnahmen der unterschiedlichen Methoden, stellt eine weitere Erklärung für die große Differenz der Mittelwerte dar. Die Röntgenaufnahmen wurden zum Zeitpunkt der Fraktur gemacht, als das Knochenwachstum, andere Pathologien ausgeschlossen, noch dem altersentsprechenden Zustand gleichkam. Im Gegenteil dazu wurden die sonografischen Aufnahmen posttraumatisch und mit einem durchschnittlichen Follow-Up von 3 Jahren zum Trauma erfasst. Die im Durchschnitt längeren Abstände in der Sonografie könnten sich deshalb auch durch die posttraumatische Stimulation der Epiphysenfuge erklären lassen. Wie unter 2.6.1 beschrieben, können stimulative Wachstumsstörungen, welche obligatorisch nach Frakturen im Wachstumsalter auftreten, zu Verlängerungen von Knochen mit einem Ausmaß von bis zu 1 cm führen (Marzi 2010).

Die grundlegenden Unterschiede der zwei Methoden wie die Übersichtlichkeit des entstandenen Bildes, die Stellung des Unterarmes und der Zeitpunkt der Aufnahmen erklären die große Differenz der Mittelwerte von 4,3 mm. All diese Aspekte führen zu der Erkenntnis, dass sich Röntgen und Sonografie für den Zweck der vorliegenden Studie nicht vergleichen lassen. Somit musste die anfängliche Idee, Wachstumsstörungen anhand der Differenz der per Röntgen und Sonografie erhobenen Längenunterschiede von Radius und Ulna festzustellen, verworfen werden.

#### **5.4 Sind Wachstumsstörungen am distalen Unterarm mittels der selbst entwickelten sonografischen Methode diagnostizierbar?**

##### **5.4.1 Isolierte Wachstumsstörungen des distalen Radius**

Die Vermessung der Längendifferenz zwischen Radius und Ulna mittels der selbst entwickelten sonografischen Methode ergab für das gesamte Patientenkollektiv nur Ulna-Minusvarianten. Eine hemmende Wachstumsstörung des distalen Radius würde jedoch als Ulna-Plusvariante auffallen. Somit konnte in der vorliegenden Studie keine hemmende Wachstumsstörung des distalen Radius nachgewiesen werden. In dem folgenden Abschnitt wird diskutiert, ob sich die sonografische Methode trotzdem zur Diagnostik einer hemmenden Wachstumsstörung am distalen Radius eignet.

Die wahrscheinlichste Ursache für den fehlenden Nachweis bzw. das fehlende Vorliegen einer Wachstumsstörung ist die Anzahl an Epiphysenfugenverletzungen. Studien zur Epidemiologie von Wachstumsstörungen des distalen

Radius beziehen sich, im Gegenteil zu der vorliegenden Arbeit, oft nur auf Salter-Harris-Frakturen. So stellten Cannata et al. (2003) eine Prävalenz von 4,4 % Wachstumsstörungen bei 157 Patienten mit Epiphysenfrakturen fest und Davis und Green (1976) kamen auf 1,9 % von 53 Salter-Harris-Typ II Frakturen. Bei dem vergleichsweise niedrigen Anteil von 15 Patienten (12,0 %) mit Salter-Harris-Fraktur am gesamten Kollektiv war die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer hemmenden Wachstumsstörung grundsätzlich sehr gering.

Weiterhin wurde während der sonografischen Untersuchung nicht nur die Längendifferenz gemessen, sondern auch der Zustand der Epiphysenfugen von distalem Radius und distaler Ulna beurteilt. Eine hemmende Wachstumsstörung mit frühzeitigem Verschluss der radialen Epiphysenfuge wäre somit, vor allem in der vergleichenden Untersuchung mit der Gegenseite, gut zu erkennen. Bei insgesamt 5 von ursprünglich 126 Patienten waren die Fugen von Radius und Ulna deutlich fortgeschritten verschlossen. Da, wie in Tabelle 2 beschrieben, alle 5 Patienten 15 Jahre oder älter waren und die Fugen jeweils in beiden Knochen nur noch schlecht beurteilbar waren, ist in diesen Fällen von normalem, altersentsprechend fortgeschrittenem Wachstum auszugehen.

Zusätzlich zu der sonografischen Längendifferenzvermessung erfolgten weitere Untersuchungen, um das Übersehen einer Wachstumsstörung so weit wie möglich zu minimieren. Dazu zählte einerseits das anamnestische Erheben möglicher Symptome einer hemmenden Wachstumsstörung wie Schmerzen oder Einschränkungen im Alltag. Weiterhin wurden die Kinder und Jugendlichen klinisch auf Bewegungseinschränkungen und Druckschmerz untersucht. Als Drittes gab es eine zusätzliche Vermessung der Länge des Radius per Maßband am supinierten Arm der Patienten. Da der Schwerpunkt dieses Teils der Studie die sonografische Messmethode ist, wurden die Ergebnisse der anderen Untersuchungsmethoden in einer weiteren Arbeit detailliert ausgewertet. Es ergab sich dabei in den zusätzlichen Untersuchungsmethoden kein konkreter Hinweis auf eine hemmende Wachstumsstörung des Radius.

