

Aus der

Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik

Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie an der
Universität Tübingen

**Validität verschiedener Scores zur Beurteilung und
Klassifikation von kindlichen suprakondylären
Humerusfrakturen**

**Inaugural-Dissertation zur Erlangung
des Doktorgrades der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität zu Tübingen**

**Vorgelegt von Hüttisch, Alina
2023**

Dekan/Dekanin: Professor Dr. B. Pichler
1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. B. Ulmar
2. Berichterstatter: Professor Dr. T. Kluba

Tag der Disputation: 29.08.2023

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Die suprakondyläre Humerusfraktur	3
1.1.1. Definition	3
1.1.2. Epidemiologie	3
1.1.3. Ätiologie	4
1.1.4. Anatomie	5
1.1.4.1. Der Humerus.....	5
1.1.4.2. Das Ellenbogengelenk	7
1.1.4.3. Knochenentwicklung	10
1.1.5. Besonderheiten der Wachstumsfraktur	13
1.1.6. Diagnostik	14
1.1.7. Therapie	17
1.1.8. Komplikationen	19
1.2. Frakturklassifikationssysteme	21
1.2.1. Allgemeine Einteilung von Frakturen	21
1.2.2. Anforderungen an Frakturklassifikationssysteme	22
1.2.3. Einteilung der suprakondylären Humerusfraktur bei Kindern	23
1.2.3.1. Lubinus	23
1.2.3.2. Felsenreich	24
1.2.3.3. Gartland	26
1.2.3.4. Lagrange and Rigault	28
1.2.3.5. Baumann.....	29
1.2.3.6. Erne, Fricker und Müller	30
1.2.3.7. Pirone	30
1.2.3.8. Pierre Chrestian	31
1.2.3.9. Gehling und Gotzen	31

1.2.3.10. Von Laer	32
1.2.3.11. AO – PCCF	33
1.2.3.12. LiLa	37
1.3. Zielsetzung der Arbeit	40
2. Patienten und Methoden	41
2.1. Studienpopulation	41
2.2. Datenerhebung	41
2.3. Statistische Methoden	43
3. Ergebnisse	46
3.1. Patientenkollektiv	46
3.2. Intrabeobachter-Reliabilität	46
3.3. Interbeobachter-Reliabilität	52
4. Diskussion	56
4.1. Beurteilung der Ergebnisse	57
4.2. Vergleich der eigenen Daten mit anderen Studien	61
4.2.1. Gartland	63
4.2.2. Lagrange und Rigault	66
4.2.3. AO-PCCF	67
4.2.4. LiLa	68
4.2.5. Andere frakturspezifische Klassifikationen	70
4.3. Bedeutung für die klinische Verwendung der Klassifikationssysteme und Ausblick	72
5. Zusammenfassung	76
6. Literaturverzeichnis	77
7. Danksagung	85
8. Erklärung zum Eigenanteil	86

Abkürzungsverzeichnis

AO	<i>Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen</i>
B1	<i>Beobachter 1</i>
B2	<i>Beobachterin 2</i>
B3	<i>Beobachterin 3</i>
EFM	<i>Erne, Fricker und Müller</i>
G&G	<i>Gehling und Gotzen</i>
Inter-B-R	<i>Interbeobachter-Reliabilität</i>
Intra-B-R	<i>Intrabeobachter-Reliabilität</i>
L&R	<i>Lagrange und Rigault</i>
OA	<i>Oberarzt</i>
PCCF	<i>Pediatric Comprehensive Classification Of Long Bone Fractures</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Humerus von ventral und dorsal	6
Abbildung 2: Die Epiphysenfugen am distalen Humerus von lateral und ventral	7
Abbildung 3: Das knöchernen Ellenbogengelenk von ventral und lateral	8
Abbildung 4: Verlauf von Arteria brachialis, Nervus medianus und Nervus ulnaris im Bereich des Ellenbogengelenkes	10
Abbildung 5: Die Knochenkerne des distalen Humerus	12
Abbildung 6: Der Capitulumneigungswinkel	15
Abbildung 7: Die Rogers-Hilfslinie	16
Abbildung 8: Der Baumann-Winkel	16
Abbildung 9: Felsenreich - Typ I	25
Abbildung 10: Felsenreich - Typ II	25
Abbildung 11: Felsenreich - Typ III	25
Abbildung 12: Gartland - Typ I	27
Abbildung 13: Gartland - Typ II	27
Abbildung 14: Gartland - Typ IIIA	27
Abbildung 15: Gartland - Typ IIIB	28
Abbildung 16: AO-PCCF - Grad I	36
Abbildung 17: AO-PCCF - Grad II	36
Abbildung 18: AO-PCCF - Grad III	37
Abbildung 19: AO-PCCF - Grad IV	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die AO-PCCF-Klassifikation	35
Tabelle 2: Die LiLa-Klassifikation	39
Tabelle 3: Einordnung der Kappa-Werte nach Landis und Koch.....	45
Tabelle 4: Berechnung Kappa-Koeffizient Intrabeobachter B1, Lubinus	47
Tabelle 5: Kappa-Werte Intrabeobachter-Reliabilität.....	48
Tabelle 6: Kappa-Werte der Interbeobachter-Reliabilität.....	53
Tabelle 7: Vergleich Studien Gartland	64
Tabelle 8: Vergleich Studien Lagrange und Rigault	66
Tabelle 9: Vergleich Studien AO – PCCF	68
Tabelle 10: Vergleich Studien LiLa-Klassifikation.....	69
Tabelle 11: Reliabilität Neer-Klassifikation	71
Tabelle 12: Reliabilität Lauge-Hansen-Klassifikation.....	72

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Intrabeobachter-Reliabilität B1	50
Diagramm 2: Intrabeobachter-Reliabilität B2.....	50
Diagramm 3: Intrabeobachter-Reliabilität B3.....	51
Diagramm 4: Intrabeobachter-Reliabilität Mittelwerte	51
Diagramm 5: Interbeobachter-Reliabilität Mittelwerte	54

1. Einleitung

Die suprakondyläre Humerusfraktur, ein Bruch des Oberarmes nahe des Ellenbogengelenks, ist eine häufige Fraktur bei Kindern im Wachstumsalter (Cheng et al., 1999, Houshian et al., 2001). Sie kann in unterschiedlichen Formen auftreten. Möglich sind stabile und instabile Brüche, Verschiebungen zwischen den Knochenfragmenten unterschiedlichen Ausmaßes bis hin zur Dislokation ohne Fragmentkontakt, sowie Verrotationen des Fragments (von Laer, 2013).

Je nach Frakturform unterscheidet sich die Therapie und auch das Behandlungsergebnis im Hinblick auf mögliche Komplikationen und Spätfolgen.

Um die individuelle Fraktur eines Patienten sinnvoll einzuteilen und entsprechende Maßnahmen einzuleiten, gibt es eine Vielzahl an Frakturklassifikationssystemen. Anhand eines Zahlen- und/oder Buchstabencodes wird eine Zuteilung in Kategorien vorgenommen, die die Fraktur näher beschreiben. Dadurch werden Frakturen vergleichbar und Therapieschemata können entwickelt und verfolgt werden (Martin and Marsh, 1997).

Für die kindliche suprakondyläre Humerusfraktur gibt es zwölf verschiedene Klassifikationssysteme. Das älteste davon, die Klassifikation nach Lubinus, wurde erstmals 1924 beschrieben (Lubinus, 1924). Seitdem wurden viele weitere entwickelt. Einige entsprechen sich zu großen Teilen in ihren Kategorien, andere unterscheiden sich deutlich, zum Beispiel in den betrachteten Aspekten und ihrer Genauigkeit. Nicht alle Systeme sind gleichermaßen etabliert, was auch zwischen einzelnen Ländern variieren kann (Weinberg et al., 2002).

Die Vielzahl an Klassifikationssystemen unterstreicht einerseits die Bedeutung dieser besonderen kindlichen Fraktur, andererseits erschwert sie auch die Vergleichbarkeit von Patientendaten und Therapieoptionen. Eine einheitliche Einteilung kann die Therapieentscheidung der Ärzt*innen vereinfachen, sowie

eine Weiterentwicklung der Behandlungsschemata und damit bessere Therapieresultate ermöglichen (Audigé et al., 2005).

Daher ist es sinnvoll, die verschiedenen Klassifikationssysteme zu untersuchen und ihren Nutzen für das klinische Setting zu evaluieren. Ein Aspekt hierbei ist die Reproduzierbarkeit in der Zuordnung in verschiedene Kategorien der jeweiligen Klassifikation durch eine*n Betrachter*in bzw. eine*n ärztliche*n Kolleg*in. Die Reproduzierbarkeit kann anhand der Reliabilität gemessen werden (Garbuz et al., 2002). In der vorliegenden Arbeit soll die Reliabilität für alle zwölf Systeme erhoben und verglichen werden. Dadurch die Validität der vorliegenden Systeme für die Klassifizierung von suprakondylären Humerusfrakturen im Wachstumsalter beurteilt werden.

1.1. Die suprakondyläre Humerusfraktur

1.1.1. Definition

Die suprakondyläre Humerusfraktur ist ein Quer- oder Schrägbruch des distalen Humerus im Bereich der Metaphyse (Schickedanz et al., 1981). Sie ist per Definition eine Ellenbogenfraktur. Die Fraktur liegt innerhalb der Gelenkkapsel (Weinberg et al., 2020). Allerdings wird weder die Wachstumsfuge noch das Gelenk an sich beeinträchtigt, da diese Anteile distal der Frakturstelle liegen (Weinberg et al., 2020, Matussek, 2013).

Der metaphysäre Bereich des distalen Humerus wird ventral gebildet von der Fossa supracondylaris und der Fossa supratrochlearis. Dorsal befindet sich die Fossa olecrani. Eingerahmt wird dieser Bereich von zwei Stützfeilern, die von proximal nach distal in die Epikondylen auslaufen. Zwischen dem medialen und lateralen Stützfeiler entsteht so ein sehr dünner Knochenabschnitt und damit eine anatomische Schwachstelle, die eine suprakondyläre Fraktur begünstigt (Chrestian, 1989, Omid et al., 2008).

1.1.2. Epidemiologie

Ellenbogenverletzungen sind im Kindesalter viel häufiger als im Erwachsenenalter (Buhr and Cooke, 1959). Dies liegt zum einen an der Anatomie und Vulnerabilität des wachsenden Knochens, zum anderen am Unfallmechanismus. Wenn Kinder fallen, schützen sie sich durch Ausstrecken der Arme. Frakturen der oberen Extremität machen 65-75% aller kindlichen Frakturen aus (Landin, 1983). Bei Frakturen der Ellenbogenregion ist in 86% der distale Humerus beteiligt, davon sind 80% Frakturen der suprakondylären Region (Kaiser et al., 2008). Weniger häufige Ellenbogenfrakturen sind die des lateralen

Kondylus, des medialen Epikondylus und transphysäre Humerusfrakturen (Shrader, 2008).

Am häufigsten treten Verletzungen des distalen Humerus im Alter von 5 bis 10 Jahren auf (Henrikson, 1966). Cheng et al. (Cheng et al., 1999) beschreiben die suprakondyläre Humerusfraktur als die häufigste kindliche Fraktur überhaupt in den Altersklassen 0-3 Jahre (26,7%) und 4-7 Jahre (31,6%). Zudem gehen sie davon aus, dass Mädchen in jüngeren Jahren (5 Jahre) häufiger betroffen sind als Jungen (6,6 Jahre).

Ob suprakondyläre Frakturen häufiger bei Mädchen oder Jungen auftreten, ist nicht abschließend geklärt (Cheng et al., 1999, Houshian et al., 2001). Es ist allerdings von einer geschlechtsunspezifischen Verteilung auszugehen (Weinberg et al., 2002, Aparicio Martinez et al., 2019).

Die linke Seite, als nicht-dominante Seite der meisten Kinder, ist häufiger betroffen als die rechte (Cheng et al., 2001, Farnsworth et al., 1998, Houshian et al., 2001).

1.1.3. Ätiologie

Vom Unfallmechanismus abhängig, kann das distale humerale Frakturfragment nach dorsal oder ventral dislozieren. Ursächlich werden (Hyper-) Extensionsfrakturen und Flexionsfrakturen unterschieden.

Eine suprakondyläre Flexionsfraktur entsteht bei Sturz auf den gebeugten Ellenbogen (Chrestian, 1989). Durch die Gewalteinwirkung von hinten, disloziert das distale Fragment nach ventral. Diese Art der Fraktur ist äußerst selten (Brauer et al., 2007, Hasler and von Laer, 2001).

Der Extensionstyp der suprakondylären Humerusfraktur ist mit einer Häufigkeit von 97-99% klinisch deutlich bedeutender (Mahan et al., 2007). Durch Fall auf den ausgestreckten Arm bei vollständig durchgestrecktem (hyperextendiertem)

Ellenbogen fungiert das Olecranon als Drehpunkt. Es wird in die Fossa olecrani gedrückt und die dünne anteriore Region des Humerus gibt nach. Dadurch kann das distale Fragment der Fraktur nach hinten verschoben werden. Dabei ist die Dislokation nach posteromedial häufiger als die nach posterolateral (Otsuka and Kasser, 1997). Je nach Schweregrad der Fraktur können durch die Bewegung der Fragmente Weichteilschäden entstehen (Skaggs and Flynn, 2010).

Die Unfallursache, beschrieben von Weinberg et al. (Weinberg et al., 2002), ist in 71% ein Freizeitunfall, seltener sind Unfälle in Kindergarten und Schule oder Sportunfälle. 6% der Frakturen sind durch Verkehrsunfälle verursacht. Aparicio Martinez et al. (Aparicio Martinez et al., 2019) kommen zu ähnlichen Ergebnissen.

1.1.4. Anatomie

1.1.4.1. Der Humerus

Der Oberarmknochen (Humerus) bildet sich aus dem Corpus und einer proximalen und distalen Extremität (Platzer, 2009, Wurzinger, 2020). Das proximal gelegene Caput humeri bildet mit der Skapula und der Klavikula das Schultergelenk. Die Flächen des Corpus humeri lassen sich in drei Seiten einteilen. An der Facies posterior ist der Nervus radialis in den Sulcus nervi radialis eingebettet. Die Facies anteromedialis und Facies anterolateralis sind durch die Margo medialis bzw. lateralis nach hinten begrenzt. Diese Ränder laufen nach distal zugespitzt aus und bilden im metaphysären Bereich des Humerus die Crista supracondylaris medialis und lateralis. Die beiden Cristae enden distal als prominente Strukturen, die Epikondylen. Der Epicondylus medialis ist dabei dominant ausgeprägt. Er bildet die mediale Begrenzung der Rinne für den Nervus ulnaris.

Der distale Humerus, in Abbildung 1 von ventral und dorsal abgebildet, bildet die proximalen Gelenkflächen (dunkelgrau markiert) für die Artikulation mit Radius und Ulna im Ellenbogengelenk. Diese Region bezeichnet man als Condylus humeri, bestehend aus Capitulum humeri lateralis und Trochlea humeri medialis. Die Trochlea zieht bis weit nach dorsal. Dort wird sie nach proximal von der Fossa olecrani begrenzt. Ventral entsteht proximal der Trochlea die Fossa coronoidea. Der gesamte Condylus humeri ist leicht nach ventral geneigt. So bildet die quere Gelenkachse einen Winkel von 76-89° zum Humerusschaft.

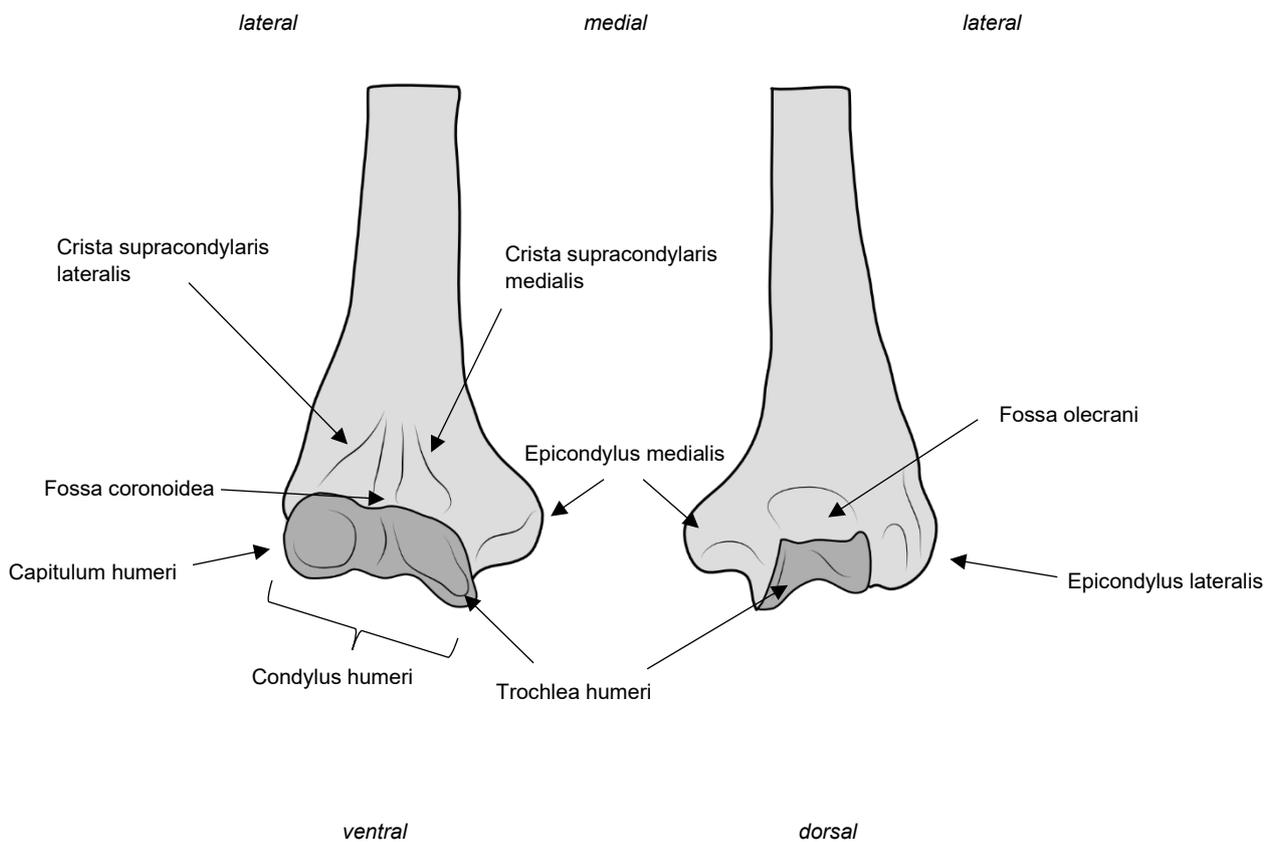


Abbildung 1: Der Humerus von ventral und dorsal

Im Bereich der Metaphyse entsteht, eingerahmt durch die Cristae supracondylares medialis und lateralis, eine Schwachstelle. Der Knochen ist proximal der verschiedenen Gruben (Fossae) ausgesprochen dünn und darum

vulnerabel (Omid et al., 2008). Beim Kind ist die Kompakta in diesem Bereich nur 1 bis 2 mm dick.

Die Epiphysenlinien verlaufen wie in Abbildung 2 zu sehen proximal der Gelenkflächen, eine zusätzliche Linie verläuft am medialen Epicondylus.

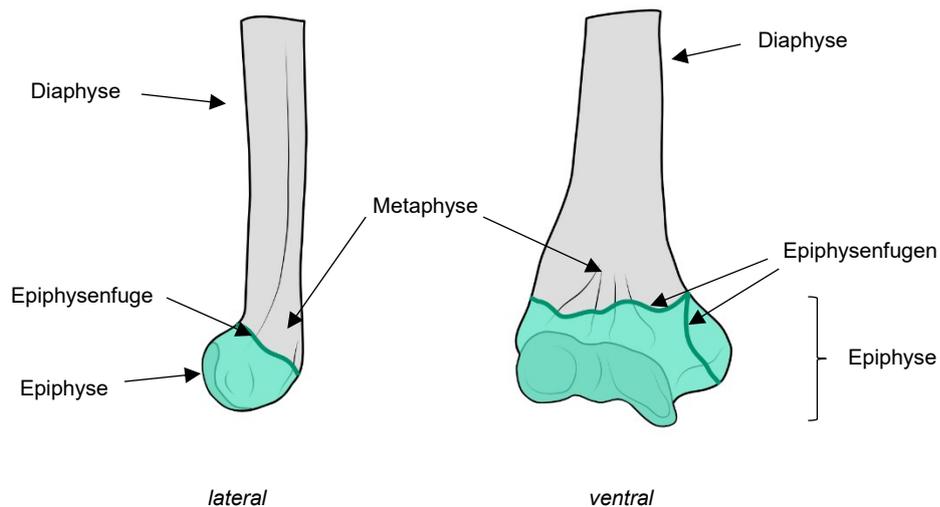


Abbildung 2: Die Epiphysenfugen am distalen Humerus von lateral und ventral

1.1.4.2. Das Ellenbogengelenk

Drei Skelettelemente bilden das Ellenbogengelenk (Articulatio cubiti) (Wurzinger, 2020), siehe Abbildung 3. Proximal die Gelenkflächen des Humerus, distal die Gelenkflächen von Ulna und Radius. Der Condylus humeri bildet mit seiner Trochlea die Articulatio humeroulnaris. Dabei wird die Trochlea humeri vom proximalen Ende der Ulna mit der Incisura ulnaris und den Fortsätzen Processus coronoideus ventral und dem Olecranon dorsal zangenartig umfasst. Das Capitulum humeri passt sich in die Fovea articularis des Radiuskopfes ein für die Articulatio humeroradialis. Zusätzlich verbinden sich Caput radii und Incisura ulnaris in der Articulatio radioulnaris proximalis. Das zusammengesetzte Gelenk ist so einerseits ein Scharniergelenk, mit welchem Flexion und Extension möglich

ist. Durch die beiden Gelenke zwischen Radius und Ulna proximal und distal entsteht ein Radgelenk für die Pronation und Supination.

