

Aus der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie
der Medizinischen Fakultät Mannheim
(Direktor: Prof. Dr. med. M. Boettcher)

**Vorkommen, Therapie und Prognose von Nervenläsionen bei
suprakondylären Humerusfraktur im Kinderalter**
Eine retrospektive Analyse von 2013 bis 2017

Inauguraldissertation
zur Erlangung des medizinischen Doktorgrades
der
Medizinischen Fakultät Mannheim
der Ruprecht-Karls-Universität
zu
Heidelberg

vorgelegt von

Ahmed Atamne

Aus

Hadera, Israel

2024

Dekan: Prof. Dr. med. S. Goerdt

Referent: Prof. em. Dr. Dr. h.c. L. M. Wessel

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	1
1 EINLEITUNG	2
1.1 Die suprakondyläre Humerusfraktur	2
1.1.1 Definition und Epidemiologie	2
1.1.2 Frakturmechanismus und Ätiologie	2
1.2 Anatomie	4
1.2.1 Knochen und Ellenbogengelenk	4
1.3 Klassifikation der suprakondylären Humerusfraktur	5
1.4 Diagnostik	7
1.4.1 Anamnese	7
1.4.2 Klinische Untersuchung	7
1.4.3 Sonografie des Ellenbogens	8
1.4.4 Röntgen-Diagnostik	9
1.5 Therapie	11
1.5.1 Konservative Therapie	11
1.5.2 Operative Therapie	12
1.6 Komplikationen	14
1.6.1 Vaskuläre Verletzungen	15
1.6.2 Volkmann-Kontraktur und Kompartmentsyndrom	15
1.6.3 Infektion	15
2.0. Nervenläsionen bei suprakondylären Humerusfrakturen im Kindesalter	16
2.1. Definition, Allgemeines und Epidemiologie	16
2.2. Anatomie der Nerven	17
2.3. Regeneration und Klassifikation der peripheren Nervenläsionen	19
2.4. Diagnostik	21
2 MATERIAL UND METHODEN	25
2.1 Patienten	25

2.2	Datenerhebung	25
2.2.1	Erhobene Daten	25
2.2.2	Datenbearbeitung und statistische Auswertung	26
3	ERGEBNISSE	27
3.1	Allgemein/Epidemiologie/Patientenkollektiv	27
3.1.1	Alter- und Geschlechtverteilung	27
3.1.2	Seitenvergleich	27
3.1.3	Frakturklassifikation	28
3.1.4	Stationäre Aufnahme	29
3.1.5	Operative und konservative Therapie der SCHF	29
3.2	Nervenschäden	31
3.2.1	Präoperative Nervenläsion	31
3.2.2	Postoperative Nervenläsion	31
3.2.3	Iatrogene Verletzungen	32
3.2.4	Nerven je nach Verteilung (N. ulnaris, radialis, medianus)	32
3.2.5	Diagnostik der Nervenläsion	33
3.2.6	Therapie der Nervenläsion	34
3.2.1	Prognose der Nervenläsion	36
DISKUSSION	38	
3.3	Patientenkollektiv	38
3.3.1	Alter	38
3.3.2	Geschlecht	39
3.4	Seitenverteilung	39
3.5	Frakturklassifikation	39
3.6	Therapie der suprakondylären Humerusfraktur	41
3.6.1	Die konservative Therapie	41
3.6.2	Die operative Therapie	42
3.7	Nervenläsion bei der suprakondylären Humerusfraktur	44
3.7.1	primäre Nervenverletzung	44
3.7.2	iatrogene Nervenverletzung	46
3.8	Therapie und Prognose der peripheren Nervenläsion bei der SCHF	49
3.9	Schwäche der Studie	53

ZUSAMMENFASSUNG.....	54
4 LITERATURVERZEICHNIS	56
5 TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	62
6 LEBENSLAUF	64
7 DANKSAGUNG	65

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abb.: Abbildung

A.: Arterie

a.-p.: anterior-posterior

EMG: Elektromyografie

K-Draht: Kirschner-Draht

m. M.: musculus

Mm.: musculi

Nach v. Laer: nach von Laer

N.n.: Nervus

o.g.: oben genannt

OP: Operation

pDMS: periphere Durchblutung, Motorik und Sensibilität.

r. R.: Ramus

SCHF: suprakondyläre Humerusfraktur

sog.: sogenannte

TENS: transkutane elektrische Nervenstimulation

1 EINLEITUNG

1.1 Die suprakondyläre Humerusfraktur

1.1.1 Definition und Epidemiologie

Wenn sich eine Fraktur an der distalen Humerusmetaphyse befindet, wird sie als suprakondyläre Humerusfraktur eingestuft (1). Die Bruchlinie dieser Fraktur verläuft definitionsgemäß außerhalb des Gelenkbereiches (2, 3) und es gibt keine Beteiligung der Wachstumsfugen.