Eine spezielle Situation stellen Wachstumsstörungen des distalen Radius bei Jugendlichen dar, welche fast ausgewachsen sind. Durch das fortgeschrittene Verschließen der Epiphysenfugen sind die Metaphysen nur noch schlecht von den Epiphysen abgrenzbar und somit das Vermessen mittels der selbst entwickelten

Methode nicht mehr möglich. Die Idee per Sonografie die Längendifferenz für Jugendliche zwischen den Epiphysen zu messen, wie es bei den röntgenologischen Methoden für Jugendliche üblich ist (Steyers und Blair 1989), wurde in Betracht gezogen. Im Vergleich zu den leicht konvexen Flächen der distalen Metaphysen von jüngeren Kindern, sind die distalen Flächen der Epiphysen von ausgewachsenen Unterarmknochen jedoch stark konkav. Dadurch wäre es deutlich schwerer für den Untersucher sich beim Messen per Sonografie auf den distalsten Punkt festzulegen. Weiterhin stellt die Epiphysenfuge einen breiten, knochenfreien Spalt in der Sonografie dar, der relativ einfach aufzufinden ist. Der Gelenkspalt zwischen Radius und den Handwurzelknochen eines nahezu ausgewachsenen Jugendlichen ist im Gegenteil dazu sehr schmal. Somit erscheint eine sonografische Messung der Längendifferenz zwischen den Epiphysen wenig sinnvoll. Hinzu kommt, dass Mädchen ab einem Alter von 15 Jahren nur noch ein jährliches radiales Wachstum von 1,6 mm und Jungen ab einem Alter von 16 Jahren von 3,5 mm haben (Hensinger 1986). Da bei Mädchen ab dem 16. und bei Jungen ab dem 18. Lebensjahr das röntgenologisch messbare Wachstum beendet ist, führen hemmende Wachstumsstörungen bei älteren Jugendlichen nur zu minimalen Längendifferenzen (Hensinger 1986). Eine Verkürzung des Radius von weniger als 1 cm verursacht laut der Studie von Cannata et al. (2003) keine Symptome. Somit ist die Diagnostik für diese Patientengruppe ohnehin von wenig Interesse.

Schlussendlich lässt sich nicht sicher feststellen, ob eine hemmende Wachstumsstörung des distalen Radius mittels der neu entwickelten sonografischen Methode diagnostiziert werden kann. Hierfür fehlt der Nachweis einer Wachstumsstörung im vorliegenden Patientenkollektiv. Es lässt sich jedoch eindeutig beurteilen, ob eine Ulna-Minus- oder Ulna-Plusvariante vorliegt und ob die radiale Epiphysenfuge generell noch geöffnet ist. Aufgrund dieser beiden Kriterien wird mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen, dass eine hemmende Wachstumsstörung des distalen Radius in der Sonografie aufgefallen wäre. Um die per Sonografie vermessene Längendifferenz von Radius und Ulna definitiv zur Diagnostik von hemmenden Wachstumsstörungen des distalen Radius empfehlen zu können, wären weitere Studien notwendig. Wenn bei der Sonografie der Verdacht auf eine hemmende Wachstumsstörung besteht oder der Patient trotz unauffälligem Sonografiebefund Beschwerden

im distalen Handgelenk angibt, sollte zur Sicherheit und eventuellen Therapieplanung ein Röntgenbild des Unterarms empfohlen werden.

#### **5.4.2 Kombinierte Wachstumsstörungen von distalem Radius und distaler Ulna**

Eine kombinierte hemmende Wachstumsstörung von distalem Radius und distaler Ulna würde durch die Verkürzung der gesamten Unterarmlänge auffallen. Die Längendifferenz der beiden Knochen wäre dabei, angenommen die Wachstumsstörungen treten zum gleichen Zeitpunkt auf und sind in beiden Fugen gleich stark ausgeprägt, annähernd normwertig. Daher wäre in diesem Fall die alleinige Bestimmung der Längendifferenz mittels der entwickelten sonografischen Methode nicht hilfreich. Hier wäre der Vorteil der Dynamik der Sonografie entscheidend. Der Untersucher könnte die Epiphysenfugen von beiden distalen Unterarmen sonografisch untersuchen und dadurch feststellen, ob die Fugen der fraglich pathologischen Seite weiter verschlossen sind als die des gesunden Arms. In der vorliegenden Studie wurden zusätzlich die Unterarmlängen zwischen Processus styloideus radii und Epicondylus lateralis humeri per Maßband am Arm gemessen und die Differenz beider Seiten betrachtet. Da diese Methode jedoch nicht sehr präzise ist, müssten die Unterarmlängen bei dem Verdacht auf eine kombinierte Wachstumsstörung auf Röntgenbildern gemessen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass posttraumatisch gleichzeitig eine Wachstumsstörung von distaler Ulna und distalem Radius entsteht ist extrem gering, da beide einzeln betrachtet nicht häufig auftreten. Posttraumatische Wachstumsstörungen des distalen Radius sind mit 1,9 % (Davis und Green 1976) bis 4,4 % (Cannata et al. 2003) beschrieben, bei der Ulna treten sie in 50,0 % (Cannata et al. 2003) bis 55 % (Golz et al. 1991) der Fälle auf. In der Literatur ist ein einziger Fall zu kombinierten Wachstumsstörungen beschrieben, der jedoch nach neonatalem Kompartmentsyndrom und nicht posttraumatisch aufgetreten ist (Gauger et al. 2017).