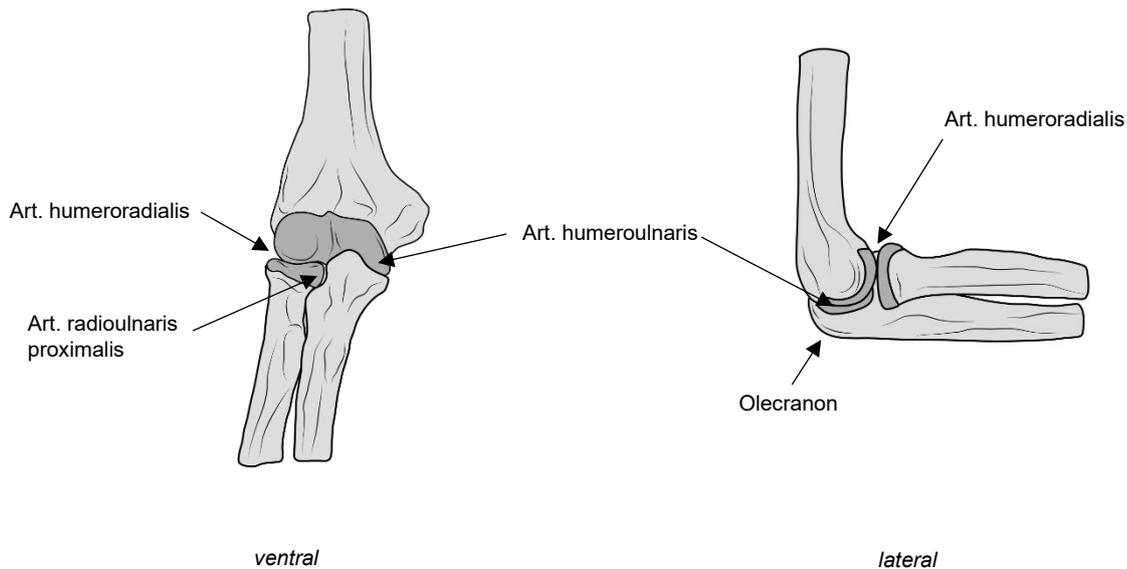


Abbildung 3: Das knöcherne Ellenbogengelenk von ventral und lateral

Der Bewegungsumfang wird durch die knöcherne Sicherung, die Weichteile und den kapsulären Bandapparat bestimmt (Wurzinger, 2020). Die Gelenkkapsel selbst ist dünn und schlaff (Platzer, 2009). Sie umfasst proximal alle Fossae und lässt die Epikondylen frei. Sie umschließt alle Gelenkflächen, am Radius zieht sie noch ein Stück über das Collum und bildet dort einen weiten Recessus sacciformis für die Drehbewegung im Gelenk. Es gibt zwei Seitenbänder und ein ringförmiges Band um den Radiuskopf, die in die Gelenkkapsel eingelassen sind. Die beiden Kollateralbänder (Ligamenta collaterale radiale und ulnare) ziehen von den Epikondylen bis zum Processus coronoideus und dem Olecranon medial und bis zum Ligamentum anulare radii lateral. Dieses Ligament entspringt an der Ulna und umschließt das Caput radii. Da die innere Fläche direkt mit dem Radius artikuliert, ist hier oft Knorpelgewebe vorhanden.

Der Bewegungsumfang nach der Neutral-Null-Methode beträgt für die Flexion und Extension 150/0/0-15°. Die Hyperextension ist bei Frauen und Kindern physiologisch möglich. Der Bewegungsgrad von Pronation und Supination ist 90/0/90° (Wurzinger, 2020).

Für die Bewegung im Ellenbogengelenk sind hauptsächlich die Muskeln des Oberarmes zuständig. Einen kleinen Anteil am Gesamtdrehmoment leisten auch die mehrgelenkigen Muskeln des Unterarmes, deren Hauptaufgabe aber die Bewegung im Handgelenk ist (Wurzinger, 2020). Die Oberarmmuskeln liegen in der Flexorenloge und der Extensorenloge. Für die Beugung sind der *Musculus biceps brachii* und der *Musculus brachialis* in erster Linie wichtig. Einige Unterarmmuskeln, wie der *Musculus brachioradialis*, der *Musculus extensor carpi radialis longus* und der *M. pronator teres* sind ebenfalls beteiligt. Die Extension übernehmen der *Musculus triceps brachii* und der *Musculus anconeus*, der gleichzeitig die Funktion als dorsaler Kapselspanner übernimmt.

Im Hinblick auf die suprakondyläre Humerusfraktur ist die Lage der *Arteria brachialis* und der Verlauf der drei großen Nerven, die zum Unterarm ziehen, bedeutend. Die *Arteria brachialis* zieht im *Sulcus bicipitalis medialis* zur Mitte der Ellenbeuge (Wurzinger, 2020). Hier verzweigt sie sich dann in *Arteria radialis* und *ulnaris*. Proximal und distal des Ellenbogengelenks gibt die *Arteria brachialis* mehrere Äste ab und bildet so mit der *Arteria profunda brachii* das *Rete articulare cubiti* zur Versorgung der Ellenbogenstrukturen.

Der *Nervus ulnaris* zieht mit der *Arteria brachialis* und dem *Nervus medianus* im *Sulcus bicipitalis medialis* bis zur Mitte des Oberarmes. Dann zieht der Ulnarnerv nach medial im *Sulcus nervi ulnaris* hinter dem *Epicondylus medialis* entlang. Der *Nervus medianus* folgt dem Verlauf der *Arteria brachialis* weiter. Die Strukturen sind in Abbildung 4 dargestellt. Auf der dorsalen Seite des Humerusschaftes verläuft der *Nervus radialis* in seinem *Sulcus*. Er umschlingt den Schaft, indem er zunächst nach lateral und schließlich ventral des *Epicondylus lateralis* in den Radialistunnel, gebildet durch den *Musculus brachialis* und *brachioradialis*, zieht.

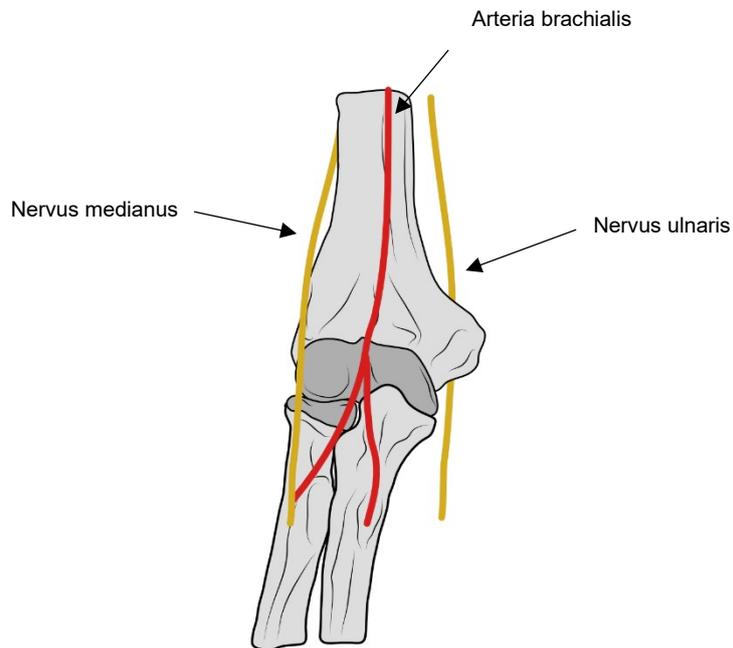


Abbildung 4: Verlauf von Arteria brachialis, Nervus medianus und Nervus ulnaris im Bereich des Ellenbogengelenkes

1.1.4.3. Knochenentwicklung

Röhrenknochen wie der Humerus entstehen durch chondrale Osteogenese, also aus einem Knorpelgewebe, welches sekundär verknöchert (Spaniel-Borowski and Mayerhofer, 2020). Zu unterscheiden ist hierbei die Entwicklung der Diaphyse und die der Epiphyse.

An der Diaphyse erfolgt die Ossifikation zweiphasig (Spaniel-Borowski and Mayerhofer, 2020). Zum einen verläuft sie perichondral, das heißt es bildet sich eine Knochenmanschette aus Mesenchymzellen. Im Knorpelinneren degeneriert der Knorpel. Es kommt zur Hypoxie und Gefäße wandern ein. Die zweite Phase

nennt sich enchondrale Ossifikation. Durch die Vaskularisation wandern Vorläuferzellen in den Knorpel ein. Es beginnen Auf- und Abbauvorgänge mit dem Ergebnis des Wachstums nach proximal und distal.

Da die Epiphysenanlage bereits vaskularisiert ist, beginnt hier direkt die enchondrale Ossifikation. Die Richtung des Wachstums ist von zentral nach peripher, da sie von bereits angelegten sekundären Knochenkernen ausgeht. Bevor der gesamte Knorpel ossifiziert ist, stoppt die Ossifikation. Dadurch bleibt zwischen Epiphyse und Diaphyse eine unreife Zone, die Wachstumsfuge, bestehen (Chrestian, 1989).

Am distalen Humerus gibt es vier dieser Knochenkerne. Diese sind in Abbildung 5 dargestellt. Zwei dieser Kerne liegen extraartikulär und bilden später die Epikondylen. Zudem gibt es einen Knochenkern für das Capitulum humeri und die Trochlea humeri. Die Verknöcherung der Kerne erfolgt in einer bestimmten Reihenfolge (Taeger and Nast-Kolb, 2001). Die Verschmelzung mit dem Humerusschaft erfolgt ungefähr im 15. Lebensjahr. Der genaue Zeitpunkt ist für die Ossifikation und die Verschmelzung individuell sehr unterschiedlich. Generell verknöchern die Kerne bei Mädchen früher als bei Jungen (Platzer, 2009). Das Capitulum humeri verknöchert schon im 1. oder 2. Lebensjahr und wird damit als erstes in der Bildgebung sichtbar. Darauf folgt der Epicondylus medialis im 3. bis 8. Jahr. Die Trochlea kann multinukleär ossifizieren, für gewöhnlich im 7. bis 12. Lebensjahr. Als letzter Knochenkern erscheint der Epicondylus lateralis. In der Bildgebung des Ellenbogengelenks erscheinen außerdem die Knochenkerne von Radiuskopf und Olecranon.

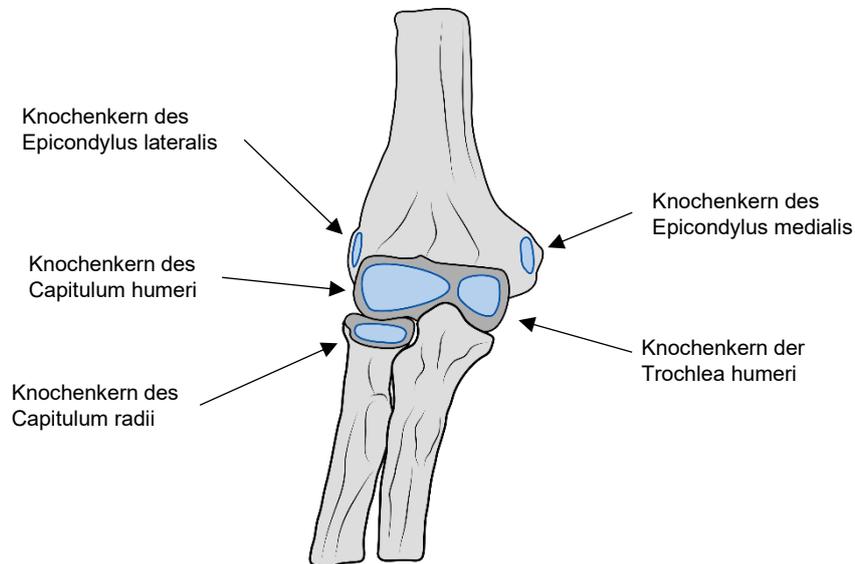


Abbildung 5: Die Knochenkerne des distalen Humerus

Das Längenwachstum eines Röhrenknochens ist solange möglich, wie die Wachstumsfuge zwischen Diaphyse und Epiphyse offen ist. Der Längenzuwachs erfolgt in jenem Bereich, der an die Epiphyse grenzt (Marzi, 2016). Hier proliferieren die Knorpelzellen und ordnen sich in Richtung der Metaphyse säulenförmig an. Im metaphysären Teil mineralisiert der Knorpel und wird zu Knochen. Die distalen Humerusfugen machen 20% des Längenwachstums des Humerus aus. 80% des Längenwachstums geschehen an der proximalen Fuge.

Das Dickenwachstum des Knochens wird durch periostalen Knochenanbau gewährleistet. Während das Periost aufgebaut wird, erfolgt gleichzeitig Abbau von Knochenmasse durch das Endost, um die Struktur des Knochens zu erhalten. Dieses System ist auch bei der Frakturheilung von Bedeutung (Marzi, 2016).

1.1.5. Besonderheiten der Wachstumsfraktur

Frakturen im Kindesalter unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von Frakturen im Erwachsenenalter. Eine direkte Übernahme der Behandlungsstrategien ist daher nicht angezeigt (Slongo et al., 2006). Die wichtigsten Besonderheiten von Wachstumsfrakturen sollen im Folgenden dargestellt werden.

Der Knochen eines Kindes im Alter von ungefähr 5 Jahren ist noch sehr elastisch, da der mesenchymale Geflechtknochen erst mit zunehmendem Alter mineralisiert und steifer wird. Der weiche Knochen bricht schon bei geringer Gewalteinwirkung (Matussek, 2013). Somit unterscheiden sich Kinder- und Erwachsenenfrakturen oft in Art des Traumas und damit auch in der Schwere der begleitenden Verletzungen. Beispielsweise Weichteilschäden sind beim Kind in der Regel weniger ausgeprägt. Zudem gibt es verschiedene Frakturtypen, die beim Kind aufgrund der Stabilität des Periosts auftreten. Zu nennen sind hier die Grünholzfraktur, die Wulstfraktur und auch die plastische Deformation.

Das Periost ist bei wachsenden Kindern dicker und stabiler, da die osteogene Potenz des Knochens so viel größer ist (Matussek, 2013). Dies führt nicht nur zu einer besseren posttraumatischen Stabilität und damit leichterem Reposition, sondern auch die Heilung der Fraktur geht schneller voran. Eine Spontanheilung eines Bruches ist bei Kindern gut möglich, durch vermehrtes Längenwachstum kann der Knochen auch Deformitäten remodellieren. Damit muss nicht jede Fraktur zwangsläufig reponiert werden.

Die Diagnostik kindlicher Frakturen ist besonders an den Gelenken anspruchsvoll. Die Knochenkerne, die in individuell verschiedenen Zeitabschnitten verknöchern und verschmelzen, müssen radiologisch beurteilt werden (Asmussen, 2014). Da die gelenkbildenden Knochenenden zunächst aus unsichtbarem Knorpelgewebe bestehen, können sie aber auch zur Orientierung der Gelenkstrukturen dienen (De Boeck, 1996). Herausforderung bleibt trotzdem, die vom Knochen getrennten Kerne nicht mit Frakturen oder Epiphysenabrissen zu verwechseln.

1.1.6. Diagnostik

Eine Anamnese, um ein adäquates Trauma nachzuweisen, und eine ausführliche klinische Untersuchung sind vor der Röntgendiagnostik angezeigt (Marzi, 2016, von Laer, 2013). Bei der klinischen Untersuchung sollen zunächst durch visuelle Inspektion Schwellungen und Deformierungen festgestellt werden. Der Schweregrad ist in der Regel abhängig von der Dislokation der Fraktur. Die Durchblutung, Motorik und Sensibilität muss getestet werden, um Begleitschäden auszuschließen. Frakturzeichen und Bewegungsausmaß müssen nicht manuell untersucht werden, hierfür reicht die Röntgendiagnostik aus (Marzi, 2016, von Laer, 2013, Schofer et al., 2003).

Die Diagnose der suprakondylären Humerusfraktur erfolgt schließlich durch Röntgenaufnahmen in 2 Ebenen (anterior-posteriorer und lateraler Strahlengang). Zudem kann im Wachstumsalter zur besseren Beurteilung die Gegenseite zum Vergleich geröntgt werden (von Laer, 1999, von Laer, 2013). Es soll auf Frakturzeichen, wie zum Beispiel das „fat pad sign“ als Darstellung eines intrakapsulären Ergusses, geachtet werden. Ältere Frakturen, zum Beispiel im Rahmen einer sekundären Diagnostik, können durch einen periostalen Abstützkallus diagnostiziert werden (Weinberg et al., 2020, Schofer et al., 2003).

Für die Diagnose von Fehlstellungen können verschiedene Hilfslinien verwendet werden. Der Capitulumneigungswinkel (siehe Abbildung 6) ist der Winkel zwischen Humeruslänge und Achse der Epiphysenfuge, sichtbar in der lateralen Aufnahme. Ist er größer oder kleiner als 30 bis 40°, deutet dies auf eine Antekurvations- oder Rekurvationsfehlstellung hin. Auch die Rogers-Hilfslinie (siehe Abbildung 7) beurteilt diese Art der Fehlstellung. Die Hilfslinie wird, ebenfalls in der lateralen Aufnahme, entlang der anterioren Humeruskortikalis eingezeichnet. In Normalstellung schneidet sie in Verlängerung das Capitulum humeri zwischen dem mittleren und hinteren Drittel. Liegt die Linie davor, liegt eine Antekurvations- bzw. Extensionsfraktur vor. Schneidet die Hilfslinie das hintere Drittel, liegt eine Rekurvation bzw. eine Flexionsfraktur vor (Rogers et al., 1978, Weinberg et al., 2020, Schofer et al., 2003, Marzi, 2016, von Laer, 2013).

Um Varus- und Valgusfehlstellungen zu messen, wird der Baumann-Winkel benutzt (siehe Abbildung 8). Der Winkel wird gebildet durch die Epiphysenachse der lateralen Kondyle und einer senkrechten Linie zur Längsachse des Humerusschaftes. Er beträgt 9 bis 26°, wenn keine Fehlstellung vorliegt. Ist der Winkel kleiner, liegt eine Varusfehlstellung vor (Omid et al., 2008, Otsuka and Kasser, 1997, Weinberg et al., 2020). Rotationsfehler sind in der seitlichen Aufnahme im radiulnaren Strahlengang besser zu beurteilen, da sie sich im ulnoradialen Bild Rotationsfehler bis 20° nicht zeigen (von Laer, 2013, Weinberg et al., 2020).

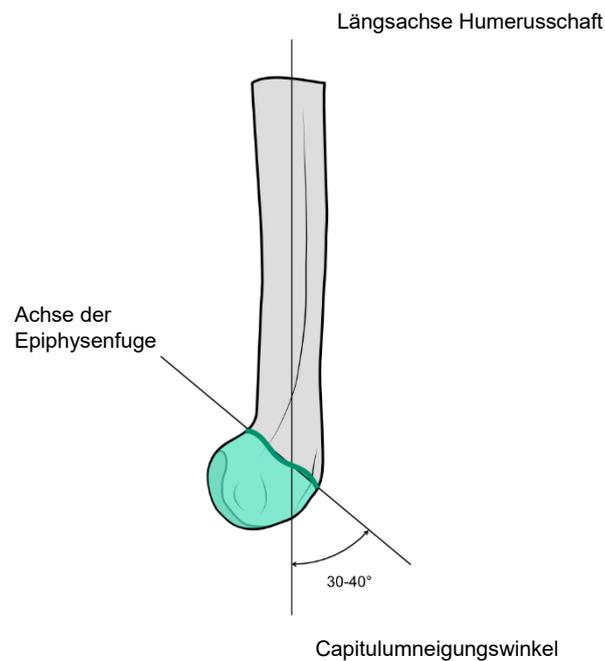


Abbildung 6: Der Capitulumneigungswinkel

Rogers-Hilfslinie entlang
der anterioren Kortikalis

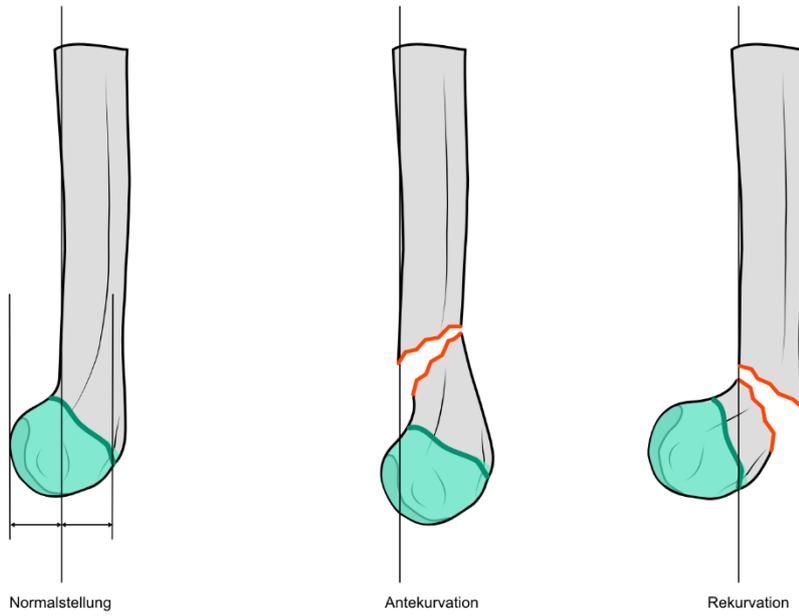


Abbildung 7: Die Rogers-Hilfslinie

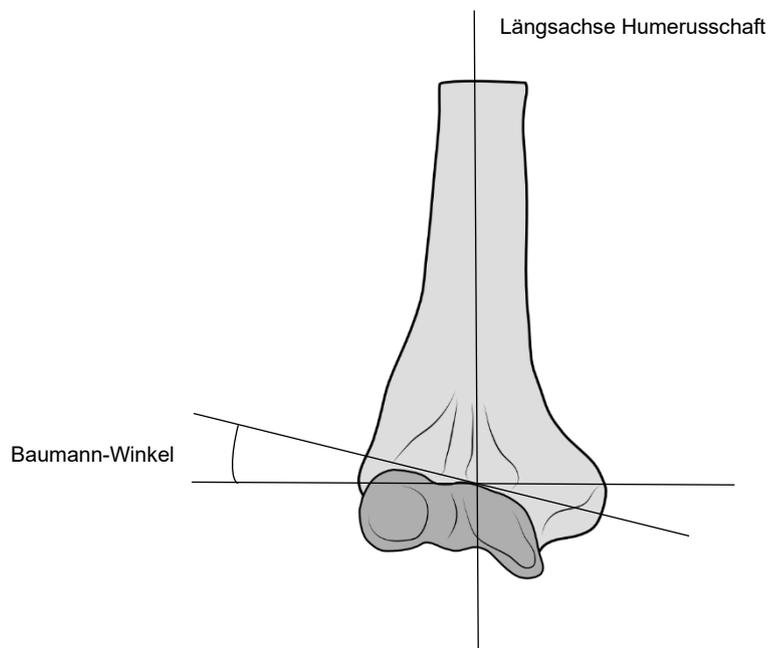


Abbildung 8: Der Baumann-Winkel

1.1.7. Therapie

Die Ziele der Therapie von suprakondylären Humerusfrakturen bei Kindern sind klar definiert. Zum einen muss eine eingeschränkte Funktion, zum Beispiel durch Nervenläsionen, verhindert werden. Außerdem gilt es, Achsenfehlstellungen zu vermeiden. Diese behindern nicht nur die Bewegung des Ellenbogengelenks, sondern können auch kosmetische Nachteile verursachen. Eine primär definitive, minimalinvasive Therapie und kurze stationäre Aufenthalte sollen angestrebt werden (Weinberg et al., 2020, Fernandez and Eberhardt, 2012)

Die Therapiestrategie ist weit weniger klar definiert. Nicht zuletzt durch die unterschiedliche Definition und Klassifizierung der Fraktur, gibt es international kein einheitliches Vorgehen in der Behandlung. Dies betrifft insbesondere die nicht komplett dislozierte suprakondyläre Humerusfraktur (Weinberg et al., 2002). Eine Übersicht über das im deutschsprachigen Raum gängige Vorgehen soll im Folgenden dargestellt werden.