Die suprakondyläre Humerusfraktur (SCHF) stellt im Kindesalter ab dem siebten Lebensjahr nach der distalen Radiusfraktur die zweithäufigste Fraktur dar (4) und ist die häufigste Fraktur am Ellenbogen (3-7). Sie ist ebenfalls die am häufigsten auftretende Fraktur bei pädiatrischen Patienten unter sieben Jahren, mit einer Häufigkeit von 31% (5).

In der Altersgruppe von fünf bis sieben Jahren tritt die suprakondyläre Humerusfraktur am häufigsten auf (8-12). Dies wird auf den erhöhten Bewegungsdrang und die verbliebene motorische Unreife zurückgeführt (13). Das Medianalter beträgt etwa sechs Jahre und die Inzidenz nimmt mit zunehmendem Alter allmählich ab (8).

In Bezug auf die Geschlechtsverteilung wurde die SCHF in verschiedenen Studien untersucht. Die Ergebnisse waren uneinheitlich und zeigten Variationen zwischen einem ausgewogenen Verhältnis (14), einem höheren Anteil an Jungen (3) und einem höheren Anteil an Mädchen (7). Dennoch deuteten die meisten Studien darauf hin, dass Jungen häufiger betroffen waren (12, 15-17).

1.1.2 Frakturmechanismus und Ätiologie

Der überwiegende Teil der suprakondylären Humerusfrakturen mit 95% ist vom Extensionstyp (8), welcher durch einen Sturz auf die ausgestreckte Hand bei vollständig gestrecktem oder nur leicht gebeugtem Ellenbogen entsteht (s. Abbildung 1).



Abb. 1. Frakturmechanismus der Extensionsfraktur (eigene Zeichnung)

Dabei wird der Ellenbogen hyperextendiert, das Olekranon in die Fossa olecrani gehobelt und die vordere Kortikalis des Humerus reißt unter Spannung. Der Zug des Trizepzes neigt dazu, das distale Fragment nach hinten und proximal zu verlagern.

Die Frakturlinie verläuft hierbei typischerweise von dorsal-proximal nach ventral-distal. Bei der Flexionsfraktur hingegen führt ein direkter Sturz auf den angewinkelten Ellenbogen dazu, dass das distale Fragment nach ventral kippt.

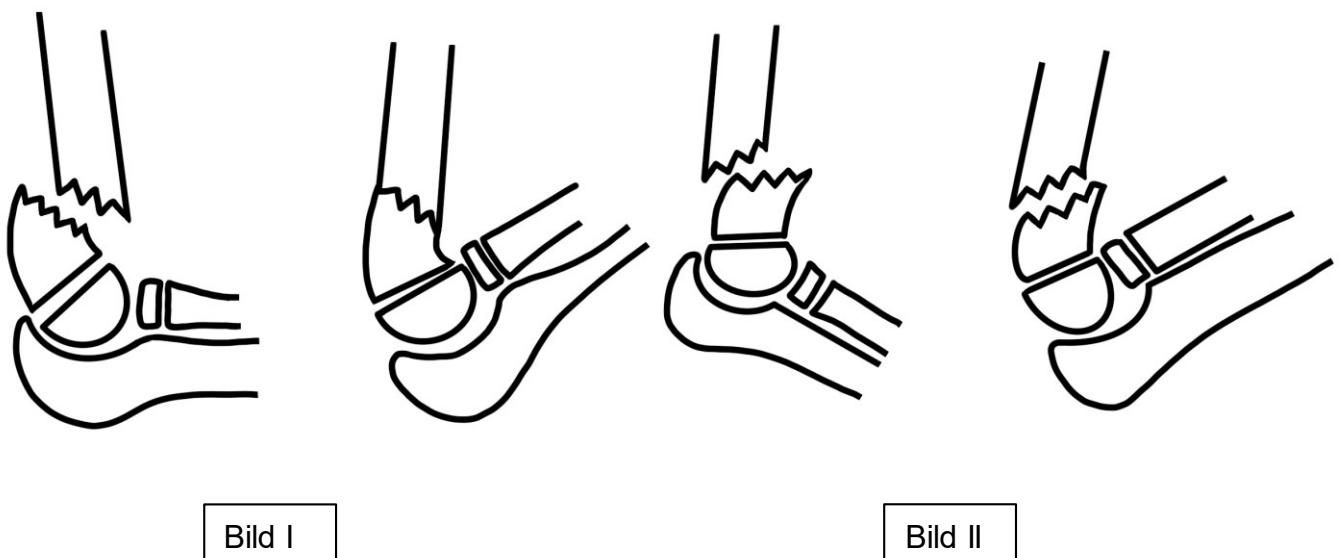


Abb. 2. Bild I-links: Suprakondyläre Humerusextensionsfraktur vor und nach Reposition, Bild II-rechts Suprakondyläre Humerusflexionsfraktur vor und nach Reposition (eigene Zeichnung)