#### **5.4.3 Isolierte Wachstumsstörungen der distalen Ulna**

Die per Sonografie erhobenen Längendifferenzen für Radius und Ulna waren generell negativ. Somit lag bei allen Patienten des vorliegenden Kollektivs eine kürzere Ulna im Vergleich zum Radius vor. Aufgrund der stark variierenden Werte für

die Längendifferenz von Ulna und Radius (-1,9 bis -14,1 mm) lässt sich schwer festlegen, ab welchem Wert eine pathologische Verkürzung vorliegt.

In dem Wissen, dass der Radius pro Jahr ca. 1 cm wächst (Hensinger 1986), müsste die Längendifferenz von Ulna und Radius bei einem kompletten Verschluss der distalen ulnaren Epiphysenfuge ein Jahr posttraumatisch ca. 1 cm negativer sein. Da das Follow-Up durchschnittlich 3 Jahre nach der Fraktur erfolgte, müsste sogar von einer Längendifferenz von im Schnitt -3 cm ausgegangen werden. Es gab insgesamt 10 Patienten mit einer sonografisch gemessenen Ulna-Minusvariante welche mehr als -10,0 mm ausgeprägt war. Die maximale Längendifferenz lag bei -14,1 mm. In dieser Gruppe lag bei nur 4 Patienten neben der distalen Radiusfraktur gleichzeitig eine distale Ulnafraktur vor. Bei den restlichen 6 Patienten wurde ausschließlich eine distale Radiusfraktur diagnostiziert. Es besteht die Möglichkeit, dass bei diesen 6 Patienten minimale Ulnafrakturen übersehen wurden. Die Wahrscheinlichkeit, dass so gering ausgeprägte Frakturen zu Wachstumsstörungen führen, ist jedoch sehr gering. Weiterhin wäre es möglich, dass in diesen Fällen eine stark ausgeprägte stimulative Wachstumsstörung des Radius zu den ausgeprägten Ulnaminus-Varianten geführt hat. Generell lässt sich somit bei einer Längendifferenz von mehr als -10,0 mm nicht automatisch auf eine Wachstumsstörung der distalen Ulna schließen. Weiter stellten Cannata et al. (2003) in ihrer Studie zu Epiphysenfrakturen des distalen Unterarms fest, dass Ulnaverkürzungen unter 30,5 mm in ihrem Kollektiv symptomfrei waren. Da diese Werte jedoch auf Röntgenbildern ermittelt wurden, lässt sich dieser Zahlenwert nicht als Definition einer Wachstumsstörung der distalen Ulna in der Sonografie festlegen.

Um isolierte Wachstumsstörungen der Ulna mittels Längendifferenzmessung per Sonografie diagnostizieren zu können, müssten zukünftige Studien Richtwerte festlegen, ab welchem Abstand eine pathologische Veränderung vorliegt. Ähnlich wie bei der radialen Epiphysenfuge, lässt sich mittels Sonografie jedoch auch der generelle Zustand der ulnaren Epiphysenfuge darstellen und somit ein kompletter Wachstumsfugenverschluss ausschließen. Nach dem aktuellen Stand sollte bei konkretem Verdacht auf eine Wachstumsstörung der Ulna weitere bildgebende Diagnostik erfolgen.

## 5.5 Zukünftige Studien

Die ursprüngliche Idee verfolgend, könnte man Kinder zum Zeitpunkt der Fraktur neben der Röntgenaufnahme auch sonografisch untersuchen. Somit ließe sich die durchschnittliche Abweichung der beiden Methoden, ohne Verfälschung durch post-traumatische Veränderungen oder den zeitlichen Abstand, voneinander ermitteln. Dieser Wert gilt als Voraussetzung, um sinnvoll eine Differenz zwischen Röntgen, welches zum Zeitpunkt der Fraktur aufgenommen wird, und Sonografie, welche später bei Beschwerden einer potentiellen Wachstumsstörung stattfindet, bilden zu können.