In der aktuellen Literatur ist man sich einig, stabile und nicht dislozierte Frakturen in erster Linie konservativ zu behandeln. Der Arm wird mit einer Oberarmgipsschiene für drei Wochen ruhiggestellt (Weinberg et al., 2020, Fernandez and Eberhardt, 2012, Vaquero-Picado et al., 2018, von Laer, 2013, Schofer et al., 2003, Skaggs and Flynn, 2010). Eine stabile Fraktur mit leichter Dislokation in Antekurvationsfehlstellung kann ebenfalls konservativ mit einer Blount-Schlinge behandelt werden. Dabei wird der betroffene Arm in einer Spitzwinkelstellung fixiert (Blount, 1957). Im Wachstumsalter bis etwa zum 6. Lebensjahr ist eine Spontankorrektur von leichten Fehlstellungen in Antekurvationsstellung möglich. Jenseits dieses Alters sollte die Fraktur allerdings reponiert werden. Eine Röntgenaufnahme zur Verlaufskontrolle ist bei leichten Dislokationen indiziert. Bei einem sekundären Rotationfehler muss eine operative Versorgung erfolgen. Eine leichte Rekurvationsfehlstellung sollte direkt operativ behandelt werden (Weinberg et al., 2020, von Laer, 2013).

Die operative Therapie für instabile und dislozierte Frakturen beinhaltet zunächst eine geschlossene oder offene Reposition mit Röntgenkontrolle. Für die anschließende Retention gibt es verschiedene Verfahren.

Die Reposition erfolgt unter Narkose zumeist in Rückenlage. Eine geschlossene Reposition ist in den meisten Fällen erfolgreich. Zunächst erfolgt ein kontinuierlicher Zug am Arm, dann kann durch Druck des Daumens auf das distale Fragment die Dislokation korrigiert werden. Anschließend wird der Unterarm proniert und in eine Spitzwinkelstellung gebracht. Beispielsweise bei ausgedehnter Kapsel-Band-Läsion kann eine offene Reposition notwendig werden (Weinberg et al., 2020, von Laer, 2013, Schofer et al., 2003, Vaquero-Picado et al., 2018).

Die Osteosynthese mit Kirschner-Drähten ist eine etablierte Methode zur Retention der Fragmentstücke. Die Kirschner-Drähte werden radial und ulnar von proximal im Epicondylus angebracht und kreuzen sich proximal der Fraktur. Die Anzahl der einzubringenden Drähte variiert. Bei Frakturen, die in der Mitte der Metaphyse lokalisiert sind, bietet sich eine gekreuzte Kirschner-Draht-Osteosynthese mit 2 lateralen und einem medialen Pin an (Kamara et al., 2019). Die Wachstumsfuge und die in unmittelbarer Umgebung verlaufenden Nerven müssen immer geschont werden (von Laer, 2013, Schofer et al., 2003).

Elastisch stabile intramedulläre Nagelung (ESIN) ist eine neuere Methode. Über das proximale Drittel des Humerusschaftes werden dabei Nägel in den Markraum des Knochens eingebracht. Nach der Reposition werden diese in das distale Fragment bis in die Epikondylen vorgeschoben und verankert (Schäffer et al., 2007). Diese Methode bietet sich vor allem bei Frakturen im Bereich der proximalen Metaphyse an (Kamara et al., 2019).

In Deutschland sind Kirschner-Drähte meist Mittel der Wahl. Der radiale Fixateur externe ist eine selten angewandte Therapieoption (von Laer, 1997). Eine Perspektive für die Zukunft sind zudem resorbierbare Polypins aus Polyactid als Osteosynthesematerial (Li et al., 2017).

Die chirurgische Nachbehandlung beinhaltet die Gabe von kindergerechten Schmerzmitteln für drei Tage, die Materialentfernung kann, bei Verwendung von nicht resorbierbarem Osteosynthesematerial, nach 3 bis 4 Wochen erfolgen (Weinberg et al., 2020).

1.1.8. Komplikationen

Akute Komplikationen einer suprakondylären Humerusfraktur kommen vor allem bei instabilen Frakturen vor. Zu achten ist besonders auf Nervenläsionen. Der Verlauf der gefährdeten Nerven ist in Abbildung 4 (S. 10) dargestellt. Als Frühkomplikation können Nervus medianus und radialis durch Fragmente beschädigt sein. Welcher Nerv betroffen ist, hängt von der genauen Dislokationsrichtung ab (Skaggs and Flynn, 2010). Der Nervus ulnaris wird eher sekundär durch eine Reposition oder eingebrachte Drähte verletzt. Es muss auf Sensibilitätsausfälle und Beeinträchtigung der Motorik im entsprechenden Nervengebiet geachtet werden. Oft können Nervenschädigungen ausheilen, eine operative Revision kann aber auch nötig sein (von Laer, 2013, Vaquero-Picado et al., 2018).

Gefäßläsionen sind selten, können aber auftreten. Besonders gefährdet ist die Arteria brachialis. Ihr Verlauf ist auch in Abbildung 4 dargestellt. Der Gefäßstatus durch das Tasten der Pulse muss entsprechend immer geprüft werden. In den meisten Fällen lässt sich ein nicht vorhandener Radialispuls schon durch die geschlossene Reposition wiederherstellen. Im Notfall muss eine operative Revaskularisation erfolgen (Gosens and Bongers, 2003). Eine noch seltenere (0,1-0,3%) aber drastischere Komplikation ist die Volkmannsche Kontraktur bzw. das Kompartmentsyndrom (Omid et al., 2008). Diese ist vermeidbar, da sie zum Beispiel durch einen zu eng angelegten Gips hervorgerufen wird. Es muss bei zunehmenden Schmerzen, eingeschränkter Bewegung und Kälte der Finger an diese Komplikation gedacht und schnell eine Therapie eingeleitet werden (von Laer, 2013).

Postoperative Infektionen kommen in ca. 1% der Fälle vor und sind meist oberflächlich. Eine antibiotische Behandlung und Materialentfernung reichen als Therapie meist aus (Battle et al., 2007, Vaquero-Picado et al., 2018).

Als Spätfolge einer suprakondylären Fraktur bei Kindern können Bewegungseinschränkungen, Achsenfehlstellungen und Wachstumsstörungen auftreten. Letztere sind sehr selten, da die Wachstumsfuge in der Regel unverletzt bleibt. Kommt es zum Beispiel durch mehrere Bohrversuche doch zu einer Verletzung der Epiphyse, kann ein vorzeitiger Verschluss der Fuge erfolgen. Zudem kann eine radiale Stimulation der Humerusfuge eine Folge der Fraktur sein. Diese zieht normalerweise aber keine Achsenfehlstellung nach sich (von Laer, 2013). Achsenfehlstellungen, insbesondere der Cubitus varus bei dieser Art von Fraktur, sind Folge von nicht ausgeglichenen Rotationsfehlern. Eine anatomisch genaue Reposition kann dies verhindern (von Laer, 2013, Vaquero-Picado et al., 2018).

1.2. Frakturklassifikationssysteme

1.2.1. Allgemeine Einteilung von Frakturen

Ein Knochenbruch ist eine Kontinuitätsunterbrechung eines Knochens. Um eine Fraktur näher zu beschreiben und einzuteilen, können einige grundlegende Kriterien verwendet werden (Baierlein and Wistop, 2011).

Zunächst können die Ursache und Unfallmechanismus betrachtet werden. Es gibt nicht traumatisch bedingte Frakturen, beispielsweise pathologische Frakturen aufgrund einer Vorschädigung des Knochens. Ein gesunder Knochen kann durch die Einwirkung von Gewalt, also traumatisch, brechen. Die Frakturform ist meist abhängig von der Art des Traumas. Eine direkte Gewalteinwirkung, zum Beispiel durch einen Schlag, führt zu Querfrakturen, Mehrfragmentfrakturen oder Trümmerfrakturen. Spiralfrakturen eines Knochens und Abrissfrakturen sind hingegen typisch für indirekte Gewalteinwirkung wie beispielsweise ein Verdrehungstrauma. Zusätzlich gibt es spezielle Morphologien, die im Kindes- und Jugendalter auftreten können. Dazu zählen die Wulstfraktur (Vorwölbung auf einer Seite) der Metaphyse, die Grünholzfraktur (einseitige Kontinuitätsunterbrechung) und die Bowing-Fraktur (Verbiegung). An der Epiphyse, der Wachstumsfuge, kommt es zu alterstypischen Übergangsftrakturen (Slongo and Baierlein, 2011).

Die Fragmente einer Fraktur können sich zusätzlich gegeneinander verschieben. Diese Dislokation kann in unterschiedliche Richtungen (seitlich, längs), mit Verkürzung oder Verlängerung, sowie Achsenknick oder Rotation erfolgen.

Ein besonders wichtiger Aspekt bei der Beschreibung von Frakturen ist die genaue Lokalisation. Bei Röhrenknochen unterscheidet man die Gelenkfrakturen im Bereich der Epiphyse, gelenknahe Frakturen im Bereich der Metaphyse und Schaftfrakturen (Diaphyse).

Zusätzlich gilt es, die Art des Traumas (Mono- oder Polytrauma) und die Weichteilverletzung bei geschlossenen und offenen Frakturen zu differenzieren (Baierlein and Wistop, 2011).

1.2.2. Anforderungen an Frakturklassifikationssysteme

Frakturklassifikationssysteme teilen spezifische Frakturen systematisch ein. Dies hat zum Ziel, daraus Therapie und Prognose abzuleiten. Die Systeme dienen damit auch der Kommunikation zwischen Ärzten. Ergebnisse können berichtet und verglichen werden. Damit wird nicht nur die Qualitätskontrolle der Behandlung, sondern auch deren Weiterentwicklung möglich (Martin and Marsh, 1997, Garbuz et al., 2002, Burstein, 1993).

Für verschiedene sehr spezifische Frakturen gibt es auch spezifische Klassifikationssysteme. Beispielsweise werden Knöchelfrakturen häufig mit der Klassifikation nach Lauge-Hansen (Lauge-Hansen, 1950) eingeteilt. Proximale Humerusfrakturen können anhand des 1970 entwickelten Scores von Neer (Neer, 1970) klassifiziert werden. Für die suprakondyläre Wachstumsfraktur gibt es ca. 10 verschiedene spezifische Klassifikationen. Felsenreich, Baumann, Gartland sind nur einige der weit verbreiteten Klassifikationen (Weinberg et al., 2002). Diese und andere werden im nächsten Abschnitt näher betrachtet.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Therapie und Prognosen wird durch den Einsatz vieler verschiedener Klassifikationssysteme schwieriger. Darum wurden in den letzten Jahren zunehmend einheitliche Systeme für große Gruppen von Frakturen bzw. ein System für alle Frakturen entwickelt. Das erste dieser Art ist das Klassifikationssystem der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO) für Frakturen der langen Röhrenknochen (Müller et al., 2012). Es wurde Mitte der 80er Jahre entwickelt. Es beinhaltet ein Codierungssystem mit Gruppen und Untergruppen, um anhand eines Zahlen- und Buchstabencodes alle Arten von Frakturen genau zu beschreiben.

Dieses System wurde für Frakturen bei Erwachsenen entwickelt. Es gibt jedoch bedeutende Unterschiede hinsichtlich Therapie und Prognose bei Kindern. An Klassifikationssysteme für Kinderfrakturen gibt es andere Anforderungen. So sind Lokalisation und Dislokationsgrad bei Kindern wichtige Prognosefaktoren, die in einer Einteilung berücksichtigt werden müssen (von Laer et al., 2000). Darum wurde im Jahr 2006 die AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures vorgestellt (Slongo et al., 2006). Angelehnt an die AO-Klassifikation der Erwachsenen, können nun auch Kinderfrakturen definiert werden.

Um die Funktionen von Klassifikationssystemen zu gewährleisten, muss ihre Qualität überprüft werden. Dazu sollten diese Validierungsprozesse mit mehreren Phasen durchlaufen, bevor sie im klinischen Alltag zum Einsatz kommen (Burstein, 1993, Audigé et al., 2004a, Martin and Marsh, 1997). In der Vergangenheit war dies eher selten der Fall. Neuere Klassifikationssysteme wurden und werden anhand der von Audige et al. beschriebenen Validierungsmethode entwickelt (Audigé et al., 2005, Slongo et al., 2006).

Die Mindestanforderung an ein Klassifikationssystem ist eine hohe Intra- und Interobserver-Reliabilität. Mit einer nur geringen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist eine Klassifikation nur begrenzt von Nutzen (Garbuz et al., 2002). Wie diese Kriterien getestet werden, ist im Kapitel Patienten und Methoden genauer beschrieben.

1.2.3. Einteilung der suprakondylären Humerusfraktur bei Kindern

1.2.3.1. Lubinus

Im Jahre 1924 stellte Lubinus nach Untersuchung von 125 suprakondylären Humerusfrakturen eine damals neue Einteilung zur Klassifikation dieser

Frakturen vor. Zuvor wurden diese anhand von experimentell erzeugten suprakondylären Knochenbrüchen eingeteilt. Kocher unterschied auf dieser Grundlage Extensions-, Flexions-, Adduktions- und Abduktionsfrakturen (Kocher, 1896). Nach klinischer Betrachtung hielt Lubinus diese Klassifikation für nicht ausreichend. Er teilte die suprakondylären Humerusfrakturen nach dem Grad der Dislokation ein (Lubinus, 1924, Felsenreich, 1930).

- I Ohne Dislokation
- II Dislokation mit Knochenkontakt
- III Dislokation ohne Knochenkontakt

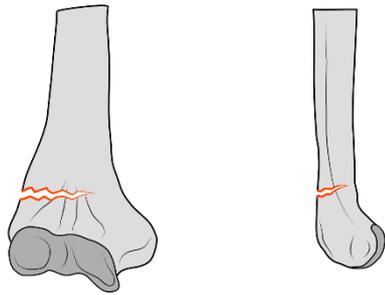
1.2.3.2. Felsenreich

Felsenreich bezieht sich 1930 auf die Einteilung von Lubinus und stellt eine Einteilung vor, die direkt auf die Behandlung hinweisen soll. Auch er teilt die suprakondylären Frakturen in drei Gruppen ein (Felsenreich, 1930).

- I *„keine oder eine nur ganz geringe Achsenknickung bei unvollkommen durchgebrochenem Knochen“*
- II *„deutliche Achsenknickung, gleichgültig in welcher Richtung“*
- III *„vollkommene Verschiebung der Fragmente, meistens in Knochenbreite“*

(Felsenreich, 1930)

Die Darstellung dieser Klassifizierung ist auf Abbildungen 9 bis 11 zu sehen.



geringe Achsenknickung

Abbildung 9: Felsenreich - Typ I

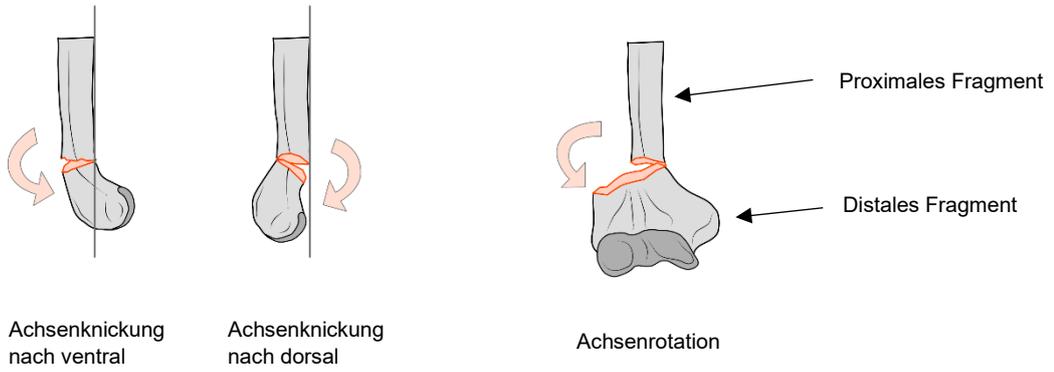
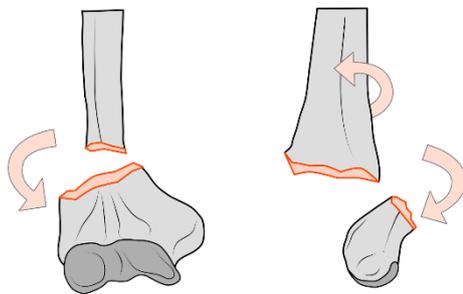


Abbildung 10: Felsenreich - Typ II



Vollkommene Verschiebung

Abbildung 11: Felsenreich - Typ III

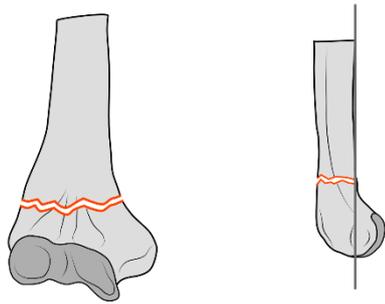
Die Einteilung lässt Rückschlüsse auf die Therapie und Komplikationen zu. So sollen beispielsweise Frakturen von Typ II und III nach Felsenreich reponiert werden. Bei Typ II - Frakturen muss auf eine sekundäre Verschiebung geachtet werden. Gefäßverletzungen kommen in Typ III mit der größten Häufigkeit vor (Felsenreich, 1930).

1.2.3.3. Gartland

Während die Klassifikationen nach Lubinus und Felsenreich im deutschsprachigen Raum verbreitet sind, wird im angloamerikanischen Raum bis heute hauptsächlich die Einteilung nach Gartland verwendet (Weinberg et al., 2002). Diese wurde 1959 veröffentlicht (Gartland, 1959) und seitdem häufig verändert und modifiziert. Eine modifizierte Variante ist die Folgende nach Houshian et al. (Houshian et al., 2001), dargestellt in den Abbildungen 12 bis 15.

- I keine oder minimale Verschiebung
- II Verschiebung, posteriore Kortikalis noch intakt
- III verschoben, kein kortikaler Kontakt
 - A posteromediale Rotation des distalen Fragments
 - B posterolaterale Rotation des distalen Fragments

(Houshian et al., 2001, Gartland, 1959)



Keine/minimale Verschiebung

Abbildung 12: Gartland - Typ I

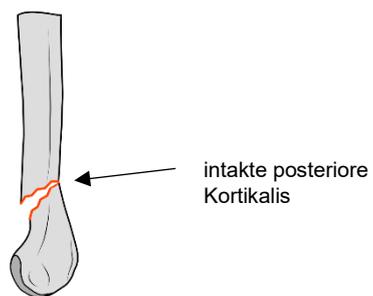


Abbildung 13: Gartland - Typ II

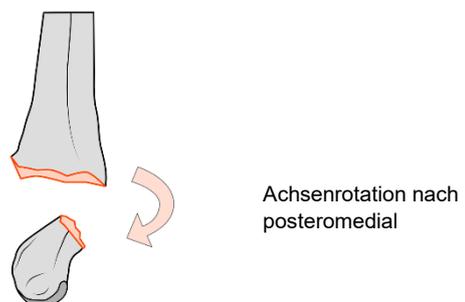


Abbildung 14: Gartland - Typ IIIA

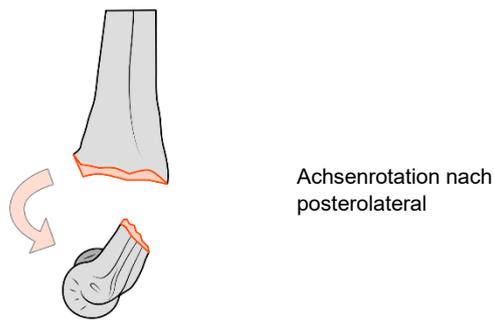


Abbildung 15: Gartland - Typ III B

Eine außerdem oft zitierte Alternative der Klassifikation ist die Unterscheidung der Gruppe II in IIA (ohne Rotationsfehler) und IIB (mit Rotationsfehler) (Wilkins and Beaty, 1996). Diese modifizierte Einteilung wurde in zahlreichen Studien bezüglich ihrer Reliabilität untersucht (Heal et al., 2007, Barton et al., 2001, Teo et al., 2019).

Die neueste Modifikation nach Leitch beinhaltet zudem eine Gruppe IV, die multidirektional (in Extension und Flexion) instabile Frakturen mit einbezieht (Leitch et al., 2006).

Modifikationen dieser weit verbreiteten und viel genutzten Klassifikation dienen der Verbesserung der Therapieentscheidung. Bis heute ist die Gartland-Einteilung mit den entsprechenden Behandlungsempfehlungen Gegenstand kontroverser Diskussionen (Omid et al., 2008, Mohammed, 1995, Vaquero-Picado et al., 2018).

1.2.3.4. Lagrange and Rigault

Im französischsprachigen Raum findet die Einteilung nach Lagrange und Rigault vorwiegend Verwendung. Sie wurde im Jahr 1962 veröffentlicht. 5 verschiedene

Gruppen der suprakondylären Extensionsfraktur werden unterschieden, wobei die Gruppe V sehr selten ist.

- I keine Verschiebung, nur der anteriore Kortex ist unterbrochen
- II Kortikalisbeteiligung beidseits, keine oder geringe Verschiebung
- III wesentliche Verschiebung
- IV wesentliche Verschiebung, kein Kontakt zwischen den Knochenfragmenten
- V metaphysär-diaphysäre Frakturen

(Lagrange and Rigault, 1962, de Gheldere et al., 2010)

1.2.3.5. Baumann

In der Schweiz entwickelte Ernst Baumann eine weitere Klassifikation für suprakondyläre Humerusfrakturen. Sie wurde 1965 veröffentlicht und wird seitdem im deutschsprachigen Raum angewandt. Auch diese Einteilung bezieht sich auf den Schweregrad der Bruchstückverschiebung.

- I *„Fissuren oder Frakturen ohne bedeutende Verschiebung“*
- II *„Verschiebung bis zu Schaftbreite mit Achsenabweichungen, Verdrehungen, Verkürzung. Bruchstücke in der Regel im gegenseitigen Kontakt“*
- III *„Große Verschiebungen mit völligem Verlust des Kontaktes der Bruchstücke“*

(Baumann, 1960)

1.2.3.6. Erne, Fricker und Müller

Selten wird im klinischen Bereich die Klassifikation nach Erne, Fricker und Müller von 1979 verwendet.

- I ohne Verschiebung
- II mit Verschiebung
 - A Seitverschiebung
 - B Verschiebung und Verdrehung
- III kein Fragmentkontakt

(Chapchal, 1979)

1.2.3.7. Pirone

Im Rahmen einer Studie zur Therapie von dislozierten Extensionsfrakturen des suprakondylären Humerus, entwickelten Pirone et al. 1988 ein weiteres Klassifikationssystem.