Der Unfallmechanismus bei SCHF ist heterogen. Diese Frakturen resultieren teilweise aus sportlichen Aktivitäten oder auch aus Stürzen aus der Höhe. In einer Studie von L. Barr aus dem Jahr 2014 wurden die meisten Frakturen (38%) durch Stürze von Spielgeräten verursacht, wobei bei fast der Hälfte dieser Fälle ein Trampolin involviert war (8).

1.2 Anatomie

Für ein besseres Verständnis des klinischen Erscheinungsbildes, der Diagnostik und der Behandlung der SCHF und den daraus resultierenden speziellen Komplikationen, soll sowohl die Anatomie des Ellenbogens als auch die Anatomie des Oberarms durchleuchtet werden.

1.2.1 Knochen und Ellenbogengelenk

Der Humerus, der längste und größte Knochen der oberen Extremität (18), ist ein Röhrenknochen und besteht aus dem Corpus humeri sowie der Extremitas proximalis und distalis (19). Am distalen Ende wird der Corpus humeri breiter und flacht sich in dorsoventraler Richtung ab. Medial und lateral geht er in die Margo medialis bzw. lateralis über, die am Ellenbogengelenk als Epicondylus medialis und Epicondylus lateralis enden (18). Die beiden Epicondylen sind außerhalb des Gelenks positioniert und fungieren als Ansatzpunkte für verschiedene Muskeln (18).

An der ventralen Fläche des distalen Humerus befinden sich zwei Vertiefungen oberhalb der Gelenkflächen: die Fossa coronoidea über der Trochlea, welche bei Beugung einen Fortsatz der Ulna (Processus coronoideus) aufnimmt und die Fossa radialis über dem Capitulum humeri, die das Caput radii aufnimmt (20, 21).

Dorsal, proximal der Trochlea, befindet sich ebenfalls eine Vertiefung, die Fossa olecrani. Diese ermöglicht bei Streckung die Aufnahme des Olecranons (21). Auf der Rückseite des deutlich stärker ausgeprägten Epicondylus medialis verläuft der Nervus ulnaris dicht unter der Haut in einer Rinne, dem Sulcus nervi ulnaris (20).

Das Ellenbogengelenk (Articulatio cubiti) besteht aus drei Einzelgelenken, die durch die drei Knochen Humerus, Ulna und Radius gebildet werden: dem Humero-Ulnargelenk, dem Humero-Radialgelenk und dem proximalen Radio-Ulnargelenk (22). Alle drei Gelenke sind jedoch von einer gemeinsamen Gelenkkapsel umgeben. Die Gelenke bilden gemeinsam ein Drehscharniergegenkelnk, das funktionell betrachtet wird.

Die Bewegung im Ellenbogengelenk (Articulatio cubiti) findet in zwei Ebenen statt. Die erste Ebene (Flexion und Extension) wird vor allem in der Articulatio humeroulnaris durchgeführt. Die zweite Ebene (Supination und Pronation) werden durch die beiden Gelenke im Unterarm, die proximale und distale Articulatio radioulnaris, ermöglicht.

Die Ausmessung der Bewegungsgrade im Ellenbogengelenk erfolgt nach der Neutral-Null-Methode. Die Flexion (Beugung) beträgt 150° , die Extension (Streckung) 10° , die Supination $80-90^\circ$ und die Pronation beträgt ebenfalls $80-90^\circ$. Für jede Bewegung im Ellenbogen gibt es eine Muskelgruppe, die das Gelenk entsprechend der jeweiligen Bewegungsebene bewegt (s. Tabelle 1).

Flexion	Extension	Supination	Pronation
M. biceps brachii M. brachioradialis M. brachialis	M. triceps brachii M. anconeus	M. supinator M. biceps brachii	M. pronator quadratus M. pronator teres

Tabelle 1: Die Tabelle 1 zeigt die Hauptmuskeln, die für die Bewegung im Ellenbogen zuständig sind (22)

1.2.2. Gefäße

Nach Eintritt der A. subclavia zwischen der Klavikula und der ersten Rippe in die Achselhöhle verläuft diese weiter als A. axillaris. Nach Abgabe mehrerer Äste geht die A. axillaris am unteren Rand des M. teres major in die A. brachialis über, diese verläuft entlang des Oberarms nach distal und teilt sich auf Höhe des Ellenbogens in zwei Arterien, A. radialis und A. ulnaris. Vor der Teilung gibt die A. brachialis mehrere wichtige Äste ab, darunter die A. profunda brachii, A. collateralis ulnaris superior und die A. collateralis ulnaris inferior (19, 23).