Für zukünftige Forschungsprojekte wäre es ebenso von Interesse, eine Studienpopulation mit mehr fugenbeteiligten Frakturen des distalen Radius zu betrachten. Eine ausreichend große Anzahl an Fugen verletzenden Frakturen ist die Voraussetzung für das Auftreten von hemmenden Wachstumsstörungen im Kollektiv. Basierend auf den Ergebnissen der Studien von Cannata et al. (2003) und Davis und Green (1976), die Anteile von 1,9 % bzw. 4,4 % hemmender Wachstumsstörungen an Salter-Harris-Frakturen ermittelten, wäre ein deutlich größeres Patientenkollektiv mit ausschließlich Fugen kreuzender Frakturen sinnvoll. Somit könnten Standardwerte zur Definition einer Wachstumsstörung festgelegt werden und es ließe sich eine Aussage treffen, wie sicher Wachstumsstörungen per sonografischer Untersuchung festgestellt werden können.

Weiterhin wäre eine Studie zur Ermittlung von Standardwerten für die selbst entwickelte sonografische Methode der Längendifferenzbestimmung von Radius und Ulna informativ. Dafür müsste ein großes Kollektiv gesunder Kinder mit jeweils genügend Patienten pro Altersgruppe vermessen werden. Dieses Wissen würde helfen, besonders negative Werte besser im Hinblick auf potentielle Wachstumsstörungen der Ulna beurteilen zu können. In der vorliegenden Studie wurden nur potentielle Wachstumsstörungen des Radius betrachtet, welche positive Werte für die Längendifferenz ergeben würden.

## 6 Zusammenfassung

Distale Radiusfrakturen sind die häufigsten Frakturen im Kindes- und Jugendalter (Randsborg et al. 2013). Dabei begünstigen Salter-Harris-Frakturen oder Verletzungen fugennaher Gefäße hemmende Wachstumsstörungen, welche im Verlauf zu Komplikationen wie Schmerzen und Bewegungseinschränkungen führen können (Cannata et al. 2003). Als weiterer Risikofaktor werden operative Behandlungsverfahren wie das Einbringen eines Kirschner-Drahtes durch die Epiphysenfuge diskutiert. Die etablierten Verfahren zur Diagnostik von Wachstumsstörungen sind Röntgen und CT. Da das kindliche Gewebe im Vergleich zum Erwachsenen eine ca. zehnfach höhere Strahlensensibilität (Brenner et al. 2001) (Hall 2002) aufweist, ist die Entwicklung eines alternativen Diagnostikverfahrens dringend sinnvoll. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Sonografie als strahlenfreie, schnell und einfach im klinischen Alltag anwendbare Screeningmethode für Wachstumsstörungen des distalen Radius zu testen.

Posttraumatische hemmende Wachstumsstörungen des distalen Radius fallen durch eine veränderte Längendifferenz zwischen Radius und Ulna auf und stellen sich als stark ausgeprägte Ulna-Plusvarianten dar. Um diesen potentiellen posttraumatischen Unterschied ermitteln zu können, wurde die Längendifferenz zu zwei Zeitpunkten erhoben. Die erste Vermessung erfolgte mittels der Hafner Methode (Hafner et al. 1989) auf Röntgenbildern, welche zum Zeitpunkt der Fraktur entstanden. Dabei wurde der Abstand der Unterarmknochen zwischen den distalsten Punkten der distalen Metaphysen von Radius und Ulna ermittelt. Zum Zeitpunkt des Follow-Ups erfolgte die Vermessung mittels der selbst entwickelten sonografischen Methode. Hierfür wurde der Ultraschallkopf auf dem pronierten Unterarm in der Sagittalebene von der distalen Radiusfuge zu der distalen Ulnafuge geschwenkt und ebenfalls zwischen den distalsten Punkten der Metaphysen vermessen. Anschließend wurde die Differenz beider Werte gebildet.

Insgesamt nahmen 126 Patienten mit Zustand nach traumatischer distaler Radiusfraktur am Follow-Up teil. Bei 2 Mädchen (15 und 17 Jahre) und 3 Jungen (15, 16 und 17 Jahre) war die Epiphysenfuge aufgrund des fortgeschrittenen Wachstums in der Sonografie nicht darstellbar. Von den restlichen 121 Patienten entsprachen 4,0 % Salter-Harris-Frakturen Typ I, 8,0 % Salter-Harris-Frakturen Typ II, 74,4 % meta-

physären und 13,6 % diaphysären Frakturen. 64,5 % der Patienten waren männlich, 35,5 % weiblich. Zum Zeitpunkt des Röntgenbildes waren die Patienten im Schnitt 8,1 Jahre alt, das Follow-Up erfolgte durchschnittlich 3 Jahre später. Die mittlere Längendifferenz zwischen Radius und Ulna lag für die sonografische Methode bei -6,7 mm, für die per Röntgen ermittelten Werte bei -2,4 mm. Die Differenz der beiden Mittelwerte von 4,3 mm ist hoch signifikant ( $t = -21,4$ ,  $p < 0,001$ ).