- I keine Verschiebung
- II mit Verschiebung
 - A abgewinkelt, aber nicht verschoben
 - B unvollständig verschoben
- III vollständige Dislokation

(Pirone et al., 1988)

1.2.3.8. Pierre Chrestian

Pierre Chrestian veröffentlichte 1987 in Frankreich eine weitere Einteilung der kindlichen suprakondylären Humerusfraktur nach Grad der Dislokation.

- I *„Keine Dislokation.“*
- II *„Einer der zwei Stützpfiler bleibt intakt.“*
- III *„Die Dislokation erfaßt beide Pfeiler. Die Fragmente bleiben in Kontakt.“*
- IV *„Die beiden Fragmente stehen nicht mehr in Kontakt.“*

(Chrestian, 1989)

1.2.3.9. Gehling und Gotzen

Eine klar therapieorientierte Klassifikation der suprakondylären Frakturen beschrieben Gehling et al. im Jahr 1995.

- A Dislokation um weniger als 20 Grad, nur in sagittaler Ebene
- B Dislokation mehr als 20 Grad in sagittaler Ebene, ventraler oder dorsaler kortikaler Kontakt der Fragmente
- C Rotationsdeformität oder Dislokation in frontaler Ebene oder Dislokation in sagittaler Ebene ohne kortikalen Kontakt

(Gehling et al., 1995)

Aus jedem Stadium wird direkt eine Behandlung abgeleitet. Frakturen der Gruppe A werden konservativ behandelt, bei Gruppe B ist eine geschlossene Reposition

mit K-Draht-Stabilisierung indiziert. Gruppe-C-Frakturen werden offen reponiert und mit gekreuzten K-Drähten stabilisiert.

1.2.3.10. Von Laer

Von Laer sieht in dem Ausmaß des Rotationsfehlers der suprakondylären Humerusfraktur die größte Bedeutung für die korrekte Behandlung und komplikationsfreie Heilung. Aus diesem Grund ist seine neue Klassifikation 1997 auf den Dislokations- und Rotationsgrad ausgelegt. Zugleich beschreibt auch er die für seine Einteilung erforderlichen Therapiemaßnahmen je nach zugeteilter Gruppe.

- I nicht disloziert
- II Dislokation in Sagittalebene, kein Rotationsfehler
- III Dislokation mit Kontakt der Fragmente, Rotationsfehler
- IV vollständige Dislokation

(von Laer, 1997)

Weinberg et al. veröffentlichten 2002 die „Ergebnisse der multizentrischen Studie der Sektion Kindertraumatologie der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie“ (Weinberg et al., 2002). Diese untersuchte auch die Klassifikation nach von Laer (von Laer, 1997). Die ursprüngliche Klassifikation erwies sich als zu ungenau, um die Ergebnisse der Reposition und Retention suffizient zu beurteilen. Weinberg et al. formulierten daher eine differenziertere Modifikation der Einteilung nach von Laer. Der neue Schwerpunkt liegt auf der genauen Definition der Dislokationsebene.

- I „vollständig undisloziert“
- II „Dislokation in einer Ebene (Sagittalebene)“
 - A „distales Fragment nach dorsal verschoben: Antekurvatur“
 - B „distales Fragment nach ventral verschoben: Rekurvatur“
- III „Dislokation in zwei Ebenen, Sagittalebene sowie Horizontal- oder Frontalebene“
 - A „Antekurvatur + Rotationsfehler“
 - B „Rekurvatur + Rotationsfehler“
 - C „Antekurvatur und Fehlstellung in der Frontalebene“
 - D „Rekurvatur und Fehlstellung in der Frontalebene (ohne Rotationsfehler)“
- IV „Dislokation in 3 Ebenen, Sagittalebene, Horizontalebene und Frontalebene“
 - A „Ante/Rekurvatur + Rotationsfehler + Varus/Valgus (Fragmente noch in Kontakt)“
 - B „Vollständig disloziert ohne Kontakt, Ebenen nicht mehr exakt definierbar“

(Weinberg et al., 2002)

1.2.3.11. AO – PCCF

Die Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO) entwickelte bereits die AO-Klassifikation für Erwachsene (auch Müller-Klassifikation genannt) zur Einteilung von Knochenbrüchen nach ihrer Lokalisation (Müller et al., 2012). Um den Anforderungen der Klassifikation von Frakturen im Kindesalter gerecht zu werden, wurde die Müller-Klassifikation weiterentwickelt. Angelehnt an die

Arbeiten von Slongo et al. (Slongo et al., 1995) und von Laer et al. (von Laer et al., 2000) erarbeitete man die AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF) (Slongo et al., 2006). Diese erweitert die adulte Klassifikation um einen Child Code für kinderspezifische Frakturen, einen Severity Code für die Einteilung des Schweregrads und einen Additional Code für weitere spezifische Frakturen (zum Beispiel Radiuskopffrakturen, Schenkelhalsfrakturen oder suprakondyläre Humerusfrakturen). Die AO-Klassifikation für Frakturen im Wachstumsalter wurde in zahlreichen Studien von der Pediatric Expert Group der AO in Zusammenarbeit mit der AO Clinical Investigation and Documentation und der International Working Group for Pediatric Traumatology validiert und weiter modifiziert (Slongo et al., 2007a, Slongo et al., 2007b, Lutz et al., 2011, Joeris et al., 2014, Joeris et al., 2017b, Joeris et al., 2017a, Audigé et al., 2017). So wurde 2011 ein Code für den Dislokationsgrad speziell bei suprakondylären Humerusfrakturen des Kindes hinzugefügt (Lutz et al., 2011).

Der gesamte Code hat 5 - 6 Ziffern. Die ersten drei beziehen sich auf die Lokalisation der Fraktur, anschließend wird die Morphologie der Kinderfraktur in zwei bis drei Ziffern beschrieben.

Die Metaphyse ist definiert durch ein Quadrat, welches in der a.p.-Röntgenaufnahme zu zeichnen ist. Die Kanten des Quadrates haben die Länge der Epiphysenfuge.

Der Code setzt sich wie folgt zusammen:

- Knochen
- Segment –
- Frakturtyp /
- Kindercode
- Schweregrad
- Zusatzcode

Tabelle 1: Die AO-PCCF-Klassifikation

<i>Knochen</i>	<i>Segment</i>	<i>Frakturtyp</i>
1 – Humerus	1 – proximal	E – Epiphyse
2 – Radius/Ulna	2 – Schaft	D – Diaphyse
3 – Femur	3 – distal	M – Metaphyse
4 – Tibia/Fibula		

<i>Kindercode</i>		
<u>Epiphyse</u>	<u>Metaphyse</u>	<u>Diaphyse</u>
/1 Salter-Harris I		/1 Bowing Fraktur
/2 Salter-Harris II	/2 Wulst/Grünholz	/2 Grünholzfraktur
/3 Salter-Harris III	/3 komplette Fraktur	
/4 Salter-Harris IV		/4 transversal <30°
/5 Two-plane Fraktur		/5 schräg >30°
/6 Tri-plane Fraktur		/6 Monteggia-Fraktur
/7 Bänderausriss	/7 Bänderausriss	/7 Galeazzi-Fraktur
/8 Flake-Fraktur		
/9 andere	/9 andere	/9 andere

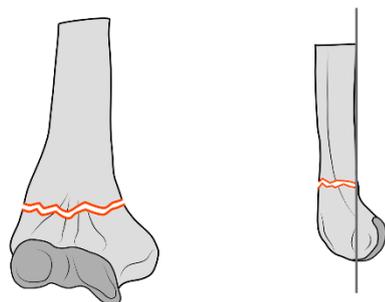
<i>Schweregrad</i>
1 – einfach
2 – Keilfraktur (3 Fragmente)
3 – komplexe Fraktur (>3 Fragmente)

<i>Zusatzcode für suprakondyläre Humerusfrakturen</i>
I – inkomplette Fraktur, keine oder nur geringe Verschiebung
II – inkomplette Fraktur, Kortikalis posterior oder anterior intakt
III – komplette Fraktur, Fragmentkontakt
IV – komplette Fraktur, kein Fragmentkontakt

(Lutz et al., 2011, Slongo et al., 2006)

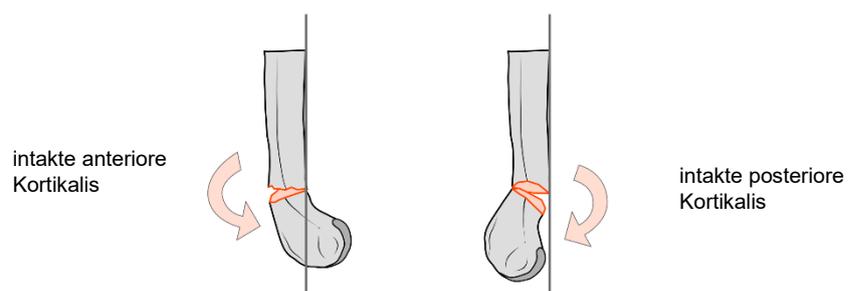
Für die Klassifikation der suprakondylären Frakturen ergibt sich daraus der Code 13-M/3 mit anschließender Bewertung des Schwere- und Dislokationsgrades.

Abbildungen 16 bis 19 zeigen die AO-PCCF-Klassifikation für suprakondyläre Humerusfrakturen mit zwei Frakturfragmenten in den verschiedenen Dislokationsgraden I bis IV nach Einteilung des Zusatzcodes.



keine/minimale Verschiebung

Abbildung 16: AO-PCCF - Grad I



intakte anteriore Kortikalis

intakte posteriore Kortikalis

Abbildung 17: AO-PCCF - Grad II

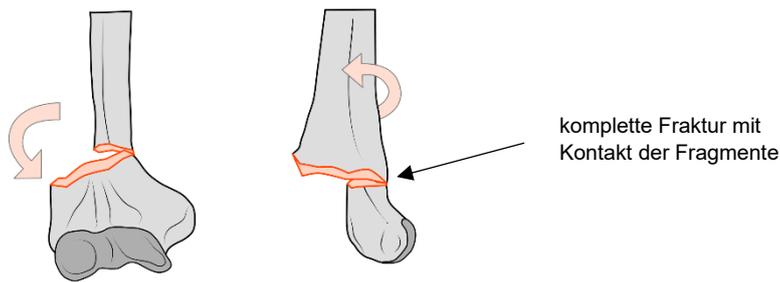


Abbildung 18: AO-PCCF - Grad III

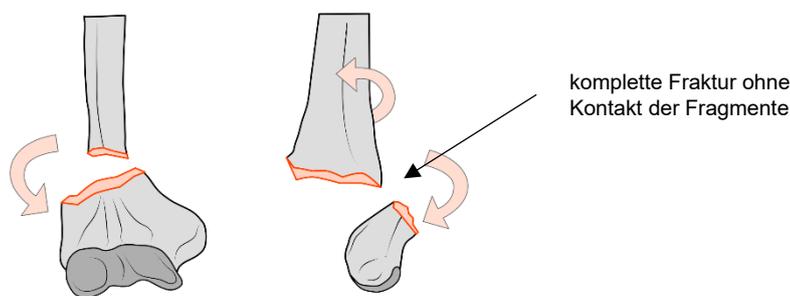


Abbildung 19: AO-PCCF - Grad IV

1.2.3.12. LiLa

Wie auch die AO-Klassifikation für Kinderfrakturen, ist auch die LiLa-Klassifikation ein System für die Einteilung von Frakturen der langen Röhrenknochen bei wachsenden Kindern. Sie wurden in etwa zeitgleich entwickelt. „LiLa“ bezieht sich hierbei auf den Verein „Licht und Lachen für kranke Kinder – Effizienz in der Medizin e.V.“, welcher zusammen mit dem „Institut für evaluative Forschung in Orthopädischer Chirurgie“ (IEFO, Universität Bern) die Entwicklung der Klassifikation unternahm. Wie auch die AO-PCCF beinhaltetete

der Entwicklungsprozess mehrere Validierungsstudien und Modifikationen bis zur endgültigen Version (Kamphaus et al., 2015, Schneidmüller et al., 2011). Sie basiert auf der von Laer-Klassifikation (von Laer et al., 2000).

Auch die LiLa-Klassifikation beinhaltet einen mehrstelligen Code.

- Knochen
- Segment
- Frakturtyp
- Spezieller Frakturtyp
- Dislokation
- Ausnahme

Tabelle 2: Die LiLa-Klassifikation

<p><i>Knochen</i></p> <p>1 – Humerus</p> <p>2 – Radius</p> <p>3 – Femur</p> <p>4 – Tibia</p>	<p><i>Segment</i></p> <p>1 – proximal</p> <p>2 – zentral/diaphysär</p> <p>3 – distal</p>	<p><i>Frakturtyp</i></p> <p>a – Gelenk</p> <p>s – Schaft</p>												
<p><i>Spezieller Frakturtyp</i></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><u>Gelenkfrakturen</u></th> <th style="text-align: left;"><u>Schaftfrakturen</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 – Salter-Harris III</td> <td>1 – Salter-Harris I und II</td> </tr> <tr> <td>2 – Salter-Harris IV</td> <td>2 – Wulst/Grünholz</td> </tr> <tr> <td>3 – Two-plane Fraktur</td> <td>3 – Quer-/Schräg-/Torsionsfrakturen</td> </tr> <tr> <td>4 – Tri-plane Fraktur</td> <td>4 – Mehrfragmentfrakturen</td> </tr> <tr> <td>5 – andere</td> <td>5 – andere</td> </tr> </tbody> </table>			<u>Gelenkfrakturen</u>	<u>Schaftfrakturen</u>	1 – Salter-Harris III	1 – Salter-Harris I und II	2 – Salter-Harris IV	2 – Wulst/Grünholz	3 – Two-plane Fraktur	3 – Quer-/Schräg-/Torsionsfrakturen	4 – Tri-plane Fraktur	4 – Mehrfragmentfrakturen	5 – andere	5 – andere
<u>Gelenkfrakturen</u>	<u>Schaftfrakturen</u>													
1 – Salter-Harris III	1 – Salter-Harris I und II													
2 – Salter-Harris IV	2 – Wulst/Grünholz													
3 – Two-plane Fraktur	3 – Quer-/Schräg-/Torsionsfrakturen													
4 – Tri-plane Fraktur	4 – Mehrfragmentfrakturen													
5 – andere	5 – andere													
<p><i>Dislokationsausmaß</i></p> <p>0 – undisloziert</p> <p>1 – tolerabel</p> <p>2 – nicht tolerabel</p>	<p><i>Ausnahme bei paarigen Knochen</i></p> <p>U – Ulna</p> <p>F – Fibula</p>													

(Kamphaus et al., 2015, Marzi, 2016, Schneidmüller et al., 2011)

Distale Humerusfrakturen mit Gelenkbeteiligung haben eine Ausnahmecodierung an der 4. Stelle (Spezieller Frakturtyp):

1 – Fraktur des radialen Kondylus

2 – Y-Fraktur

3 – Fraktur des ulnaren Kondylus

Für die Klassifikation der suprakondylären Frakturen ergibt sich daraus der Code 13s, anschließend 3 oder 4 je nach Fraktur und dann 0,1 oder 2 für die Bewertung des Dislokationsausmaßes.

1.3. Zielsetzung der Arbeit

Für klinischen und wissenschaftlichen Gebrauch ist es zwingend notwendig, dass Frakturklassifikationssysteme hinsichtlich ihrer Validität untersucht werden. Der erste Schritt und auch Mindestmaß hierfür ist die Reliabilität des Systems. Sie bildet die Grundlage für die Qualitätssicherung des weiteren Vorgehens (Garbuz et al., 2002, Audigé et al., 2005).

Bezüglich der Klassifikationssysteme für suprakondyläre Humerusfrakturen bei Kindern liegen einige Ergebnisse aus Reliabilitätsstudien vor. Allerdings gilt dies nur für die am häufigsten genutzten Systeme. Die Klassifikation nach Gartland wurde beispielsweise mehrmals auf ihre Reliabilität hin überprüft. Sie ist weit verbreitet und wird immer wieder modifiziert und erweitert, daher ist die Datenlage entsprechend vielfältig (Barton et al., 2001, Heal et al., 2007, Mallo et al., 2010, Leung et al., 2018, Teo et al., 2019). Die jüngeren Klassifikationssysteme, wie zum Beispiel die AO – PCCF Klassifikation, wurden hinsichtlich ihrer Reliabilität schon bei der Konzeption untersucht (Slongo et al., 2006, Slongo et al., 2007a, Lutz et al., 2011), da man sich auf gewisse methodische Standards bei der Entwicklung der Frakturklassifikationssysteme geeinigt hatte (Audigé et al., 2005).

Für andere Klassifikationen, beispielsweise zur Klassifikation nach Erne, Fricker und Müller, Baumann oder Gehling und Gotzen, fehlen diese Daten. Um erstmals nicht nur einzelne, sondern eine große Anzahl der bestehenden Klassifikationen für die suprakondyläre Humerusfraktur im Wachstumsalter vergleichbar zu machen, ist es daher nötig, unter gleichen Studienbedingungen die Reliabilität für alle vorhandenen Frakturklassifikationssysteme zu erheben und anschließend zu vergleichen. Dies ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

2. Patienten und Methoden

2.1. Studienpopulation

Röntgenaufnahmen von insgesamt 42 Kindern mit einer suprakondylären Humerusfraktur wurden untersucht. Die Patientendaten wurden retrospektiv aus der klinikeigenen Traumadatenbank der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen, entnommen. Es wurden hierbei 42 Röntgenbilder aus dem Zeitraum vom 01.01.1989 bis 31.12.2010 ausgewählt. Bedingung für die Auswahl war das Vorhandensein einer traumatisch bedingten suprakondylären Fraktur des Humerus bei offener Wachstumsfuge. Eine Selektion bezüglich des Unfallmechanismus, der Einteilung oder der Therapie der Fraktur wurde nicht durchgeführt. Auch eine Selektion der Röntgenaufnahmen nach Bildqualität fand nicht statt.

Die Aufklärung der Patient*innen und der Erziehungsberechtigten erfolgte durch ein Informationsblatt. Die schriftliche Einwilligung zur Verwendung der Daten musste in jedem Fall vorliegen.

Eine Prüfung durch die Ethikkommission der Universität Tübingen wurde durchgeführt. Mit dem Anerkennungsschreiben vom 12.09.2008 lag ein positives Votum der Ethikkommission vor (Projektnummer 8/2008B01). Dieses wurde am 02.09.2020 durch die Ethikkommission erneut bestätigt.

2.2. Datenerhebung

Im Rahmen der Frakturdiagnostik wurden am Unfall- bzw. Aufnahmetag in der Unfallklinik präoperative Röntgenbilder angefertigt. Diese wurden in anterior-posteriorer und lateraler Ansicht aufgenommen und archiviert. Für die Evaluation

der Bilder wurden diese dem Röntgenarchiv der Klinik entnommen und für die teilnehmenden Ärzt*innen in digitaler Form zugänglich gemacht.

Die Klassifizierung der Frakturen auf den Röntgenaufnahmen wurde durch drei teilnehmende Ärzt*innen, im Folgenden Beobachter*innen genannt, durchgeführt. Die Beobachter*innen hatten zu diesem Zeitpunkt ein unterschiedliches Ausbildungs- und Erfahrungsniveau. Ein Beobachter (B1) war ein Oberarzt der Klinik und Facharzt für spezielle orthopädische Chirurgie. Eine weitere Beobachterin (B2) war Fachärztin für Allgemeinchirurgie und Unfallchirurgie. Die dritte Beobachterin (B3) war Assistenzärztin für Orthopädie und Unfallchirurgie im dritten Jahr ihrer Ausbildung.

Zur Vorbereitung der Klassifizierungssitzung bekamen alle Beobachter*innen Informationen über die anzuwendenden Klassifikationssysteme in Form von schriftlichen Beschreibungen und Diagrammen. Ein spezielles Training zur korrekten Klassifizierung wurde zur Vorbereitung der ersten Sitzung durchgeführt. Zusätzliche Hilfsmittel waren nicht erlaubt.

Jede/r Beobachter*in durchlief zwei Sitzungen im Abstand von sechs Wochen, in welcher er jede der 42 Frakturen nach jedem der 12 Klassifikationssysteme einteilte. Diese waren im Einzelnen die Klassifikation nach Lubinus (Lubinus, 1924), Felsenreich (Felsenreich, 1930), die modifizierte Klassifikation nach Gartland (Wilkins and Beaty, 1996), die Klassifikation nach Lagrange und Rigault (Lagrange and Rigault, 1962), nach Baumann (Baumann, 1965), sowie nach Erne, Fricker und Müller (Chapchal, 1979), nach Pirone (Pirone et al., 1988), nach Pierre Chrestian (Chrestian, 1989), nach Gehling und Gotzen (Gehling et al., 1995), die modifizierte Klassifikation nach von Laer (Weinberg et al., 2002), die AO-PCCF mit Zusatzcode für suprakondyläre Humerusfrakturen (Lutz et al., 2011) und die LiLa-Klassifikation (Kamphaus et al., 2015). Die Ergebnisse der Sitzung wurden zur statistischen Auswertung in das Programm IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) Statistics 27 (IBM Corporation, Armonk, USA) eingetragen. Jede/r Betrachter*in führte seine/ihre Klassifikationssitzung unabhängig von den anderen Betrachter*innen durch. Die Röntgenbilder wurden vorab für die Klassifizierung bezüglich

Patienteninformationen und Datum anonymisiert. Die Reihenfolge der bewerteten Röntgenaufnahmen waren für den/die Betrachter*in zufällig. Zwischen den beiden Sitzungen fand keine Evaluation der Ergebnisse statt.

2.3. Statistische Methoden

Als Gütekriterium für die verschiedenen Klassifikationssysteme soll in dieser Studie die Inter- und Intrabeobachter-Reliabilität gemessen werden (die Begriffe Inter- und Intrabeobachter-Reliabilität schließen im Folgenden Beobachter*innen mit ein). Die Reliabilität ist allgemein ein Kriterium für die Zuverlässigkeit und Genauigkeit einer Messung. Reliabel ist ein Messinstrument dann, wenn es wiederholt unter gleichen Bedingungen gleiche Ergebnisse liefert. Das Messinstrument in dieser Studie sind die Klassifikationssysteme.

Die Interbeobachter-Reliabilität gibt an, in welchem Maße das Ergebnis der Beurteilung durch verschiedene Beobachter reproduzierbar ist. Somit wird sie durch die übereinstimmenden Klassifizierungen durch die drei verschiedenen Beobachter*innen zu einem Zeitpunkt definiert. Für die Intrabeobachter-Reliabilität sind hingegen Beurteilungen des/der gleichen Beobachter*in zu verschiedenen Zeitpunkten nötig. Bestimmt wird, in welchem Maße das Ergebnis der gleichen Beobachtenden zum gleichen Ergebnis zu verschiedenen Zeitpunkten kommt. Hierfür wurde die Klassifizierungssitzung nach sechs Wochen unter den gleichen Bedingungen wiederholt.

Ein etablierter statistischer Test zur Messung der Inter- und Intrabeobachter-Reliabilität für kategoriale Daten ist der Kappa-Koeffizient, der 1960 das erste Mal durch J. Cohen beschrieben wurde (Cohen, 1960). Mit diesem lässt sich die Übereinstimmung immer paarweise, also von zwei Beobachter*innen oder einem/einer Beobachter*in an zwei Zeitpunkten, bestimmen. Die Übereinstimmung, die dabei durch Zufall zustande kommen kann, wird in der Berechnung herausgenommen.

Der Kappa-Koeffizient ist definiert als

$$k = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e}$$

Der Anteil der übereinstimmenden Messungen, in diesem Fall die exakt gleiche Klassifizierung, ist durch p_0 angegeben. Es wird nur jene Klassifizierung als übereinstimmend bewertet, welche zu 100% in der vollen Länge des Codes identisch sind. p_e ist jener Anteil der Messungen, welcher durch Zufall zu erwarten ist. Dadurch ist $1 - p_e$ als die maximale Übereinstimmung definiert, die möglich ist, ohne durch Zufall bestimmt zu sein.

Der Kappa-Koeffizient kann Werte von -1 bis +1 annehmen. Der höchste Wert, also $\kappa=1$ gibt eine vollständige Übereinstimmung an, $\kappa=0$ bedeutet, dass das Ergebnis nur durch Zufall entstanden ist.

Wichtig ist, dass Kappa nicht misst, ob eine Bewertung korrekt ist, sondern lediglich das Maß der Übereinstimmungsgüte angibt. Die Bewertung des Kappa-Koeffizienten kann durch verschiedene etablierte Richtlinien erfolgen. Eine der gebräuchlichsten ist die Interpretation nach Landis und Koch (Landis and Koch, 1977). Somit können die Ergebnisse beurteilt und verglichen werden. In Tabelle 3 wird die Einordnung der Kappa-Werte nach Landis und Koch genau beschrieben.

Tabelle 3: Einordnung der Kappa-Werte nach Landis und Koch

<i>Kappa-Werte</i>	<i>Interpretation der Übereinstimmung (Englisches Original)</i>	<i>Deutsche Entsprechung</i>
<0.00	Poor	Schlecht
0.00 – 0.20	Slight	Gering
0.21 – 0.40	Fair	Ausreichend
0.41 – 0.60	Moderate	Mittelmäßig
0.61 – 0.80	Substantial	Wesentlich
0.81 – 1.00	Almost perfect	Beinahe perfekt

Die Einteilung gilt lediglich als Bezugspunkt und hat keinen Anspruch auf eine vollständige Beurteilung der Ergebnisse.

3. Ergebnisse

3.1. Patientenkollektiv

Es wurden Röntgenbilder von 42 Kindern mit einer suprakondylären Humerusfraktur bei offener Wachstumsfuge ausgewählt. 26 (61,9%) Jungen und 16 (38,1%) Mädchen waren betroffen. In 21 Fällen war der rechte und in 21 Fällen der linke Humerus betroffen. Das durchschnittliche Alter betrug am Unfalltag 6,77 Jahre. Das jüngste Kind war 4 Jahre, das älteste 10 Jahre alt.

3.2. Intrabeobachter-Reliabilität

Die Kappa-Koeffizienten der einzelnen Beobachter*innen als Maß der Intrabeobachter-Reliabilität wurden mit Hilfe einer - wie in Tabelle 4 dargestellten - Kreuztabelle errechnet. Dieses Beispiel zeigt die Kreuztabelle von Beobachter 1, einem Oberarzt (OA) für die Lubinus-Klassifikation. Die Röntgenbilder wurden an zwei Zeitpunkten, T1 und T2, von besagtem Beobachter 1 in die Kategorien I, II und III nach Lubinus eingeteilt. Daraus ergab sich ein Kappa-Koeffizient als Maß der Übereinstimmung von 0,799 für B1.

Tabelle 4: Berechnung Kappa-Koeffizient Intrabeobachter B1, Lubinus

OA_T1_cod * OA_T2_cod Kreuztabelle

Anzahl

		OA_T2_cod			Gesamt
		I	II	III	
OA_T1_cod	I	4	1	0	5
	II	0	27	0	27
	III	0	3	7	10
Gesamt		4	31	7	42

Symmetrische Maße

		Wert
Maß der Übereinstimmung	Kappa	,799
Anzahl der gültigen Fälle		42

In Tabelle 5 sind die Kappa-Werte der einzelnen Beobachter*innen dargestellt, die sich aus der Evaluierung der Röntgenbilder zu zwei Zeitpunkten im Abstand von 6 Wochen ergaben.

Für jede Klassifikation wurde zudem ein Mittelwert der Intrabeobachter-Kappa-Koeffizienten ermittelt. Die Mittelwerte lagen hierbei zwischen $\kappa=0,512$ (Lagrange und Rigault) und $\kappa=0,816$ (von Laer).

Tabelle 5: Kappa-Werte Intrabeobachter-Reliabilität

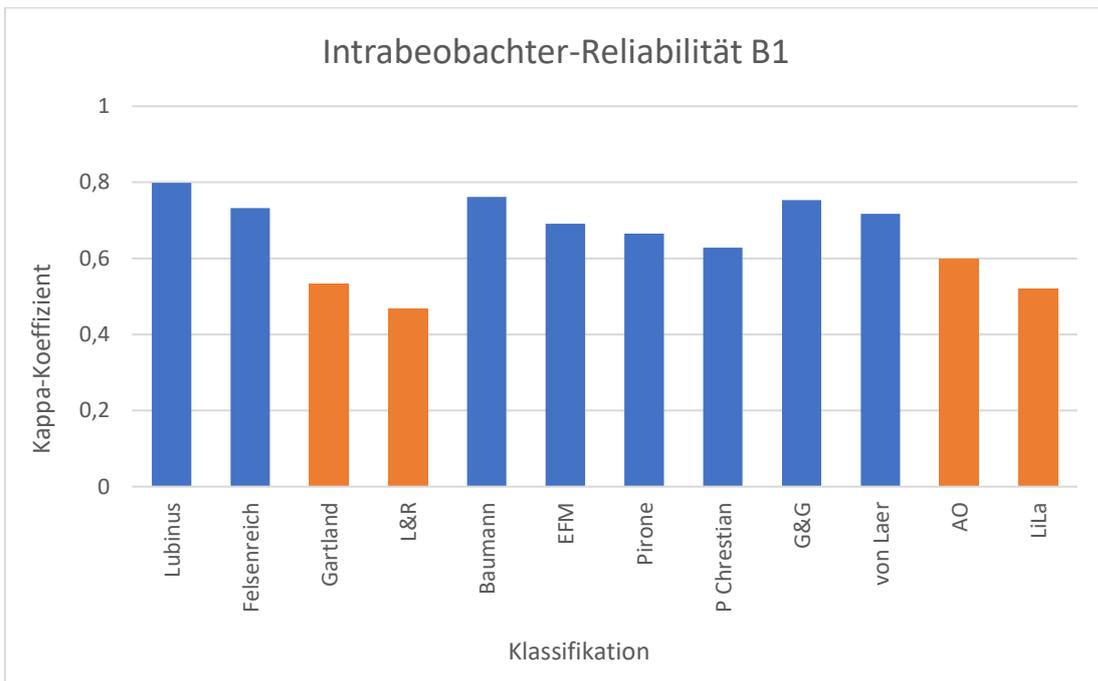
Klassifikation	B1	B2	B3	Mittelwert
Lubinus	0,799	0,742	0,810	0,784
Felsenreich	0,732	0,635	0,757	0,708
Gartland	0,533	0,539	0,601	0,558
Lagrange und Rigault	0,467	0,578	0,517	0,521
Baumann	0,762	0,692	0,729	0,728
Erne, Fricker, Müller	0,691	0,711	0,763	0,722
Pirone	0,665	0,666	0,717	0,683
Pierre Chrestian	0,628	0,653	0,570	0,617
Gehling und Gotzen	0,753	0,740	0,814	0,769
Von Laer	0,717	0,823	0,908	0,816
AO - PCCF	0,598	0,643	0,687	0,643
LiLa	0,520	0,573	0,592	0,562

Beobachter 1 erreichte Kappa-Werte von mittelmäßiger ($\kappa=0,467$ für Lagrange und Rigault) bis wesentlicher Übereinstimmung ($\kappa=0,799$ für Lubinus). Beobachterin 2 erzielte Ergebnisse von mittelmäßiger Übereinstimmung bei der Klassifikation von Gartland ($\kappa=0,539$) bis zur beinahe perfekten Übereinstimmung bei der Klassifikation nach von Laer ($\kappa=0,823$). Auch Beobachterin 3 erreichte bei von Laer einen Wert der beinahe perfekten Übereinstimmung ($\kappa=0,908$). Der niedrigste Wert lag bei Beobachterin 3 bei einer mittelmäßigen Übereinstimmung von Lagrange und Rigault ($\kappa=0,517$).

Mit der Einordnung der Kappa-Koeffizienten nach Landis und Koch ergab sich im Mittelwert für die Klassifikationssysteme Gartland ($\kappa=0,558$), Lagrange und Rigault ($\kappa=0,521$) und LiLa ($\kappa=0,562$) und auch bei nahezu allen Beobachtern im Einzelnen eine mittelmäßige Übereinstimmung. Die Klassifikationen nach Felsenreich, Baumann, Erne, Fricker und Müller, Pirone und Pierre Chrestian wurden im Mittel und von nahezu allen Beobachtern einzeln mit Kappa-Werten im Bereich der wesentlichen Übereinstimmung bewertet. Die Klassifikation nach Lubinus erreichte insgesamt eine wesentliche Übereinstimmung bezüglich der Intrabeobachter-Reliabilität ($\kappa=0,784$). Beobachter 1 und Beobachterin 2 zeigten Kappa-Werte einer wesentlichen Übereinstimmung ($\kappa=0,799$ für B1 und $\kappa=0,742$ für B2), Beobachterin 3 eine beinahe perfekte Übereinstimmung ($\kappa=0,810$). Beobachterin 3 klassifizierte mit beinahe perfekter Übereinstimmung auch die Systeme nach Gehling und Gotzen ($\kappa=0,814$) und von Laer ($\kappa=0,908$). Die Klassifikation wurde auch von Beobachterin 3 mit beinahe perfekter Übereinstimmung klassifiziert ($\kappa=0,823$), was sich auch im Mittelwert aller Beobachter*innen ausdrückt ($\kappa=0,816$).

Die Einordnung der Kappa-Werte nach Landis und Koch sind für alle Beobachter*innen einzeln und für die Mittelwerte aller drei in den folgenden Diagrammen 1-4 dargestellt. Eine beinahe perfekte Übereinstimmung wurde farblich mit grünem Balken markiert, eine wesentliche Übereinstimmung mit einem blauen. Die mittelmäßige Übereinstimmung zeigt sich orange.

Diagramm 1: Intrabeobachter-Reliabilität B1



L&R: Lagrange und Rigault; EFM: Erne, Fricker und Müller; G&G: Gehling und Gotzen

Diagramm 2: Intrabeobachter-Reliabilität B2

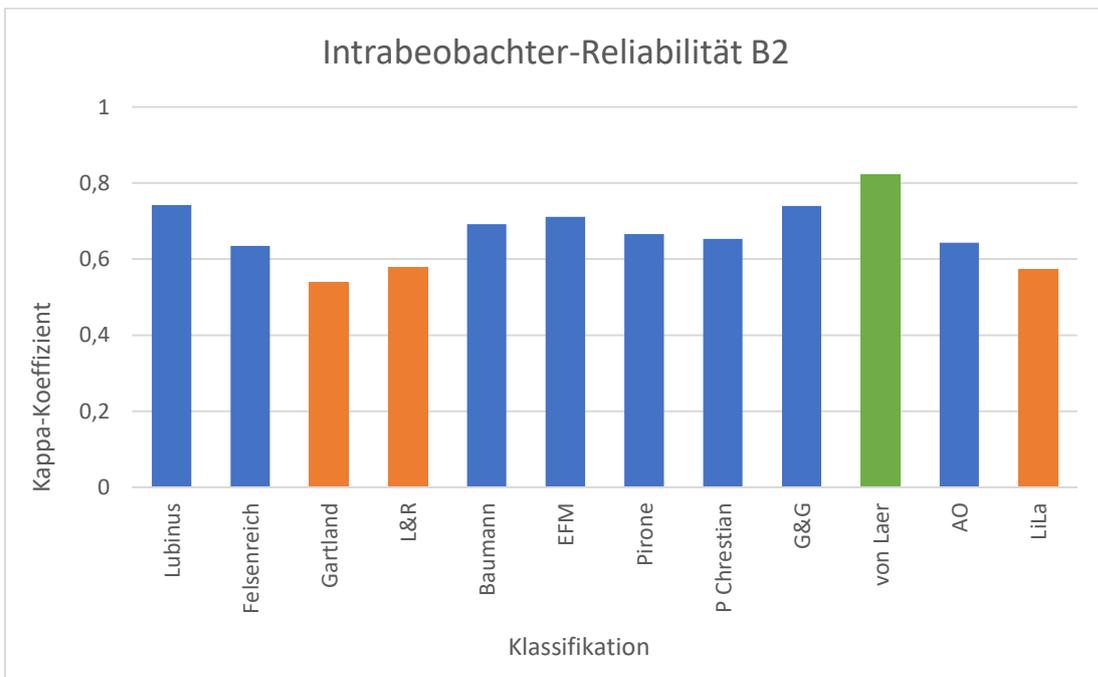


Diagramm 3: Intrabeobachter-Reliabilität B3

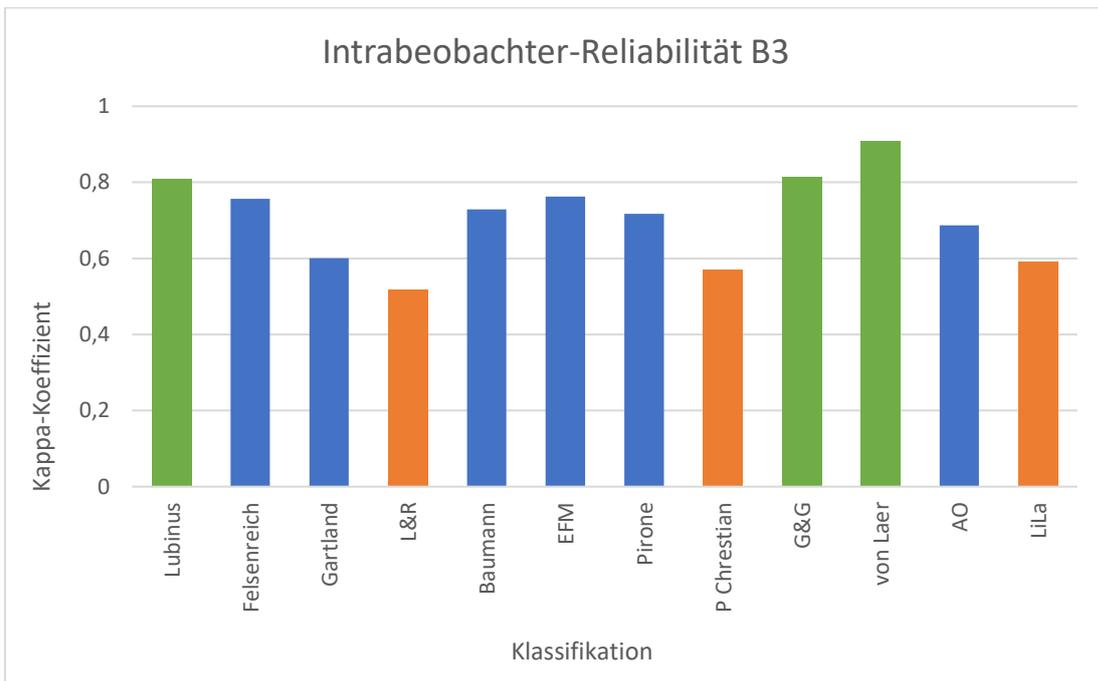
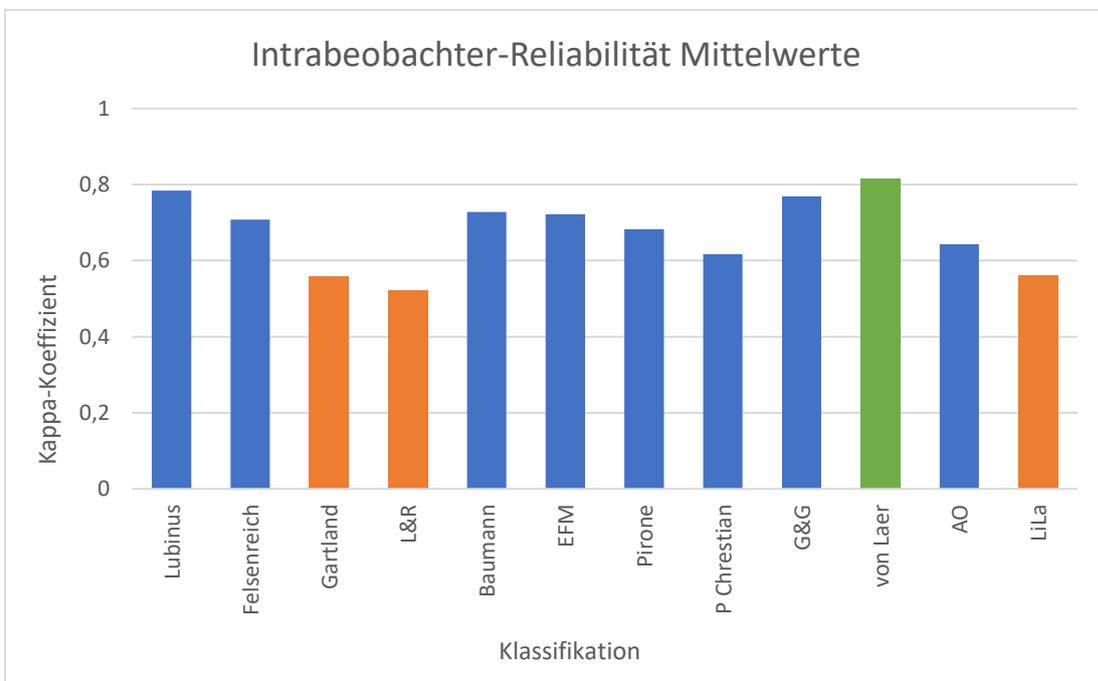


Diagramm 4: Intrabeobachter-Reliabilität Mittelwerte



Damit ergab sich im Durchschnitt der Intrabeobachter-Koeffizienten eine, aufgeführt in aufsteigender Reihenfolge, mittelmäßige Übereinstimmung für die Klassifikationen Lagrange und Rigault, Gartland und LiLa, eine wesentliche Übereinstimmung für die Klassifikation nach Pierre Chrestian, die AO-PCCF, Pirone, Felsenreich, Erne, Fricker und Müller, Baumann, Gehling und Gotzen, sowie Lubinus und eine beinahe perfekte Übereinstimmung für die modifizierte Klassifikation nach von Laer.

3.3. Interbeobachter-Reliabilität

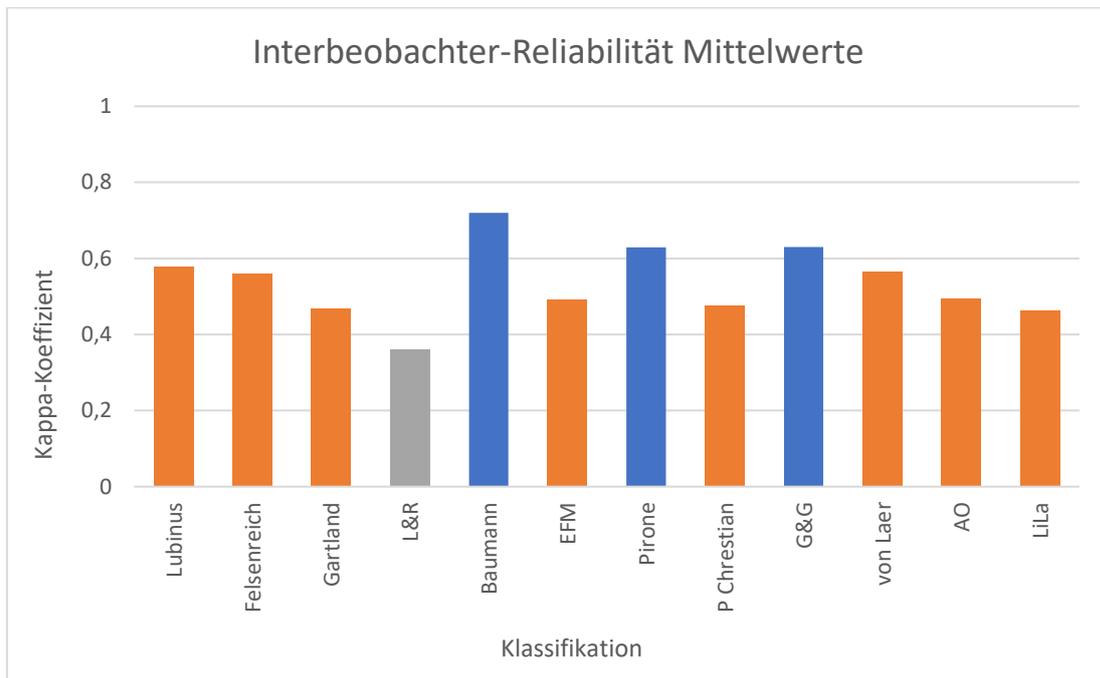
In Tabelle 6 sind die Interbeobachter-Kappa-Koeffizienten paarweise verglichen. Zudem wurden die Mittelwerte der paarweisen Kappa-Werte ermittelt. Diese lagen hierbei zwischen einer ausreichenden Übereinstimmung für Lagrange und Rigault ($\kappa=0,361$) und einer wesentlichen Übereinstimmung für Baumann ($\kappa=0,720$).

Tabelle 6: Kappa-Werte der Interbeobachter-Reliabilität

Klassifikation	B1 – B2	B1 – B3	B2 – B3	Mittelwert
Lubinus	0,581	0,644	0,505	0,577
Felsenreich	0,571	0,622	0,483	0,559
Gartland	0,479	0,441	0,482	0,467
Lagrange und Rigault	0,351	0,390	0,343	0,361
Baumann	0,762	0,670	0,729	0,720
Erne, Fricker, Müller	0,429	0,590	0,455	0,491
Pirone	0,641	0,605	0,640	0,629
Pierre Chrestian	0,444	0,557	0,431	0,477
Gehling und Gotzen	0,683	0,673	0,535	0,630
Von Laer	0,616	0,542	0,535	0,564
AO - PCCF	0,517	0,415	0,553	0,495
LiLa	0,484	0,469	0,436	0,463

Die Interbeobachter-Werte ergaben eine ausreichende Übereinstimmung nach Landis und Koch für die Klassifikation nach Lagrange und Rigault ($\kappa=0,361$). In Diagramm 5 ist dies mit einem grauen Balken gekennzeichnet. Des Weiteren zeigten sich Kappa-Mittelwerte der Interbeobachter-Beurteilung bei vielen Klassifikationen im Bereich zwischen 0,4 und 0,6, was einer mittelmäßigen Übereinstimmung entspricht. Lediglich Pirone, Gehling und Gotzen sowie Baumann konnten Kappa-Werte von über 0,6 und somit eine wesentliche Übereinstimmung erreichen.