Aufgrund des hoch signifikanten Unterschiedes der Mittelwerte von den per Röntgen und Sonografie erhobenen Längendifferenzen eignet sich deren Vergleich nicht als Diagnoseparameter einer Wachstumsstörung. Die Hauptgründe für die große Abweichung der Werte sind der zeitliche Abstand der Aufnahmen, die potentiellen posttraumatischen Veränderungen und die unterschiedlichen Stellungen des Unterarms während der Bildaufnahme. Die per Sonografie ermittelten Längendifferenzen von Radius und Ulna allein als Diagnosekriterium betrachtend, ergab sich kein Hinweis auf eine Wachstumsstörung des distalen Radius im vorliegenden Kollektiv. Dies ist hauptsächlich auf den Anteil fugenkreuzender Frakturen von nur 15 Patienten (12,0 %) zurückzuführen. In der Literatur sind 1,9 % (Davis und Green 1976) bis 4,4 % (Cannata et al. 2003) hemmende Wachstumsstörungen des distalen Radius bei Studienpopulationen beschrieben, welche ausschließlich aus Patienten mit Salter-Harris-Frakturen bestehen. Da sich bei den 121 untersuchten Patienten die Epiphysenfugen in der Sonografie offen darstellten und sich nur Ulna-Minusvarianten ergaben, kann das Vorliegen einer hemmenden Wachstumsstörung im untersuchten Patientenkollektiv mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Somit kann die selbstentwickelte sonografische Methode empfohlen werden, um mittels der Aussage über Ulna-Plus- oder Ulna-Minusvariante einerseits und der Beurteilung der distalen Epiphysenfugen von Radius und Ulna andererseits eine erste Aussage über das Vorliegen einer hemmenden Wachstumsstörung des distalen Radius zu treffen. Es bräuchte weitere Studien mit einem größeren Anteil an Salter-Harris-Frakturen, um Grenzwerte für pathologische Längendifferenzen für die sonografische Methode festzulegen und um beim Vorliegen einer Wachstumsstörung sicher aussagen zu können, ob die neue Methode diese zuverlässig nachweisen kann.

# 7 Anhang

## 7.1 Fragebogen

Datum der Untersuchung: \_\_\_\_\_

Untersucher: \_\_\_\_\_

Patienten-ID:

Geburtsdatum:

Frakturseite:

Datum Fraktur/Versorgung:

Art der Fraktur:

K-Draht:

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:
  - o Schreiben: ja/nein
  - o Essen: ja/nein
  - o Sonstige Auffälligkeiten: \_\_\_\_\_

**Klinische Untersuchung**

- Druckschmerz:
- Bewegungseinschränkungen im Vergleich zur gesunden Seite (in Grad):
  - o Ulnaabduktion
  - o Radialabduktion
  - o Palmarflexion
  - o Dorsalextension
  - o Pronation
  - o Supination
- Länge des Unterarms (in cm):
  - o Rechts:
  - o Links:

## 7.2 Längendifferenz von Radius und Ulna gemessen per Sonografie im Probekollektiv

Patientennummer/ Untersucher	Untersucher 1	Untersucher 2	Untersucher 3
1	5,3	4,3	4,8
2	7,4	5,7	6,4
3	5,9	6,4	6,3
4	5,4	5,3	5,7
5	7,7	8,1	8,5
6	10,2	7,3	8,3
7	3,5	4,7	4,7
8	5,8	2,4	2,4
9	2,8	5,6	5,1
10	1,4	2,7	2,4
11	6,6	6,5	4,7
12	8,9	4,8	5,9
13	2,1	7,3	6,4
14	10,0	6,7	6,5
15	4,8	5,9	5,2
16	3,5	1,2	1,1
17	3,5	3,0	1,5
18	7,0	6,5	6,8
19	7,5	8,1	8,0
20	4,4	6,5	5,0
21	4,2	5,7	3,6
22	7,7	9,8	7,9
23	9,7	6,0	7,3
24	6,9	4,6	6,2
25	7,9	6,5	7,1

### 7.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Länge des Radius in Abhängigkeit vom Alter, Sprung zwischen 9. und 10. Lebensjahr, da sich die Messmethode ändert (Eigene Darstellung in Anlehnung an Hensinger (1986)).....	6
Abbildung 2: Varianten der Ulnavarianz nach Hulten (1928) (Eigene Darstellung in Anlehnung an Hafner et al. (1989)) .....	10
Abbildung 3: Einschlusskriterien des Patientenkollektivs (Eigene Darstellung) .....	15
Abbildung 4: Methode A und B zur Messung der Längendifferenz von Radius und Ulna per Röntgen (Eigene Darstellung in Anlehnung an Hafner et al. (1989)) .....	18
Abbildung 5: Vermessung der Längendifferenz per Röntgen. Erster Schritt: Linie durch proximale Begrenzungen der radialen Epiphysenfuge, 10-jähriger Patient (Eigene Darstellung) .....	19
Abbildung 6: Vermessung der Längendifferenz per Röntgen. Zweiter Schritt: Verschieben der Linie zum distalsten Punkt der radialen Metaphyse, 10-jähriger Patient (Eigene Darstellung).....	20
Abbildung 7: Vermessung der Längendifferenz per Röntgen. Dritter Schritt: Abstand zwischen distalstem Punkt der ulnaren Metaphyse und gezogener Linie, 10-jähriger Patient (Eigene Darstellung).....	20
Abbildung 8: Vermessung der Längendifferenz per Sonografie. Erster Schritt: Übersichtseinstellung des distalen Radius, 13-jähriger Patient (Eigene Darstellung)	22
Abbildung 9: Vermessung der Längendifferenz per Sonografie. Zweiter Schritt: Einstellen des distalen Endes der Metaphyse des Radius auf die Höhe der Messleiste, 13-jähriger Patient (Eigene Darstellung).....	22
Abbildung 10: Vermessung der Längendifferenz per Sonografie. Dritter Schritt: Schwenken zu der distalen Ulna und Vermessen des Abstandes vom distalen Ende der Metaphyse der Ulna zur Messleiste, 13-jähriger Patient (Eigene Darstellung) ....	23
Abbildung 11: Geschätzte Längendifferenz einer 17-jährigen Patientin, deren Epiphysenfugen bereits zu weit verschlossen waren, um die Messpunkte genau definieren zu können (Eigene Darstellung).....	23

Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf und Einsatz der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zur Vermessung der Längendifferenz von Radius und Ulna (Eigene Darstellung) .....	24
Abbildung 13: Intraklassen-Korrelationskoeffizient des Probekollektivs (Daten aus IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA)) .....	27
Abbildung 14: Vorkommende Frakturtypen und deren Häufigkeiten (Eigene Darstellung) .....	28
Abbildung 15: Verteilung der per Röntgen gemessenen Längendifferenzen zwischen Radius und Ulna (Eigene Darstellung) .....	29
Abbildung 16 : Verteilung der per Sonografie gemessenen Längendifferenzen zwischen Radius und Ulna (Eigene Darstellung) .....	30
Abbildung 17: Mittelwerte der Längendifferenz von Radius und Ulna im Röntgen und in der Sonografie im Vergleich zum Alter (Eigene Darstellung) .....	32

#### **7.4 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Verschiedene Studien und ihre Verwendung von Vorzeichen für die Längendifferenz von Radius und Ulna.....	17
Tabelle 2: Patienten, bei denen die sonografische Darstellung des distalen Handgelenkes nur eingeschränkt möglich war .....	31
Tabelle 3: Röntgenologisch vermessene Mittelwerte der Längendifferenz von Radius und Ulna in verschiedenen Studien .....	33

#### **7.5 Abkürzungsverzeichnis**

ANOVA	Analysis of Variance
AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
a.-p.	anterior-posterior
ca.	circa
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
ESIN	Elastisch stabile intramedulläre Nagelung

et al.	et alii / und andere
ICC	Intraklassen-Korrelationskoeffizient
ID	Identifikation
K-Draht	Kirschnerdraht
M	Mittelwert
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomographie
OP	Operation
Proc.	Processus
SD	Standardabweichung

## 8 Literaturverzeichnis

Abzug, Joshua M.; Little, Kevin; Kozin, Scott H. (2014): Physeal arrest of the distal radius. In: *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons* 22 (6), S. 381–389. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-22-06-381>.

Aitken, A. P. (1965): Fractures of the epiphyses. In: *Clinical Orthopaedics and Related Research* 41, S. 19–23.

Alzen, Gerhard; Benz-Bohm, Gabriele (2011): Radiation protection in pediatric radiology. In: *Deutsches Ärzteblatt international* 108 (24), S. 407–414. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2011.0407>.

AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF) (2018). In: *Journal of orthopaedic trauma*, 32 Suppl 1, S117–S140. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001065>

Brenner, D.; Elliston, C.; Hall, E.; Berdon, W. (2001): Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. In: *AJR. American journal of roentgenology* 176 (2), S. 289–296. <https://doi.org/10.2214/ajr.176.2.1760289>.

Brudvik, Christina; Hove, Leiv Magne (2003): Childhood fractures in Bergen, Norway. Identifying high-risk groups and activities. In: *Journal of pediatric orthopedics* 23 (5), S. 629–634. <https://doi.org/10.1097/00004694-200309000-00010>.

Cannata, Giuseppe; Maio, Fernando de; Mancini, Federico; Ippolito, Ernesto (2003): Physeal Fractures of the Distal Radius and Ulna. Long-term prognosis. In: *Journal of orthopaedic trauma* 17 (3), 172-179. <https://doi.org/10.1097/00005131-200303000-00002>.

Cicchetti, Domenic V. (1994): Guidelines, Criteria, and Rules of Thumb for Evaluating Normed and Standardized Assessment Instrument in Psychology. In: *Psychological Assessment* 6 (4), S. 284–290. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.6.4.284>.

Davis, Donald R.; Green, David P. (1976): Forearm Fractures in Children. Pitfalls and Complications. In: *Clinical Orthopaedics and Related Research* (120), 172 - 184. <https://doi.org/10.1097/00003086-197610000-00027>.

Eckert, K.; Ackermann, O.; Schweiger, B.; Radeloff, E.; Liedgens, P. (2012): Die Sonografie als sichere Alternative zur konventionellen Röntgendiagnostik bei distalen Unterarmfrakturen im Kindesalter. In: *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie* 150 (4), S. 409–414. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1314974>.