Diagramm 5: Interbeobachter-Reliabilität Mittelwerte



Die Klassifikation nach Lagrange und Rigault zeigte mit einer mittelmäßigen Intrabeobachter-Reliabilität ($\kappa=0,467$) und einer ausreichenden Interbeobachter-Reliabilität ($\kappa=0,361$) insgesamt die schlechteste Übereinstimmung. Während die Klassifikation nach Von Laer beinahe perfekte Intrabeobachter-Reliabilität ($\kappa=0,816$) erreichte und auch Lubinus ($\kappa=0,784$) eine hohe Übereinstimmung erreichte, lagen für die Interbeobachter-Einordnung allerdings in beiden Fällen nur mittelmäßige Übereinstimmungswerte vor ($\kappa=0,564$ für von Laer und $\kappa=0,577$ für Lubinus). Die Baumann-Klassifikation erreichte die höchsten Kappa-Werte im Bereich der Interbeobachter-Beurteilung ($\kappa=0,720$). Auch Pirone ($\kappa=0,629$) und Gehling und Gotzen ($\kappa=0,630$) erzielten eine wesentliche Übereinstimmung. Allerdings befanden sich alle drei Klassifikationssysteme bei der Betrachtung der Intrabeobachter-Werte im Mittelfeld. Trotzdem erreichten sie auch hier eine wesentliche Übereinstimmung nach Landis und Koch ($\kappa=0,728$ für Baumann, $\kappa=0,683$ für Pirone, $\kappa=0,769$ für Gehling und Gotzen).

Zusammenfassend lagen für die Intra- und Interbeobachter-Ergebnisse höhere Kappa-Werte vor als für die Ergebnisse der Interbeobachter. Während Lagrange und Rigault in beiden Erhebungen die niedrigsten Werte erzielten, waren die hohen Werte bei der Intra- und Interbeobachtererhebung auf unterschiedliche Klassifikationen verteilt.

4. Diskussion

Das Ziel der Studie war die Erfassung der Intra- und Interbeobachter-Reliabilität von 12 verschiedenen Klassifikationssystemen für die suprakondyläre Humerusfraktur im Wachstumsalter. Hierfür klassifizierten drei Beobachter*innen mit unterschiedlichem Ausbildungsniveau Röntgenbilder von Kindern mit einer suprakondylären Humerusfraktur. Die Übereinstimmung der Klassifizierung und damit die Reliabilität wurde mit dem Kappa-Koeffizienten ermittelt (Cohen, 1960). Die Interpretation der Werte erfolgte nach der Methode von Landis und Koch (Landis and Koch, 1977).

Die durchschnittliche Intrabeobachter-Reliabilität (Intra-B-R) lag bei den Klassifikationen Lagrange und Rigault, Gartland und LiLa im Bereich einer mittelmäßigen Übereinstimmung. Eine wesentliche Übereinstimmung erreichten die Klassifikation nach Pierre Chrestian, die AO-PCCF, Pirone, Felsenreich, Erne, Fricker und Müller, Baumann, Gehling und Gotzen und auch Lubinus. Einzig die von Laer-Klassifikation ($\kappa=0,816$) zeigte eine beinahe perfekte Übereinstimmung.

Die Interbeobachter-Reliabilität (Inter-B-R) war in jeder Klassifikation schlechter als die Intra-B-R. Das ist nicht ungewöhnlich und stimmt mit anderen Untersuchungen überein (Audigé et al., 2004a, Barton et al., 2001, Grazina et al., 2018, Heal et al., 2007, Leung et al., 2018, Rocha et al., 2015, Teo et al., 2019, Mallo et al., 2010, de Gheldere et al., 2010, Schneidmüller et al., 2011, Bernstein et al., 1996). Die Klassifikation Lagrange und Rigault erzielte eine ausreichende Übereinstimmung und nur drei Klassifikationen - Pirone, Gehling und Gotzen, Baumann - lagen bei Werten einer mittelmäßigen Übereinstimmung. Die übrigen Klassifikationen zeigten wesentliche Übereinstimmung im Interbeobachter-Vergleich.

4.1. Beurteilung der Ergebnisse

Die durchschnittlichen Kappa-Werte der einzelnen Klassifikationen im Intra- und Interbeobachter-Vergleich erscheinen auf den ersten Blick gering, mit rechnerisch deutlichem Abstand zur vollkommenen Übereinstimmung von $\kappa=1$. Mit Interpretation der Kappa-Werte nach Landis und Koch, erreichen die meisten Klassifikationen eine mittelmäßige oder wesentliche Übereinstimmung. Diese Interpretation bezieht sich jedoch nur auf die absoluten Kappa-Zahlen. Der Kontext darf aber nicht außer Acht gelassen werden. Ohne weiterführende Interpretation ist daher keine abschließende Bewertung der Kappa-Werte vorzunehmen (Audigé et al., 2004a).

Die Ergebnisse bei der Erhebung von Kappa-Koeffizienten werden von verschiedenen Faktoren im Verlauf einer Studie beeinflusst. Methodisch hat beispielsweise die Gestaltung der Bewertungssitzungen Auswirkungen auf die Ergebnisse. In dieser Studie wurden die Beobachtungen in unabhängigen Sitzungen von den Beobachter*innen allein durchgeführt. Auch zwischen den Sitzungen fanden keine Besprechungen bezüglich der Ergebnisse statt. Im Vergleich zu Studien, in welchen die Beobachtenden Rücksprache zwischen den einzelnen Sitzungen halten können, ist unter den hier vorhandenen Bedingungen eine geringere Übereinstimmung der Ergebnisse zu erwarten.

Auch die Erfahrung der Beobachtenden kann eine Auswirkung auf die Ergebnisse haben. Andere Studien zeigten, dass erfahrenere Beobachter*innen eine höhere Intra-B-R erreichen (Kamphaus et al., 2015, Slongo et al., 2007a). Dies kann in dieser Studie nicht belegt werden. Die Beobachter*innen hatten ein unterschiedliches Ausbildungsniveau und Berufserfahrung. Trotzdem kann beim Vergleich der Intra-B-R kein Muster gefunden werden, welches hiermit in Zusammenhang stünde. Hierbei ist dennoch zu beachten, dass in der Studie nicht die Genauigkeit der Kategorien gemessen wurde. Das bedeutet, dass kein Goldstandard definiert wurde, nachdem die Kategorien als richtig oder falsch eingeordnet werden können. In diesem Falle könnte die Erfahrung der Beobachtenden eine Rolle spielen.

Auch wenn kein Goldstandard definiert wurde, kann man anhand der Verteilung der Ergebnisse eine ungefähre Verteilung der Kategorien der Frakturen der Studienpopulation ablesen. Stark vereinfacht, sind bei allen 12 beschriebenen und bewerteten Klassifikationssystemen drei grundlegende Kategorien enthalten. Die erste Kategorie ist in der Regel so definiert, dass keine Dislokation oder Verschiebung im Röntgenbild zu sehen ist. Die dritte bzw. höchste Kategorie beschreibt meist eine vollständige Dislokation der Frakturfragmente ohne Kontakt. Die mittlere Kategorie/n sind je nach Klassifikation unterschiedlich differenziert. Die Beschreibung einer unvollständigen Verschiebung oder Dislozierung der Frakturteile ist bei manchen sehr genau unterteilt in verschiedene Grade, bei anderen Klassifikationen allgemein gehalten. Die meisten Fälle der in dieser Studie eingeschlossenen Patient*innen fallen in diese mittlere/n Kategorie/n. Daher sollen im Folgenden die Reliabilitätsergebnisse vor allem bezüglich dieser mittleren Kategorie/n dargestellt werden.

Für die Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei der Klassifikation von Frakturen ist sowohl die Intra- als auch die Interbeobachter-Reliabilität von Bedeutung. Dennoch ist für den klinischen Gebrauch, die wissenschaftliche Bewertung und die Entwicklung von Therapiestrategien, die Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Beobachter*innen wichtiger als die eines/einer Beobachter*in zu zwei Zeitpunkten. Darum gibt es auch mehr vergleichbare Studien bezüglich der Inter-B-R. Der Schwerpunkt, der im Folgenden diskutierten Ergebnisse, liegt deshalb auf den Werten der Inter-B-R (Slongo et al., 2007b, Lutz et al., 2011, Fonseca et al., 2018).

Wie bereits deutlich gemacht, dürfen die Kappa-Werte nicht nur als absolute Zahlen gesehen werden. Sie müssen vielmehr miteinander verglichen werden, wenn möglich unter ähnlichen oder gleichen methodischen Bedingungen. Durch diese Studie, in der alle 12 Klassifikationen unter gleichen Bedingungen angewandt wurden, ist dieser Vergleich möglich.

Es fällt auf, dass die Klassifikation von Lagrange und Rigault sowohl in der Inter- ($\kappa=0,361$) als auch der Intra-B-R ($\kappa=0,521$) die schlechtesten Ergebnisse aufwiesen. Ebenfalls gering war die Übereinstimmung der Gartland-Klassifikation

im direkten Vergleich. Dies ist vor allem unter dem Aspekt relevant, da beide Klassifikationen etabliert und viel genutzt sind. Darauf soll im nächsten Kapitel, im Vergleich mit anderen Studien, noch näher eingegangen werden. Außer diesen beiden, war auch die Klassifikation nach Pierre Chrestian im Vergleich aller Systeme hinsichtlich Inter- und Intra-B-R unterlegen. Die drei Klassifikationssysteme haben gemeinsam, dass sie in der „mittleren“ Kategorisierung, der Beschreibung von unvollständig verschobenen Frakturen, mehr als eine Kategorie einführen. So unterscheidet Lagrange und Rigault zwischen einer geringen (mit beidseitiger Beteiligung der Kortikalis) oder wesentlichen Verschiebung (Lagrange and Rigault, 1962, de Gheldere et al., 2010). Pierre Chrestian macht eine unvollständige Dislokation an der Stabilität der Stützpfeiler fest (Chrestian, 1989). Die Gartland-Klassifikation in der hier angewandten Modifikation unterscheidet die Dislokation mit und ohne posterioren kortikalen Kontakt und differenziert weiter zwischen posterolateraler oder -medialer Dislokation (Houshian et al., 2001). Innerhalb dieser Modifikation gab es Probleme in der Auswertung, da zwischen Kategorie IIIA oder IIIB unterschieden werden sollte, dennoch eine einzelne Klassifizierung in III stattfand. Dies hatte einen, wenn auch geringen, negativen Einfluss auf den Kappa-Koeffizienten. Trotzdem scheint eine weitere Differenzierung von unvollständiger Dislokation der Bruchstücke bei Klassifizierung der suprakondylären Humerusfraktur, in der Art wie sie bei diesen Klassifikationen stattfindet, die Reliabilität zu senken.

Wenn man schließlich die Klassifikationssysteme betrachtet, die im Vergleich am besten abgeschnitten haben, kommt man bezüglich der Inter-B-R unter anderem zu einer mittelmäßigen Reliabilität bei Lubinus ($\kappa=0,577$) und Gehling und Gotzen ($\kappa=0,630$) und einer wesentlichen Reliabilität bei Baumann ($\kappa=0,72$). Lubinus und Baumann haben je drei Kategorien, welche unvollständige Dislokationen nicht näher einteilen. Auch Gehling und Gotzen definieren drei Kategorien. Sie unterteilen die Verschiebung sehr genau in Kategorie A = $<20^\circ$ und Kategorie B = $>20^\circ$ Verschiebung (Gehling et al., 1995). Eine einfache und klar definierte Einteilung erzielte gute Ergebnisse bezüglich der Reliabilität einer Klassifikation.

Auch Felsenreich definiert nur drei Kategorien (keine, deutliche und vollkommene Verschiebung) und erzielte eine mittelmäßige Reliabilität ($\kappa=0,559$), die sich im Gesamtvergleich im Mittelfeld befinden (Felsenreich, 1930).

Pirone erreichte im Interbeobachter-Vergleich wesentliche Übereinstimmung ($\kappa=0,629$, 3. Position im Vergleich). Im Intraobserver-Vergleich sind die Ergebnisse deutlich schlechter ($\kappa=0,683$, 7. Position im Gesamtvergleich). Pirone teilt die Fraktur in vier Kategorien ein, die verschobenen Frakturen mit Fragmentkontakt in „abgewinkelt“ und „unvollständig“ (Pirone et al., 1988).

Auch Erne, Fricker und Müller unterteilen die unvollständige Dislokation. Sie definieren Seitverschiebung oder Verdrehung und erreichten wesentliche ($\kappa=0,722$ für Intra-B-R) und mittelmäßige ($\kappa=0,491$ für Inter-B-R) Übereinstimmungen (Chapchal, 1979).

Gesondert betrachtet werden sollen nun die Klassifikationen, die mehr als vier Kategorien einführen. Dies ist der Fall bei der LiLa und AO-PCCF (beides Klassifikationssysteme für lange Röhrenknochen im Allgemeinen) und die Klassifikation nach von Laer.

Für die LiLa-Klassifikation relevant war in dieser Studie die Unterscheidung zwischen Quer-/Schräg-/Torsionsfrakturen und Mehrfragmentfrakturen. Schon bei dieser Unterscheidung waren sich die Beobachter*innen häufig nicht einig. Zudem wird der Grad der Dislokation in drei Stufen angegeben. Insgesamt ergab sich daraus eine mittelmäßige Inter-B-R ($\kappa=0,463$), was dem zweitschlechtesten Wert entspricht. Auch die mittelmäßige Übereinstimmung der einzelnen Beobachter*innen zu zwei Zeitpunkten ($\kappa=0,562$) war der drittschlechteste Wert im Vergleich. Diese recht neue Klassifikation wurde bereits auf ihre Reliabilität hin getestet (Kamphaus et al., 2015, Schneidmüller et al., 2011). Ein Vergleich mit diesen Studien findet sich im nächsten Kapitel.

Die AO-PCCF fand sich, alle Klassifikationssysteme betrachtend, im Mittelfeld wieder. Mit Werten von $\kappa=0,643$ (Intra-B-R) und $\kappa=0,495$ (Inter-B-R) war die Übereinstimmung wesentlich bzw. mittelmäßig. Während die Klassifikation im Normalfall alle Röhrenknochen miteinbezieht, ist bei dieser Studie lediglich die

Kategorisierung der Anzahl der Fragmente und der Zusatzcode für suprakondyläre Humerusfrakturen entscheidend. Hinsichtlich der durchschnittlichen Ergebnisse für die AO-PCCF gilt es zu bedenken, dass diese Klassifikation in der Klinik, in welcher die Beobachtungen stattfanden, die standardmäßig angewandte Klassifikation ist. Die Vorerfahrung bezüglich der Kategorisierung von Frakturen ist damit bei allen Beobachter*innen in einem Ausmaß gegeben, welches über die Erfahrung mit allen anderen Klassifikationen hinausgeht.

Die Von Laer-Klassifikation für suprakondylären Humerusfrakturen ist trotz hoher Komplexität und Anzahl an Kategorien insbesondere im Vergleich der Intra-B-R sehr gut. Sie erreichte mit $\kappa=0,816$ eine beinahe perfekte Übereinstimmung nach Landis und Koch. Auch die Inter-B-R war mit einer mittelmäßigen Übereinstimmung ($\kappa=0,564$) höher als der Median der Kappa-Werte der vorliegenden Studie. Sie definiert die Dislokation nach Anzahl und Art der betroffenen Ebenen. Auch wenn für die Klassifikation keine weiteren Reliabilitätsstudien vorliegen, wird diese bereits im deutschsprachigen Raum angewandt (Weinberg et al., 2020).

4.2. Vergleich der eigenen Daten mit anderen Studien

Bevor ein Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit anderen Studien zur Reliabilität von Klassifikationen der suprakondylären Humerusfraktur bei Kindern vorgenommen werden kann, muss nochmals auf die Schwierigkeit des direkten Vergleichs von Kappa-Werten hingewiesen werden.

Der Kappa-Koeffizient ist abhängig von verschiedenen Kriterien. Zum einen ist der Wert abhängig von der Studienpopulation. Nicht nur die Anzahl der Proband*innen und Beobachter*innen, sondern auch die Verteilung der Frakturgruppen innerhalb der Studienpopulation wirkt sich auf den Kappa-Koeffizienten aus. Eine ungleichmäßige Verteilung der Kategorien innerhalb einer Gruppe, beispielsweise viele Frakturen einer Kategorie und verschwindend wenige in den anderen Kategorien, kann zu anderen Ergebnissen führen als eine

gleichmäßige Verteilung auf alle Kategorien innerhalb der Gruppe. Außerdem kann die Qualität der Röntgenbilder, anhand derer die Klassifizierung vorgenommen wird, eine Festlegung auf eine Kategorie erleichtern oder erschweren. Darum sind Ergebnisse, die nicht anhand der gleichen oder einer gleichartig verteilten Studienpopulation durchgeführt wurden, nur unter Vorbehalten zu vergleichen. Auch die Beobachter*innen haben Einfluss auf die Ergebnisse der Kappa-Werte. Hierbei ist die Anzahl und die Erfahrung der Beobachtenden entscheidend. Die Erfahrung der Beobachter*innen im Beurteilen von Röntgenbildern und/oder im Anwenden des jeweiligen Klassifikationssystems kann einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Darum ist auch dieses Kriterium im Vergleich von Kappa-Koeffizienten unterschiedlicher Studien zu beachten. Weitere Details, die das Vorgehen und die Methoden betreffen, sind ebenfalls beim Vergleich der Studien zu beachten. Beispielsweise spielen ein Training vor der Sitzung oder die Absprache zwischen Beobachtern eine Rolle (Audigé et al., 2004a).

Letztlich ist dies eine Stärke der vorliegenden Studie. Durch die Klassifikation anhand der gleichen Studienpopulation, durch die gleichen Beobachter*innen und der qualifizierten Methoden können die Kappa-Werte tatsächlich verglichen werden.

Nicht für alle Klassifikationssysteme, die in dieser Arbeit untersucht wurden, liegen Reliabilitätsstudien anderer Autoren vor. Eine beachtliche Anzahl an Studien gibt es, die die Klassifikation nach Gartland auf ihre Reliabilität geprüft haben (Barton et al., 2001, Grazina et al., 2018, Heal et al., 2007, Leung et al., 2018, Mallo et al., 2010, Rocha et al., 2015, Teo et al., 2019). Auch für die Klassifikation nach Lagrange und Rigault wurden Reliabilitätsdaten veröffentlicht (de Gheldere et al., 2010, Grazina et al., 2018). Die Klassifikationen zur Beurteilung von Frakturen der langen Röhrenknochen bei Kindern, die AO – PCCF und die LiLa-Klassifikation, wurden in mehreren Studien untersucht (Lutz et al., 2011, Slongo et al., 2007a, Slongo et al., 2007b, Slongo et al., 2006, Slongo et al., 2007c, Rocha et al., 2015, Kamphaus et al., 2015, Schneidmüller et al., 2011).

Im Folgenden sollen darum die hier vorliegenden Ergebnisse dieser vier Klassifikationen mit den vorhandenen Studien verglichen werden. Dabei wird auch auf die Unterschiede der Methoden eingegangen.

4.2.1. Gartland

Der direkte Vergleich der Kappa-Koeffizienten ist vor allem bei der Gartland-Klassifikation eine Herausforderung. Es gibt mehrere Studien der letzten Jahre, die eine Untersuchung der Intrabeobachter- und Interbeobachter-Reliabilität vorgenommen haben. Diese unterscheiden sich in Größe und Verteilung der Studienpopulation und auch in der Anzahl an Beobachter*innen. Außerdem wurden teilweise unterschiedliche Versionen der Klassifikation verwendet. Manche untersuchten die ursprüngliche Klassifikation nach Gartland (Gartland, 1959), andere die modifizierte Klassifikation nach Wilkins (Wilkins and Beaty, 1996). Die Studien der letzten Jahre verwendeten die modifizierte Klassifikation von Leitch (Leitch et al., 2006), der eine weitere Kategorie IV einführte. In dieser Arbeit wurde eine modifizierte Version verwendet, die Houshian et al. (Houshian et al., 2001) für Studien zur suprakondylären Humerusfraktur bei Kindern heranzogen.

In Tabelle 7 wird ein Überblick über die vorliegenden Studien gegeben. Die Anzahl der Beobachter*innen und Patient*innen, sowie die verwendete Klassifikation sind dargestellt.

Tabelle 7: Vergleich Studien Gartland

Studie	Anzahl Beobachter *innen	Anzahl Patient *innen	Klassifikation	Kappa Intra-B-R	Kappa Inter-B-R
Mallo et al., 2010	4	75	A	0,723	0,521
Rocha et al., 2015	3	50	A	0,719 – 0,859	0,756
Barton et al., 2001	5	50	B	0,81 – 0,84	0,74
Heal et al., 2007	4	50	B	0,68 – 0,83	0,54
Grazina et al., 2018	3	35	B	0,78	0,55
Leung et al., 2018	5	200	C	0,777	0,475
Teo et al., 2019	21	60	C	0,796	0,679
<i>diese Arbeit</i>	3	42	D	0,558	0,467

A: Klassifikation nach Gartland (Gartland, 1959)

B: modifizierte Klassifikation nach Wilkins (Wilkins and Beaty, 1996)

C: modifizierte Klassifikation nach Leitch (Leitch et al., 2006)

D: modifizierte Klassifikation (Houshian et al., 2001)

Die Schwierigkeit beim Vergleich der Ergebnisse dieser Studien liegt vor allem in den verschiedenen Modifikationen, die für die Beobachtungen herangezogen wurden. Die zwei Studien (Mallo et al., 2010, Rocha et al., 2015), die die ursprünglich definierte Klassifikation beleuchten, sind vergleichbar in Anzahl der

Beobachter*innen und Anzahl der Patienten. Sie kommen zu ähnlichen Intrabeobachter-Ergebnissen im Bereich einer wesentlichen bis beinahe perfekten Übereinstimmung und beschreiben ähnliche Ergebnisse für die Interbeobachter-Reliabilität. Nur Mallo et al. geben hier eine mittelmäßige Übereinstimmung an.

Die viel verwendete Modifikation nach Wilkins wurde in drei Studien untersucht. Sie kommen insgesamt auf ähnliche Ergebnisse wie die zuvor genannten Studien. Auch hier ist die Inter-B-R entweder bei vergleichbaren Werten mit der Intra-B-R (wesentliche Übereinstimmung), oder für Intra-B-R bei einer mittelmäßigen Übereinstimmung.

Auch Leung et al. und Teo et al., die entweder eine größere Anzahl von Beobachter*innen oder Patient*innen in die Studie aufnahmen und zudem die Modifikation nach Leitch et al. verwendeten, kommen zu vergleichbaren Ergebnissen (wesentliche Übereinstimmung für die Intra-B-R und mittelmäßige Übereinstimmung für die Inter-B-R).