Ecklund, K.; Jaramillo, D. (2001): Imaging of growth disturbance in children. In: *Radiologic clinics of North America* 39 (4), S. 823–841. [https://doi.org/10.1016/s0033-8389\(05\)70313-4](https://doi.org/10.1016/s0033-8389(05)70313-4).

Epner, Ronald A.; Bowers, William H.; Guilford, W. Bonner (1982): Ulnar variance - The effect of wrist positioning and roentgen filming technique. In: *The Journal of hand surgery* 7 (3), S. 298–305. [https://doi.org/10.1016/S0363-5023\(82\)80183-4](https://doi.org/10.1016/S0363-5023(82)80183-4).

Exner, Gerhard Ulrich (2003): Normalwerte in Wachstum und Entwicklung. Die Basis für Diagnostik und Therapie. 2. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.

Gauger, Erich M.; Casnovsky, Lauren L.; Gauger, Erica J.; Bohn, Deborah C.; van Heest, Ann E. (2017): Acquired Upper Extremity Growth Arrest. In: *Orthopedics* 40 (1), e95-e103. <https://doi.org/10.3928/01477447-20160926-07>.

Goldfarb, Charles A.; Strauss, Nicole L.; Wall, Lindley B.; Calfee, Ryan P. (2011): Defining ulnar variance in the adolescent wrist. Measurement technique and interob-

server reliability. In: *The Journal of hand surgery* 36 (2), S. 272–277.

<https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2010.11.008>.

Goldstein, Rachel Y.; Otsuka, Norman Y.; Egol, Kenneth A. (2013): Re-displacement of extraphyseal distal radius fractures following initial reduction in skeletally immature patients--can it be prevented? In: *Bulletin of the Hospital for Joint Disease* (2013) 71 (2), S. 132–137.

Golz, R. J.; Grogan, D. P.; Greene, T. L.; Belsole, R. J.; Ogden, J. A. (1991): Distal ulnar physeal injury. In: *Journal of pediatric orthopedics* 11 (3), S. 318–326.

Hafner, Renate; Poznanski, Andrew K.; Donovan, J. Mark (1989): 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. In: *Skeletal Radiology* 18 (7), S. 513–516.

<https://doi.org/10.1007/BF00351750>.

Hall, Eric J. (2002): Lessons we have learned from our children. Cancer risks from diagnostic radiology. In: *Pediatric radiology* 32 (10), S. 700–706.

<https://doi.org/10.1007/s00247-002-0774-8>.

Hensinger, Robert N. (1986): Standards in Pediatric Orthopedics. Tables, charts and graphs illustrating growth. New York: Raven Press (7).

Heuck, A.; Bonel, H.; Stabler, A.; Schmitt, R.; Bonél, H.; Stäbler, A. (1997): Imaging in sports medicine. Hand and wrist. In: *European journal of radiology* 26 (1), S. 2–15.  
[https://doi.org/10.1016/s0720-048x\(97\)01174-1](https://doi.org/10.1016/s0720-048x(97)01174-1).

Hübner, Uwe; Schlicht, Wolfgang; Outzen, Sven; Barthel, Michael; Halsband, Heinrich (2000): Ultrasound in the diagnosis of fractures in children. In: *The Journal of Bone and Joint Surgery* 82 (8), S. 1170–1173. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.82B8.10087>.

Hulten, Olle (1928): Über Anatomische Variationen der Handgelenkknochen. In: *Acta Radiologica* 9 (2), S. 155–168. <https://doi.org/10.3109/00016922809176658>.

Izadifar, Zahra; Babyn, Paul; Chapman, Dean (2017): Mechanical and Biological Effects of Ultrasound. A Review of Present Knowledge. In: *Ultrasound in medicine & biology* 43 (6), S. 1085–1104. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2017.01.023>.

Jawetz, Shari T.; Shah, Parina H.; Potter, Hollis G. (2015): Imaging of physeal injury. Overuse. In: *Sports health* 7 (2), S. 142–153.

<https://doi.org/10.1177/1941738114559380>.

Koo, Terry K.; Li, Mae Y. (2016): A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. In: *Journal of chiropractic medicine* 15 (2), S. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>.

Kox, Laura S.; Jens, Sjoerd; Lauf, Kenny; Smithuis, Frank F.; van Rijn, Rick R.; Maas, Mario (2019): Well-founded practice or personal preference. A comparison of established techniques for measuring ulnar variance in healthy children and adolescents. In: *European radiology* 30 (1), S. 151–162. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06354-x>.

Kraus, Ralf; Schneidmüller, Dorien; Röder, Christoph (2005): Häufigkeit von Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter. In: *Deutsches Ärzteblatt* 102 (12), A 838- 842. [online]

<https://www.aerzteblatt.de/pdf/102/12/a838.pdf?ts=25%2E08%2E2009+17%3A46%3A25> [10.02.2022].

Laer, Lutz von; Linhart, Wolfgang; Kraus, Ralf (2007): Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. 5. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.