Diese Arbeit untersucht die Modifikation (Houshian et al., 2001) mit Unterscheidung von Kategorie IIIA und IIIB. Die Ergebnisse zeigen, wie auch andere Studien, eine schlechtere Übereinstimmung zwischen den Beobachter*innen (Inter-B-R) als die Intrabeobachter-Übereinstimmung. Die einzelnen Werte waren jedoch geringer. Die Intra-B-R ($\kappa=0,558$) und die Inter-B-R ($\kappa=0,467$) entsprachen jeweils einer mittelmäßigen Übereinstimmung. Hervorzuheben ist, dass die Ergebnisse dieser Studie in den direkten Vergleich zu anderen Klassifikationen genommen werden können. Die Gartland-Klassifikation schnitt dabei weniger gut ab. Sie war die Klassifikation mit den zweitschlechtesten Werten für die Intra- und die drittschlechteste Klassifikation für die Interbeobachter-Reliabilität im Vergleich mit den 11 anderen untersuchten Klassifikationssystemen.

Für die Gartland-Klassifikation zeigt sich eine mittelmäßige bis wesentliche Intra-B-R in mehreren Studien. Im Anbetracht der weitläufigen Verwendung unterstützt auch die vorliegende Arbeit die Diskussion, die Klassifikation zu überarbeiten, um so die Reproduzierbarkeit zu erhöhen und außerdem an den klinischen Nutzen

bezüglich einzuleitender Therapie anzupassen (Omid et al., 2008, Mohammed, 1995, Vaquero-Picado et al., 2018).

4.2.2. Lagrange und Rigault

Die Klassifikation nach Lagrange und Rigault ist im französischsprachigen Raum verbreitet und klinisch viel verwendet und zitiert. Daher sind auch in der Literatur bereits Reliabilitätsstudien zu finden. De Gheldere et al. (de Gheldere et al., 2010) bezieht sich auf eine größere Anzahl von Patien*innen und vergleicht die Reliabilität zwischen 5 Beobachter*innen, vergleichsweise gibt es 3 Beobachter*innen bei Grazina et al. (Grazina et al., 2018) und der eigenen Arbeit. Zusammenfassend sind die Daten in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Vergleich Studien Lagrange und Rigault

Studie	Anzahl Beobachter*innen	Anzahl Patient*innen	Kappa Intra-B-R	Kappa Inter-B-R
De Gheldere et al., 2010	5	100	0,76	0,69
Grazina et al., 2018	3	35	0,77	0,62
<i>diese Arbeit</i>	3	42	0,521	0,361

Beide Studien erzielen deutlich höhere Werte für Intra- und Inter-B-R als die eigene Arbeit. Nach Landis und Koch befinden sich alle Werte im Bereich der wesentlichen Übereinstimmung. In der vorliegenden Arbeit sind die Werte nicht nur im Vergleich mit den anderen Studien, sondern auch im Vergleich mit den anderen untersuchten Klassifikationen deutlich schlechter. Vor allem die

ausreichende Inter-B-R ($\kappa=0,361$) ist deutlich niedriger. Unter diesem Aspekt sollten weitere Reliabilitätsstudien durchgeführt werden, um den Nutzen für die klinische Verwendung zu optimieren.

4.2.3. AO-PCCF

Die AO-PCCF ist, genau wie die LiLa-Klassifikation, ein Klassifikationssystem für die Einteilung von Frakturen der langen Röhrenknochen. Dadurch können anhand der Klassifikation nicht nur der Humerus und suprakondyläre Frakturen des Humerus eingeteilt werden. Die Klassifikation wurde 2006 (Slongo et al., 2006) veröffentlicht und nach methodischen Standards entwickelt (Audigé et al., 2004b). Daher liegen von Anfang an Studien zur Reliabilität vor. In diesem Fall sind diese Vorstudien nicht direkt mit der hier vorliegenden Arbeit vergleichbar, da nicht nur speziell die suprakondyläre Humerusfraktur evaluiert wurde. Slongo et al. (2007b) beschreibt daher nicht die Klassifikation einschließlich des Zusatzcodes für suprakondyläre Humerusfrakturen, sondern lediglich die Einteilung des Schweregrades bei diaphysäre Frakturen von Röhrenknochen. Sie kommt zu einer mittelmäßigen Inter-B-R ($\kappa=0,52$).

Eine Modifikation der AO-PCCF für suprakondyläre Humerusfrakturen wurde von Lutz et al. entwickelt, dabei wurde von 25 Beobachter*innen bei 154 Patient*innen eine wesentliche Inter-B-R ($\kappa=0,61$) erhoben (Lutz et al., 2011). Dieses Ergebnis ist besser als das der vorliegenden Arbeit ($\kappa=0,495$).

Rocha et al. vergleichen die AO -PCCF mit der Gartland-Klassifikation (Rocha et al., 2015). Die Reliabilitätswerte liegen deutlich höher als diejenigen dieser Arbeit, im Intraobserver-Vergleich wurde sogar eine vollkommene Übereinstimmung erreicht. Rocha et al. vergleichen die Reliabilität mit jener der Gartland-Klassifikation und beschreiben für beide sehr ähnliche Werte. Auch dies lässt sich durch die Ergebnisse dieser Arbeit nicht bestätigen. In dieser Studie schnitt die Gartland-Klassifikation deutlich schlechter ab als die AO-PCCF.

Einen Überblick über die Ergebnisse gibt Tabelle 9.

Tabelle 9: Vergleich Studien AO – PCCF

Studie	Anzahl Beobachter *innen	Anzahl Patient *innen	Kappa Intra-B-R	Kappa Inter-B-R
Slongo et al, 2007b ¹	70	275		0,52
Lutz et al., 2011 ²	25	154		0,61
Rocha et al., 2015	3	50	0,767 - 1	0,766
<i>diese Arbeit</i>	3	42	0,643	0,495

¹Multicenter-Study, Kappa Schweregrad für diaphysäre Frakturen

²Multicenter Study, Kappa Zusatzcode für suprakondyläre Humerusfrakturen

Die AO-PCCF als Standard-Klassifikation in vielen Kliniken des deutschsprachigen Raumes (Weinberg et al., 2020) sollte insbesondere nach den hier erreichten durchschnittlichen Ergebnissen weiterer Prüfung unterzogen werden. Da im klinischen Kontext die Therapieentscheidung auch anhand der Klassifikation getroffen wird, diese aber nur eingeschränkt reproduzierbar ist, sollte über eine gründlichere Schulung der Ärzt*innen oder weitere Anpassung des Klassifikationssystems nachgedacht werden.

4.2.4. LiLa

Die Lila-Klassifikation wurde bei Entwicklung bereits auf ihre Reliabilität geprüft (Schneidmüller et al., 2011), im Jahr 2015 erschien erneut eine Intra- und Inter-Reliabilitätsstudie (Kamphaus et al., 2015). Beide Studien beziehen sich allerdings auf die gesamte Klassifikation, entsprechend auf alle langen Röhrenknochen und deren Frakturen. Die Ergebnisse differenzieren nicht

zwischen den einzelnen Frakturformen oder Knochen. Aus diesem Grund sind die Kappa-Werte nicht direkt vergleichbar. Zur Orientierung sind sie in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Vergleich Studien LiLa-Klassifikation

Studie	Anzahl Beobachter *innen	Anzahl Patient *innen	Kappa Intra-B-R	Kappa Inter-B-R
Schneidmüller et al., 2011	8	185	0,86 – 0,99	0,71
Kamphaus et al., 2015	4	408	0,53 – 0,58	0,55
<i>diese Arbeit</i>	3	42	0,562	0,463

Schneidmüller et al. (Schneidmüller et al., 2011) untersuchten die Reliabilität der Klassifikation und modifizierten sie entsprechend der Ergebnisse schrittweise. Die in der Tabelle dargestellten Werte beziehen sich auf die letzte Anpassung in diesem Prozess. Kamphaus et al. (Kamphaus et al., 2015) untersuchten die Reliabilität im Hinblick auf die klinische Verwendung der Klassifikation und kommen zu ähnlichen Ergebnissen wie auch diese Arbeit, jedoch bei einer größeren Studienpopulation. Nach Landis und Koch befinden sich diese Werte im Bereich der mittelmäßigen Übereinstimmung. Die LiLa-Klassifikation soll eine Vereinfachung der AO-PCCF darstellen, um eine bessere Reproduzierbarkeit zu erreichen (Schneidmüller et al., 2011). Weder in der vorliegenden noch in vorhergehenden Arbeiten konnte dies bestätigt werden. Weitere Studien, um die beiden Klassifikationen direkt zu vergleichen, sind nötig.

4.2.5. Andere frakturspezifische Klassifikationen

Nicht nur für die suprakondyläre Humerusfraktur, sondern auch für andere spezifische Frakturen gibt es entsprechende etablierte Frakturklassifikationssysteme. Auch diese wurden hinsichtlich ihrer Reliabilität für den klinischen Gebrauch überprüft. Um die Werte der Kappa-Koeffizienten in einen größeren Kontext zu setzen, sollen im Folgenden die Untersuchungen anderer Klassifikationssysteme zum Vergleich herangezogen werden. So lässt sich besser einschätzen, wie reliabel andere Frakturklassifikationen sind.

Exemplarisch sollen hierfür zwei sehr häufig verwendete Klassifikationssysteme herangezogen werden. Das erste ist die gut dokumentierte Neer-Klassifikation für Frakturen des proximalen Humerus (Neer, 1970). Nach Modifikation durch Sidor et al. (Sidor et al., 1993) gibt es 16 unterschiedliche Typen. Sie wird neben der AO-Klassifikation für Frakturen der langen Röhrenknochen als spezifische Kategorisierung angewandt (Bernstein et al., 1996).

Die folgenden Kappa-Werte in Tabelle 11 beziehen sich auf Studien, in welchen Röntgenbilder in zwei Sitzungen von mehreren Beobachter*innen evaluiert wurden. Die Studie von Bernstein et al. evaluierte zusätzlich CT-Bilder.

Tabelle 11: Reliabilität Neer-Klassifikation

Studie	Kappa Intra-B-R	Kappa Inter-B-R
(Bernstein et al., 1996)	0,64	0,52
(Sidor et al., 1993)	0,66	0,37 – 0,62
(Siebenrock and Gerber, 1993)	0,60	0,40
(Sjödén et al., 1997)	0,20 – 0,85	0,43

Die Intra-B-R wird mit einer mittelmäßigen bis wesentlichen Übereinstimmung angegeben. Die Inter-B-R schneidet, wie zu erwarten, schlechter ab. Die Ergebnisse waren ausreichend ($\kappa=0,37$) bis wesentlich ($\kappa=0,62$). Alle Studien beschreiben eine mittelmäßige Übereinstimmung im unteren Bereich. Die durchschnittlichen Interbeobachter-Kappa-Werte dieser Arbeit für die Klassifikationen suprakondylärer Humerusfrakturen sind vergleichbar oder höher. Fünf der Klassifikationen erreichen Werte, die ebenfalls einer niedrigen mittelmäßigen Übereinstimmung ($\kappa < 0,5$) entsprechen.

Eine weitere im klinischen Gebrauch etablierte Klassifikation ist die Lauge-Hansen-Klassifikation für Knöchelfrakturen (Lauge-Hansen, 1950). In der Literatur sind vor allem Studien zur Interbeobachter-Reliabilität zu finden, siehe Tabelle 12 (Fonseca et al., 2018, Verhage et al., 2015).

Tabelle 12: Reliabilität Lauge-Hansen-Klassifikation

Studie	Kappa Intra-B-R	Kappa Inter-B-R
(Yin et al., 2015)	0,398	0,402
(Fonseca et al., 2018)		0,32
(Verhage et al., 2015)		0,47

Die Ergebnisse der Studien zur Reliabilität der Lauge-Hansen-Klassifikation beschreiben eine ausreichende oder niedrige mittelmäßige Übereinstimmung. Auch wenn diese Klassifikation im klinischen Alltag häufig angewandt wird, ist nicht zuletzt die niedrige Reliabilität in verschiedenen Studien Grund für Diskussionen, Knöchelfrakturen in Zukunft anhand der klinisch bedeutsameren AO-Klassifikation einzuordnen (Tartaglione et al., 2015).

Diese Arbeit über die Reliabilität von Klassifikationen bei suprakondylären Humerusfrakturen zeigte überwiegend Reliabilitätswerte, die im Vergleich zu anderen Reliabilitätsstudien etablierter Frakturklassifikationen höher sind.

4.3. Bedeutung für die klinische Verwendung der Klassifikationssysteme und Ausblick

Die vorliegende Studie gibt einen wichtigen Überblick über die bestehenden Klassifikationen von suprakondylären Humerusfrakturen im Wachstumsalter. Um die klinische Bedeutung der Klassifikationen zu vergleichen und zu bewerten, sind allerdings weitere Studien nötig.

Zu bedenken ist zudem, dass es außer den in dieser Arbeit vorgestellten Klassifikationen der suprakondylären Humerusfraktur bei Kindern, Vorschläge für weitergehende Modifikationen gibt. Beispielsweise gibt es für die Gartland-

Klassifikation immer wieder neue Modifikation im Sinne einer Subtypen-Klassifizierung (Bahk et al., 2008, Tantray et al., 2018). Diese neuen Untergliederungen sollten in künftigen Studien aufgenommen werden.

Die Messung der Reliabilität ist auch bei künftigen Studien ein grundlegendes Kriterium. Allerdings ist der Kappa-Koeffizient in seiner Aussagekraft eingeschränkt und Limitationen unterworfen. Dies bezieht sich auch auf die Interpretation der Werte nach Landis und Koch oder anderen Interpretationssystemen (Audigé et al., 2004a). Die Kappa-Werte müssen relativ betrachtet werden und die Interpretation nicht nur auf die Zahlen bezogen werden. Diese vorliegende Studie bietet erstmals die Möglichkeit, die Kappa-Werte und damit Reproduzierbarkeit der Kategorien verschiedener Systeme zu vergleichen. Damit wird eine Interpretation ermöglicht.

Für die weiterführende Bewertung in der Reliabilität verschiedener Klassifikationssysteme muss im nächsten Schritt die Festlegung eines Goldstandards etabliert werden, anhand dessen die Ergebnisse beurteilt werden können (Audigé et al., 2004b, Audigé et al., 2004a). Die Reliabilität wurde in der vorliegenden Studie ausschließlich anhand von Röntgenbildern erhoben. Dies sollte durch Einschluss von CT-Bildern oder 3D-Modelle ergänzt werden (Brunner et al., 2009).

Die Frakturklassifikationssysteme müssen dann klinisch auf ihre Konstruktvalidität geprüft werden. Damit muss der Zusammenhang zwischen Klassifizierung, therapeutischem Vorgehen und dem Patienten-Outcome dargestellt werden, um zu einer Aussage über einen sinnvollen klinischen Gebrauch zu kommen. Diese Art von Studien sollten im Rahmen einer Multicenter-Studie mit entsprechend großer Anzahl an Patient*innen und behandelnden Ärzt*innen durchgeführt werden (Audigé et al., 2004a, Audigé et al., 2005).

Hinsichtlich des Erfolges der Therapiestrategie nach Therapieplanung anhand der Kategorisierung der Frakturen mithilfe einer Klassifikation werden

prospektive Studien nötig sein. Wichtig scheint hier vor allem der Zusammenhang zwischen Klassifizierung von unvollständig dislozierten Frakturen und dem hieraus abgeleiteten Therapieschema. Diese Frakturen können konservativ oder mit verschiedenen operativen Methoden behandelt werden (Teo et al., 2020, Ernat et al., 2017). Der Einfluss der eingeleiteten Therapie auf den weiteren Heilungsverlauf muss ebenfalls betrachtet werden. Vor allem bei Kindern im Wachstumsalter ist die Beobachtung von spontanen Korrekturen und Fehlstellungen im fortlaufenden Wachstum einzubeziehen (von Laer et al., 2000).

Wie auch bei anderen frakturspezifischen Klassifikationen gezeigt werden konnte, haben übergeordnete Klassifikationen zunehmend mehr Bedeutung (Tartaglione et al., 2015). Obwohl hinsichtlich der Reliabilität bei übergeordneten Frakturklassifikationssystemen wie der AO oder AO-PCCF-Klassifikation für lange Röhrenknochen ähnliche Ergebnisse erzielt werden konnten wie für spezifische Klassifikationssysteme wie beispielsweise die Gartland- oder Neer-Klassifikation (Carofino and Leopold, 2013, Rocha et al., 2015), ist der Einbezug der Durchführbarkeit im klinischen Setting unerlässlich. Die adäquate Kenntnis einer eigenen Klassifikation für jede Art von Fraktur ist dabei unwahrscheinlich. Die Studienbedingungen mit einem Training für das Erlernen und korrekte Anwenden einer begrenzten Anzahl von Klassifikationen spiegelt nicht den klinischen Alltag wider.

Für eine künftige große Studie wie bereits beschrieben, könnten erneut alle Klassifikationssysteme betrachtet werden. Allerdings kann die vorliegende Arbeit auch Grundlage für eine Auswahl an weiter zu entwickelnden Klassifikationen sein.

Diese Arbeit konnte zeigen, dass einfache Klassifikationen mit drei Kategorien, wie beispielsweise die Lubinus- und Baumann-Klassifikation eine gute Reproduzierbarkeit ergeben. Es bleibt allerdings unklar, welche Therapie auf die

Klassifizierung der Kategorie 2 (unvollständige Dislokation) folgen soll. In anderen Klassifikationssystemen ist daher diese zweite Kategorie weiter differenziert. Folgt diese allerdings keiner sehr eindeutigen und klaren Definition, ist die Reliabilität schlechter (beispielsweise bei den Klassifikationen nach Lagrange und Rigault, Gartland und Pierre Chrestian).

Eine eindeutige Definition dieser Zwischenstufe scheint ein Schlüssel zu einer höheren Reliabilität zu sein. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze. So definiert Gehling und Gotzen beispielweise eine Dislokation mit Hilfe der Gradangabe von kleiner oder größer 20° und leitet daraus die Kategorie ab. Auch die Klassifikation nach Von Laer beinhaltet eine genaue Beschreibung der Gruppen. Die Anzahl und die präzise Nennung der Ebenen der Frakturfragmente zueinander führt zur Optimierung der Klassifizierung.

Diese Beschreibungen der Dislokation könnten in Verbindung mit einem übergeordnetem Frakturklassifikationssystem nachverfolgt werden. Zum Beispiel die AO-PCCF, als etablierte Methode, könnte hierfür modifiziert und dabei der Zusatzcode für suprakondyläre Humerusfrakturen überarbeitet werden. Bisher beschreibt dieser Code inkomplette (gering/posterior oder anterior) und komplette (Kontakt oder kein Kontakt) Dislokationen. Dies scheint zu ungenau und damit nur mäßig reproduzierbar, was diese vorliegende Studie und auch andere Studien belegen (Lutz et al., 2011).

Mehrere so modifizierte Versionen, sowie die bereits etablierten und häufig angewandten Klassifikationen könnten in einer übergreifenden Studie in einem ähnlichen Setting wie die vorliegende Studie untersucht werden. Mit einer Multicenterstudie, die die genannten Kriterien erfüllt und die Systeme bezüglich Reliabilität, Genauigkeit, Konstruktvalidität und prospektiven Aussagen untersucht, können neue Erkenntnisse gewonnen werden. So kann man zu einer abschließenden Beurteilung bei der Klassifikation von suprakondylären Humerusfrakturen im Wachstumsalter kommen und eine Aussage darüber treffen, welche der Klassifikationen verworfen oder beibehalten bzw. durch Überarbeitung neu etabliert werden sollten.

5. Zusammenfassung

Die suprakondyläre Humerusfraktur tritt gehäuft bei Kindern im Wachstumsalter auf (Cheng et al., 1999, Houshian et al., 2001). Es gibt verschiedene Frakturklassifikationssysteme, anhand derer die individuelle Fraktur beschrieben und eingeschätzt werden kann. Entsprechend dieser Einteilung kann anschließend eine Therapie eingeleitet werden (Martin and Marsh, 1997). Um die Qualität von Frakturklassifikationssystemen zu sichern, müssen diese auf ihre Reliabilität und Validität hin überprüft werden (Audigé et al., 2005, Garbuz et al., 2002).

In dieser Arbeit wurden 42 Röntgenbilder von suprakondylären Humerusfrakturen von Kindern von drei Beobachter*innen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in 12 verschiedenen Frakturklassifikationssystemen eingeteilt. Die Intra- und Interbeobachter-Reliabilität wurde anschließend anhand des Kappa-Koeffizienten gemessen und nach Landis und Koch interpretiert.

Die Ergebnisse zeigten eine mittelmäßige und wesentliche Intrabeobachter-Reliabilität bei einem Großteil der Klassifikationssysteme. Lediglich die Einteilung nach von Laer zeigte eine beinahe perfekte Übereinstimmung. Die Untersuchung der Interbeobachter-Reliabilität zeigte insgesamt eine geringere Übereinstimmung. Klassifikationssysteme erreichten eine ausreichende, meist mittelmäßige Übereinstimmung. Wenige der Systeme (Baumann, Gehling und Gotzen, sowie Pirone) zeigten eine wesentliche Übereinstimmung. Diese waren einfach strukturierte Klassifikationssysteme mit einer Unterscheidung von drei Gruppen. Im Vergleich mit anderen Studien zeigte diese Arbeit gleichwertige bis höhere Übereinstimmung im Intra- und Interbeobachtervergleich.

Um ein differenziertes und trotzdem reliables Frakturklassifikationssystem für die suprakondyläre Humerusfraktur im Kindesalter zu etablieren, bietet sich eine Modifikation von Klassifikationen für Frakturen der langen Röhrenknochen an. Beispielsweise kann hier die von Laer-Klassifikation eine Grundlage bilden. Weitere Studien zur Validität in Multicenter-Studien werden hierfür nötig sein.

6. Literaturverzeichnis

- APARICIO MARTINEZ, J. L., PINO ALMERO, L., CIBRIAN ORTIZ DE ANDA, R. M., GUILLEN BOTAYA, E., GARCIA MONTOLIO, M. & MINGUEZ REY, M. F. 2019. Epidemiological study on supracondylar fractures of distal humerus in pediatric patients. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol*, 63, 394-399.
- ASMUSSEN, M. 2014. Spezielle Aspekte der Skelettradiologie bei Kindern. In: FLECHTENMACHER, J. & SABO, D. (eds.) *Praktische Röntgendiagnostik Orthopädie und Unfallchirurgie*. 1. Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- AUDIGÉ, L., BHANDARI, M., HANSON, B. & KELLAM, J. 2005. A Concept for the Validation of Fracture Classifications. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 19, 404-409.
- AUDIGÉ, L., BHANDARI, M. & KELLAM, J. 2004a. How reliable are reliability studies of fracture classifications? A systematic review of their methodologies. *Acta Orthop Scand*, 75, 184-94.
- AUDIGÉ, L., HUNTER, J., WEINBERG, A., MAGIDSON, J. & SLONGO, T. 2004b. Development and Evaluation Process of a Pediatric Long-Bone Fracture Classification Proposal. *European Journal of Trauma*, 30.
- AUDIGÉ, L., SLONGO, T., LUTZ, N., BLUMENTHAL, A. & JOERIS, A. 2017. The AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF). *Acta Orthop*, 88, 133-139.
- BAHK, M. S., SRIKUMARAN, U., AIN, M. C., ERKULA, G., LEET, A. I., SARGENT, M. C. & SPONSELLER, P. D. 2008. Patterns of pediatric supracondylar humerus fractures. *J Pediatr Orthop*, 28, 493-9.
- BAIERLEIN, S. A. & WISTOP, A. 2011. Grundlagen. In: BAIERLEIN, S. A. (ed.) *Frakturklassifikationen*. 1. Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- BARTON, K. L., KAMINSKY, C. K., GREEN, D. W., SHEAN, C. J., KAUTZ, S. M. & SKAGGS, D. L. 2001. Reliability of a modified Gartland classification of supracondylar humerus fractures. *J Pediatr Orthop*, 21, 27-30.
- BATTLE, J., CARMICHAEL, K. & D. 2007. Incidence of Pin Track Infections in Children's Fractures Treated With Kirschner Wire Fixation. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 27, 154-157.
- BAUMANN, E. 1960. Zur Behandlung der Brüche des distalen Humerusendes beim Kind.
- BAUMANN, E. 1965. *Ellbogen*, Stuttgart, Thieme.
- BERNSTEIN, J., ADLER, L. M., BLANK, J. E., DALSEY, R. M., WILLIAMS, G. R. & IANNOTTI, J. P. 1996. Evaluation of the Neer system of classification of proximal humeral fractures with computerized tomographic scans and plain radiographs. *JBJS*, 78, 1371-5.

- BLOUNT, W. P. 1957. *Knochenbrüche bei Kindern*, Thieme.
- BRAUER, C. A., LEE, B. M., BAE, D. S., WATERS, P. M. & KOCHER, M. S. 2007. A systematic review of medial and lateral entry pinning versus lateral entry pinning for supracondylar fractures of the humerus. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 27, 181-186.
- BRUNNER, A., HONIGMANN, P., TREUMANN, T. & BABST, R. 2009. The impact of stereo-visualisation of three-dimensional CT datasets on the inter- and intraobserver reliability of the AO/OTA and Neer classifications in the assessment of fractures of the proximal humerus. *J Bone Joint Surg Br*, 91, 766-771.
- BUHR, A. J. & COOKE, A. M. 1959. Fracture patterns. *Lancet*, 1, 531-6.
- BURSTEIN, A. H. 1993. Fracture classification systems: do they work and are they useful? *JBJS*, 75, 1743-1744.
- CAROFINO, B. C. & LEOPOLD, S. S. 2013. Classifications in Brief: The Neer Classification for Proximal Humerus Fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research®*, 471, 39-43.
- CHAPCHAL, G. 1979. Fractures in children (9. International Symposium on topical problems in orthopedic surgery, Lucerne/Switzerland).
- CHENG, J. C., LAM, T. P. & MAFFULLI, N. 2001. Epidemiological features of supracondylar fractures of the humerus in Chinese children. *J Pediatr Orthop B*, 10, 63-7.
- CHENG, J. C. Y., NG, B. K. W., YING, S. Y. & LAM, P. K. W. 1999. A 10-Year Study of the Changes in the Pattern and Treatment of 6,493 Fractures. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 19, 344-350.
- CHRESTIAN, P. 1989. *Kinderfrakturen*, Bern, Hans Huber.
- COHEN, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20, 37-46.
- DE BOECK, H. 1996. Radiology of the elbow in children. *Acta orthopaedica Belgica*, 62, 34-40.
- DE GHELDERE, A., LEGNAME, M., LEYDER, M., MEZZADRI, G., DOCQUIER, P. L. & LASCOMBES, P. 2010. Reliability of the Lagrange and Rigault classification system of supracondylar humerus extension fractures in children. *Orthop Traumatol Surg Res*, 96, 652-5.
- ERNAT, J., HO, C., WIMBERLY, R. L., JO, C. & RICCIO, A. I. 2017. Fracture Classification Does Not Predict Functional Outcomes in Supracondylar Humerus Fractures: A Prospective Study. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 37, e233-e237.
- FARNSWORTH, C. L., SILVA, P. D. & MUBARAK, S. J. 1998. Etiology of supracondylar humerus fractures. *J Pediatr Orthop*, 18, 38-42.

- FELSENREICH, F. 1930. Kindliche suprakondyläre Humerusfrakturen und posttraumatische Deformitäten des Ellenbogengelenks.
- FERNANDEZ, F. F. & EBERHARDT, O. 2012. Suprakondyläre Humerusfraktur bei Kindern. *Trauma und Berufskrankheit*, 14, 379-384.
- FONSECA, L. L. D., NUNES, I. G., NOGUEIRA, R. R., MARTINS, G. E. V., MESENCIO, A. C. & KOBATA, S. I. 2018. Reproducibility of the Lauge-Hansen, Danis-Weber, and AO classifications for ankle fractures. *Revista brasileira de ortopedia*, 53, 101-106.
- GARBUZ, D. S., MASRI, B. A., ESDAILE, J. & DUNCAN, C. P. 2002. Classification systems in orthopaedics. *J Am Acad Orthop Surg*, 10, 290-7.
- GARTLAND, J. J. 1959. Management of supracondylar fractures of the humerus in children. *Surg Gynecol Obstet*, 109, 145-54.
- GEHLING, H., GOTZEN, L., GIANNADAKIS, K. & HESSMANN, M. 1995. [Treatment and outcome of supracondylar humeral fractures in childhood]. *Unfallchirurg*, 98, 93-7.
- GOSENS, T. & BONGERS, K. J. 2003. Neurovascular complications and functional outcome in displaced supracondylar fractures of the humerus in children. *Injury*, 34, 267-273.
- GRAZINA, R., OLIVEIRA, M., MARINHAS, J., FERREIRA, A., COSTA, A., RODRIGUES, D. & SANTOS, M. 2018. Classification of Pediatric Supracondylar Fractures: Comparison between the Gartland and the Lagrange & Rigault Classifications. *Revista Iberoamericana de Cirugía de la Mano*, 46, 113-116.
- HASLER, C.-C. & VON LAER, L. 2001. Prevention of growth disturbances after fractures of the lateral humeral condyle in children. *Journal of pediatric orthopedics. Part B*, 10, 123-130.
- HEAL, J., BOULD, M., LIVINGSTONE, J., BLEWITT, N. & BLOM, A. W. 2007. Reproducibility of the Gartland classification for supracondylar humeral fractures in children. *J Orthop Surg (Hong Kong)*, 15, 12-4.
- HENRIKSON, B. 1966. Supracondylar fracture of the humerus in children. A late review of end-results with special reference to the cause of deformity, disability and complications. *Acta chirurgica Scandinavica. Supplementum*, 369, 1-72.
- HOUSHIAN, S., MEHDI, B. & LARSEN, M. S. 2001. The epidemiology of elbow fracture in children: analysis of 355 fractures, with special reference to supracondylar humerus fractures. *J Orthop Sci*, 6, 312-5.
- JOERIS, A., LUTZ, N., BLUMENTHAL, A., SLONGO, T. & AUDIGE, L. 2017a. The AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF). *Acta Orthop*, 88, 129-132.

- JOERIS, A., LUTZ, N., BLUMENTHAL, A., SLONGO, T. & AUDIGE, L. 2017b. The AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF). *Acta Orthop*, 88, 123-128.
- JOERIS, A., LUTZ, N., WICKI, B., SLONGO, T. & AUDIGE, L. 2014. An epidemiological evaluation of pediatric long bone fractures - a retrospective cohort study of 2716 patients from two Swiss tertiary pediatric hospitals. *BMC Pediatr*, 14, 314.
- KAISER, M. M., KAMPHAUS, A., MASSALME, E. & WESSEL, L. M. 2008. [Percutaneous closed pin fixation of supracondylar fractures of the distal humerus in children]. *Oper Orthop Traumatol*, 20, 297-309.
- KAMARA, A., JI, X., LIU, T., ZHAN, Y., LI, J. & WANG, E. 2019. A comparative biomechanical study on different fixation techniques in the management of transverse metaphyseal-diaphyseal junction fractures of the distal humerus in children. *International orthopaedics*, 43, 411-416.
- KAMPHAUS, A., RAPP, M., WESSEL, L. M., BUCHHOLZ, M., MASSALME, E., SCHNEIDMULLER, D., ROEDER, C. & KAISER, M. M. 2015. [LiLa classification for paediatric long bone fractures. Intraobserver and interobserver reliability]. *Unfallchirurg*, 118, 326-35.
- KOCHER, T. 1896. Beiträge zur Kenntnis einiger praktisch wichtiger Frakturformen.
 . Basel: Sallman.
- LAGRANGE, J. & RIGAULT, P. 1962. Les fractures de l'extrémité inférieure de l'humérus chez l'enfant.
- LANDIN, L. A. 1983. Fracture Patterns in Children. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 54, 3-109.
- LANDIS, J. R. & KOCH, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-74.
- LAUGE-HANSEN, N. 1950. Fractures of the ankle: II. Combined experimental-surgical and experimental-roentgenologic investigations. *Archives of surgery*, 60, 957-985.
- LEITCH, K. K., KAY, R. M., FEMINO, J. D., TOLO, V. T., STORER, S. K. & SKAGGS, D. L. 2006. Treatment of Multidirectionally Unstable Supracondylar Humeral Fractures in Children: A Modified Gartland Type-IV Fracture. *JBJS*, 88, 980-985.
- LEUNG, S., PARYAVI, E., HERMAN, M. J., SPONSELLER, P. D. & ABZUG, J. M. 2018. Does the Modified Gartland Classification Clarify Decision Making? *J Pediatr Orthop*, 38, 22-26.
- LI, J., FU, D., YU, C., WANG, S., ZE, R. & TANG, X. 2017. Surgical management of delayed irreducible Gartland III supracondylar fractures in children: open reduction and internal fixation versus external fixation. *Journal of shoulder and elbow surgery*, 26, 299-304.

- LUBINUS, H. 1924. Über den Entstehungsmechanismus und die Therapie der suprakondylären Humerusfrakturen. *Dtsch Z Chir*, 186, 289-98.
- LUTZ, N., AUDIGE, L., SCHMITTENBECHER, P., CLAVERT, J. M., FRICK, S. & SLONGO, T. 2011. Diagnostic algorithm for a validated displacement grading of pediatric supracondylar fractures. *J Pediatr Orthop*, 31, 117-23.
- MAHAN, S. T., MAY, C. D. & KOCHER, M. S. 2007. Operative management of displaced flexion supracondylar humerus fractures in children. *J Pediatr Orthop*, 27, 551-6.
- MALLO, G., STANAT, S. J. & GAFFNEY, J. 2010. Use of the Gartland classification system for treatment of pediatric supracondylar humerus fractures. *Orthopedics*, 33, 19.
- MARTIN, J. S. & MARSH, J. L. 1997. Current classification of fractures. Rationale and utility. *Radiol Clin North Am*, 35, 491-506.
- MARZI, I. 2016. Kindertraumatologie 3. Auflage ed. Berlin, Heidelberg: Springer.
- MATUSSEK, J. 2013. Kindertraumatologie. In: MATUSSEK, J. (ed.) *Kinderorthopädie und Kindertraumatologie*. Berlin: Springer.
- MOHAMMED 1995. Supracondylar fractures of the distal humerus in children.
- MÜLLER, M. E., NAZARIAN, S., KOCH, P. & SCHATZKER, J. 2012. *The comprehensive classification of fractures of long bones*, Springer Science & Business Media.
- NEER, C. S. 1970. Displaced proximal humeral fractures: Part II. Treatment of three-part and four-part displacement. *JBJS*, 52, 1090-1103.
- OMID, R., CHOI, P. D. & SKAGGS, D. L. 2008. Supracondylar Humeral Fractures in Children. *JBJS*, 90, 1121-1132.
- OTSUKA, N. Y. & KASSER, J. R. 1997. Supracondylar Fractures of the Humerus in Children. *JAAOS - Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 5, 19-26.
- PIRONE, A. M., GRAHAM, H. K. & KRAJBICH, J. I. 1988. Management of displaced extension-type supracondylar fractures of the humerus in children. *J Bone Joint Surg Am*, 70, 641-50.
- PLATZER, W. 2009. Obere Extremität. In: PLATZER, W. (ed.) *Taschenatlas Anatomie - Bewegungsapparat*. 10. Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- ROCHA, I. T. S., FARIA, A. D. S., FONTOURA FILHO, C. & ROCHA, M. A. 2015. Reproducibility of the AO/ASIF and Gartland classifications for supracondylar fractures of the humerus in children. *Revista brasileira de ortopedia*, 50, 266-269.
- ROGERS, L. F., MALAVE JR, S., WHITE, H. & TACHDJIAN, M. O. 1978. Plastic bowing, torus and greenstick supracondylar fractures of the humerus:

- radiographic clues to obscure fractures of the elbow in children. *Radiology*, 128, 145-150.
- SCHÄFFER, K., BÖHM, R. & DIETZ, H. G. 2007. Die elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN) der suprakondylären Humerusfraktur im Kindesalter. *Der Unfallchirurg*, 110, 852-858.
- SCHICKEDANZ, H., MAAG, G. & SCHURER, E. 1981. Suprakondyläre Humerusfraktur bei Kindern. *Beitr. Orthop Traumatol*, Band 28, 12-8.
- SCHNEIDMÜLLER, D., RODER, C., KRAUS, R., MARZI, I., KAISER, M., DIETRICH, D. & VON LAER, L. 2011. Development and validation of a paediatric long-bone fracture classification. A prospective multicentre study in 13 European paediatric trauma centres. *BMC Musculoskeletal Disord*, 12, 89.
- SCHOFER, M., JUNG, W., HUNGER, N. & KORTMANN, H.-R. 2003. Kindliche suprakondyläre Oberarmfrakturen. *Trauma und Berufskrankheit*, 5, 6-12.
- SHRADER, M. W. 2008. Pediatric supracondylar fractures and pediatric physeal elbow fractures. *Orthopedic Clinics of North America*, 39, 163-171.
- SIDOR, M. L., ZUCKERMAN, J. D., LYON, T., KOVAL, K., CUOMO, F. & SCHOENBERG, N. 1993. The Neer classification system for proximal humeral fractures. An assessment of interobserver reliability and intraobserver reproducibility. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 75, 1745-1750.
- SIEBENROCK, K. A. & GERBER, C. 1993. The reproducibility of classification of fractures of the proximal end of the humerus. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 75, 1751-1755.
- SJÖDÉN, G. O., MOVIN, T., GÜNTNER, P., ASPELIN, P., AHRENGART, L., ERSMARK, H. & SPERBER, A. 1997. Poor reproducibility of classification of proximal humeral fractures: additional CT of minor value. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 68, 239-242.
- SKAGGS, D. L. & FLYNN, J. M. 2010. Supracondylar Fractures Of The Distal Humerus. In: BEATY, J. H. & KASSER, J. R. (eds.) *Rockwood and Wilkins' Fractures in children*. Philadelphia: Lippincott-Raven.
- SLONGO, T., AUDIGE, L., CLAVERT, J. M., LUTZ, N., FRICK, S. & HUNTER, J. 2007a. The AO comprehensive classification of pediatric long-bone fractures: a web-based multicenter agreement study. *J Pediatr Orthop*, 27, 171-80.
- SLONGO, T., AUDIGE, L., LUTZ, N., FRICK, S., SCHMITTENBECHER, P., HUNTER, J. & CLAVERT, J. M. 2007b. Documentation of fracture severity with the AO classification of pediatric long-bone fractures. *Acta Orthop*, 78, 247-53.
- SLONGO, T., AUDIGE, L., SCHLICKWEI, W., CLAVERT, J. M., HUNTER, J. & INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR PEDIATRIC, T. 2006.

Development and validation of the AO pediatric comprehensive classification of long bone fractures by the Pediatric Expert Group of the AO Foundation in collaboration with AO Clinical Investigation and Documentation and the International Association for Pediatric Traumatology. *J Pediatr Orthop*, 26, 43-9.

- SLONGO, T. & BAIERLEIN, S. A. 2011. Frakturen im Kindes- und Jugendalter. In: BAIERLEIN, S. A. (ed.) *Frakturklassifikationen*. 1. Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- SLONGO, T., SCHAERLI, A., KOCH, P. & BUEHLER, M. 1995. Klassifikation und Dokumentation der Frakturen im Kindesalter—Pilotstudie der internationalen Arbeitsgemeinschaft für Kindertraumatologie. *Zentralbl Kinderchir*, 2, 157-163.
- SLONGO, T. F., AUDIGE, L. & GROUP, A. O. P. C. 2007c. Fracture and dislocation classification compendium for children: the AO pediatric comprehensive classification of long bone fractures (PCCF). *J Orthop Trauma*, 21, S135-60.
- SPANEL-BOROWSKI, K. & MAYERHOFER, A. 2020. Das Gewebe. In: AUMÜLLER, G., AUST, G., CONRAD, A., ENGELE, J., KIRSCH, J., MAIO, G., MAYERHOFER, A., MENSE, S., REIßIG, D., SALVETTER, J., SCHMIDT, W., SCHMITZ, F., SCHULTE, E., SPANEL-BOROWSKI, K., WENNEMUTH, G., WOLFF, W. & WURZINGER, L. J. (eds.) *Duale Reihe Anatomie*. 5., korrigierte Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- TAEGER, G. & NAST-KOLB, D. 2001. Distale Humerusfrakturen beim Kind. *Der Unfallchirurg*, 104, 435-445.
- TANTRAY, M. D., MANAAN, Q., BASHIR, S. I., BHAT, R. A. & WARIS, Q. 2018. Management of completely displaced extension type supracondylar fractures of humerus in children based on a new classification. *J Clin Orthop Trauma*, 9, S106-s111.
- TARTAGLIONE, J. P., ROSENBAUM, A. J., ABOUSAYED, M. & DIPRETA, J. A. 2015. Classifications in Brief: Lauge-Hansen Classification of Ankle Fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research*®, 473, 3323-3328.
- TEO, T. L., SCHAEFFER, E. K., HABIB, E., CHERUKUPALLI, A., COOPER, A. P., AROOJIS, A., SANKAR, W. N., UPASANI, V. V., CARSEN, S., MULPURI, K. & REILLY, C. 2019. Assessing the reliability of the modified Gartland classification system for extension-type supracondylar humerus fractures. *J Child Orthop*, 13, 569-574.
- TEO, T. L., SCHAEFFER, E. K., HABIB, E., EL-HAWARY, R., LAROUCHE, P., SHORE, B., AARVOLD, A., CARSEN, S., REILLY, C. & MULPURI, K. 2020. Is the modified Gartland classification system important in deciding the need for operative management of supracondylar humerus fractures? *J Child Orthop*, 14, 502-507.

- VAQUERO-PICADO, A., GONZALEZ-MORAN, G. & MORALEDA, L. 2018. Management of supracondylar fractures of the humerus in children. *EFORT Open Rev*, 3, 526-540.
- VERHAGE, S., RHEMREV, S., KEIZER, S., VAN UFFORD, H. Q. & HOOGENDOORN, J. 2015. Interobserver variation in classification of malleolar fractures. *Skeletal radiology*, 44, 1435-1439.
- VON LAER, L. 1999. Behandlung von Schafffrakturen im Wachstumsalter.
- VON LAER, L. 2013. Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. In: LAER, L. V., KRAUS, R. & LINHART, W. E. (eds.) 6., überarb. und erw. Aufl. ed. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- VON LAER, L., GRUBER, R., DALLEK, M., DIETZ, H. G., KURZ, W., LINHART, W., MARZI, I., SCHMITTENBECHER, P., SLONGO, T., WEINBERG, A. & WESSEL, L. 2000. Classification and Documentation of Children's Fractures. *European Journal of Trauma*, 26, 2-14.
- VON LAER, L. R. 1997. Der radiale Fixateur externe zur Behandlung suprakondylärer Humerusfrakturen im Wachstumsalter. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 9, 265-276.
- WEINBERG, A.-M., FREI, B. & HOLWEG, P. 2020. Suprakondyläre Humerusfraktur im Kindesalter. *Der Unfallchirurg*, 123, 309-325.
- WEINBERG, A. M., MARZI, I., GUNTER, S. M., WESSEL, L., RIEDEL, J. & VON LAER, L. 2002. [Supracondylar humerus fracture in childhood--an efficacy study. Results of a multicenter study by the Pediatric Traumatology Section of the German Society of Trauma Surgery--I: Epidemiology, effectiveness evaluation and classification]. *Unfallchirurg*, 105, 208-16.
- WILKINS, K. E. & BEATY, J. H. 1996. Fractures and dislocations of the elbow region. In: WILKINS, K. E. & BEATY, J. H. (eds.) *Rockwood and Wilkins' Fractures in children*. Philadelphia: Lippincott-Raven.
- WURZINGER, L. J. 2020. Obere Extremität. In: AUMÜLLER, G., AUST, G., CONRAD, A., ENGELE, J., KIRSCH, J., MAIO, G., MAYERHOFER, A., MENSE, S., REIßIG, D., SALVETTER, J., SCHMIDT, W., SCHMITZ, F., SCHULTE, E., SPANEL-BOROWSKI, K., WENNEMUTH, G., WOLFF, W. & WURZINGER, L. J. (eds.) *Duale Reihe Anatomie*. 5., korrigierte Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- YIN, M.-C., YUAN, X.-F., MA, J.-M., XIA, Y., WANG, T., XU, X.-L., YAN, Y.-J., XU, J.-H., YE, J. & TONG, Z.-Y. 2015. Evaluating the reliability and reproducibility of the AO and Lauge-Hansen classification systems for ankle injuries. *Orthopedics*, 38, e626-e630.

7. Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Frau Univ.-Prof. Dr. med. Tina Histing für die Überlassung dieses interessanten Themas bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herr PD Dr. Benjamin Ulmar, für die Betreuung, Hilfestellung und Beratung, sowie die konstruktive Kritik und Korrekturen dieser Arbeit.

Ein weiterer Dank geht an Herr PD Dr. med. Markus Küper, der mir als Mentor und Ko-Korrektor beratend zur Seite stand.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und Großeltern, sowie meinen Freunden bedanken, die mich immer unterstützt haben.

8. Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen, Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie unter Betreuung von Univ.-Prof. Dr. med. Tina Histing und PD Dr. med. Benjamin Ulmar durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch mich in Zusammenarbeit mit PD Dr. Benjamin Ulmar.

Die Vorbereitung der Inter- und Intra-Observer-Sitzungen, sowie die Anonymisierung der Röntgenbilder erfolgte durch mich.

Die statistische Auswertung erfolgte nach Beratung durch das Institut für Biometrie der Eberhard Karls Universität Tübingen durch mich.

Die analogen Daten wurden vorab durch mich digitalisiert und in ein Statistikprogramm eingefügt, aktualisiert und gepflegt.

Die Anfertigung der Promotionsarbeit inklusive intensiver Literaturrecherche erfolgte durch mich.

Die Anfertigung der Abbildungen erfolgte mit methodischer Unterstützung von Hanspeter Hüttisch.

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 06.12.2023

Alina Hüttisch