Marzi, Ingo (2010): Kindertraumatologie. Unter Mitarbeit von Dorien Schneidmüller. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

McGraw, Kenneth O.; Wong, S. P. (1996): Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. In: *Psychological Methods* 1 (1), S. 30–46.

<https://doi.org/10.1037/1082-989X.1.1.30>.

Mizuta, T.; Benson, W. M.; Foster, B. K.; Paterson, D. C.; Morris, L. L. (1987): Statistical analysis of the incidence of physeal injuries. In: *Journal of pediatric orthopaedics* 7 (5), S. 518–523. <https://doi.org/10.1097/01241398-198709000-00003>.

Ng, Lorraine; Saul, Turandot; Lewiss, Resa E. (2014): Sonographic baseline physeal plate width measurements in healthy, uninjured children. In: *Pediatric emergency care* 30 (12), S. 871–874. <https://doi.org/10.1097/PEC.0000000000000290>.

Palmer, Andrew K.; Glisson, Richard R.; Werner, Frederick W. (1982): Ulnar variance determination. In: *The Journal of hand surgery* 7 (4), S. 376–379.

[https://doi.org/10.1016/S0363-5023\(82\)80147-0](https://doi.org/10.1016/S0363-5023(82)80147-0).

Pechlaner, S.; Sailer, R.; Suckert, K.; Beck, E. (1988): Distale Radiusfrakturen-- Frakturformen und Verletzungsmuster. In: *Unfallchirurgie* 14 (2), S. 86–93.

<https://doi.org/10.1007/BF02906024>

Randsborg, Per-Henrik; Gulbrandsen, Pål; Saltytè Benth, Jūratè; Sivertsen, Einar Andreas; Hammer, Ola-Lars; Fuglesang, Hendrik F. S.; Arøen, Asbjørn (2013): Fractures in children. Epidemiology and activity-specific fracture rates. In: *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 95 (7), e42(1-7).

<https://doi.org/10.2106/JBJS.L.00369>.

Rennie, Louise; Court-Brown, Charles M.; Mok, Jacqueline Y. Q.; Beattie, Thomas F. (2007): The epidemiology of fractures in children. In: *Injury* 38 (8), S. 913–922.

<https://doi.org/10.1016/j.injury.2007.01.036>.

Rumsey, Deborah (2013): Statistik II für Dummies. Unter Mitarbeit von Judith Muhr und Heidrun König. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.

Rumsey, Deborah (2015): Statistik für Dummies. Unter Mitarbeit von Beate Majetschak, Reinhard Engel, Gabriele Gühring, Christoph Maas und Dominik Poß. 3. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.

Salter, Robert B.; Harris, W. Robert (1963): Injuries Involving the Epiphyseal Plate. In: *The Journal of Bone & Joint Surgery* 45 (3), S. 587–622.

<https://doi.org/10.2106/00004623-196345030-00019>.

Schmidt, S.; Schiborr, M.; Pfeiffer, H.; Schmeling, A.; Schulz, R. (2013): Age dependence of epiphyseal ossification of the distal radius in ultrasound diagnostics. In: *International journal of legal medicine* 127 (4), S. 831–838.

<https://doi.org/10.1007/s00414-013-0871-2>.

Schünke, Michael; Schulte, Erik; Schumacher, Udo (Hg.) (2007): Prometheus - LernAtlas der Anatomie. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. 2. Aufl. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.

Siebert, H. R.; Klönz, A. (2006): Distale Radiusfraktur. In: *Der Chirurg* 77 (6), 545-562. <https://doi.org/10.1007/s00104-006-1198-z>.

Steyers, C. M.; Blair, W. F. (1989): Measuring ulnar variance. A comparison of techniques. In: *The Journal of hand surgery* 14 (4), S. 607–612.

[https://doi.org/10.1016/0363-5023\(89\)90175-5](https://doi.org/10.1016/0363-5023(89)90175-5).

Weinberg, Eric R.; Tunik, Michael G.; Tsung, James W. (2010): Accuracy of clinician-performed point-of-care ultrasound for the diagnosis of fractures in children and young adults. In: *Injury* 41 (8), S. 862–868.

<https://doi.org/10.1016/j.injury.2010.04.020>.

Zoetsch, Silvia; Kraus, Tanja; Weinberg, Annelie M.; Heidari, Nima; Lindtner, Richard A.; Singer, Georg (2013): Fracture of the ulnar styloid process negatively influences the outcome of paediatric fractures of the distal radius. In: *Acta orthopaedica Belgica* 79 (1), S. 48–53. [online]

[http://www.academia.edu/20562674/Fracture\\_of\\_the\\_ulnar\\_styloid\\_process\\_negatively\\_influences\\_the\\_outcome\\_of\\_paediatric\\_fractures\\_of\\_the\\_distal\\_radius](http://www.academia.edu/20562674/Fracture_of_the_ulnar_styloid_process_negatively_influences_the_outcome_of_paediatric_fractures_of_the_distal_radius)  
[10.02.2022].

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich 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. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeit erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.