Die A. radialis gibt im Ellenbogenbereich den R. recurrens radialis ab, der eine Anastomose mit der A. collateralis radialis (Endast der A. profunda brachii) bildet und verläuft weiter distal entlang der radialen Seite des Unterarms (19, 23). Die A. ulnaris gibt im Ellenbogenbereich den Ramus recurrens ulnaris ab, der sich in zwei Arterien teilt: den Ramus anterior und den Ramus posterior. Diese beiden Arterien anastomosieren mit der A. collateralis ulnaris superior und inferior. Sie verläuft weiter distal entlang der ulnopalmarischen Seite des Unterarms (19, 23).

Der venöse Abfluss des Arms beginnt in den tiefen und oberflächlichen Venen der Hand. Die oberflächlichen Venen, einschließlich der V. cephalica und der V. basilica, führen entlang des Unterarms und münden in die V. axillaris. Die tiefen Venen, wie die Vv. radiales und die Vv. ulnares, begleiten die gleichnamigen Arterien und vereinigen sich zur V. brachialis, die schließlich in die V. axillaris übergeht und in die V. subclavia mündet (22).

1.3 Klassifikation der suprakondylären Humerusfraktur

Die Klassifikation der SCHF ist vielfältig. Weltweit wurden zahlreiche Klassifikationen beschrieben und veröffentlicht. Im deutschsprachigen Raum wird vor allem die Klassifikation nach von Laer verwendet (24, 25).

Die Ergebnisse dieser Dissertation sind auf der Klassifikation nach von Laer aufgebaut, da diese Klassifikation in der Klinik für Kinder der Universitätsmedizin Mannheim als Standard verwendet wird.

Alle Klassifikationen teilen grundsätzlich nach Dislokationsgrad und Rotation der SCHF ein. Bis auf die Klassifikation nach von Laer werden alle Klassifikationen in drei Grade eingeteilt. Die Klassifikation nach v. Laer wird in 4 Typen eingeteilt. Typ I ist eine undislozierte Fraktur, Typ II mit einer Dislokation in einer Ebene (Sagittalebene), Typ III ist eine Fraktur mit Dislokation in drei Ebenen mit Rotationfehler und Typ IV beschreibt die komplett dislozierte Fraktur in allen Ebenen und es besteht kein Kontakt zwischen den Fragmenten (siehe Abb. 3) (15, 24-26).

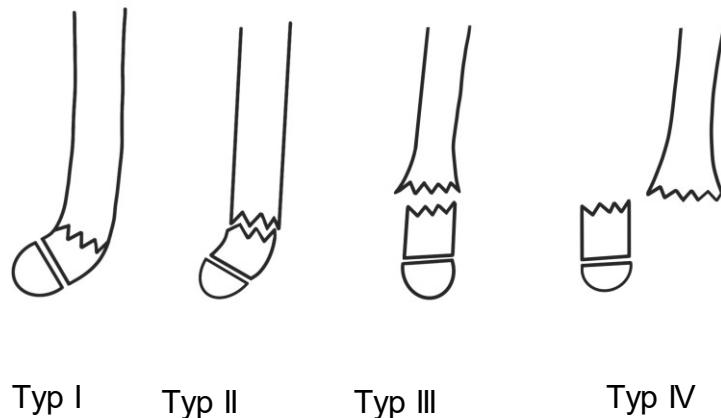


Abb. 3: Klassifikation der suprakondylären Humerusfraktur (SCHF) nach v. Laer (Typ I-IV) (eigene Zeichnung).

Eher selten werden die Klassifikation nach Baumann, Gartland und Felsenreich im deutschsprachigen Raum verwendet. Die Klassifikation nach Gartland wird vor allem in angloamerikanischen Publikationen genutzt, bei dieser Klassifikation wird die SCHF in drei Typen eingeteilt (s. Tabelle 2) (7, 27-29).

Typ	Beschreibung
Typ I	nicht verschobene Fraktur
Typ II	dislozierte Fraktur mit intakter corticalis dorsal
Typ IIIa	komplett dislozierte Fraktur mit einer posteromedialen Rotation
Typ IIIb	komplett dislozierte Fraktur mit einer posterolateralen Rotation

Tabelle 2: Die Klassifikation der SCHF nach Gartland

Eine weitere Klassifikation, die die SCHF in drei Grade einteilt, ist die Baumann-Klassifikation. Typ I beschreibt eine undislozierte Fraktur, Typ II eine dislozierte Fraktur mit Fragmentkontakt und Typ III eine dislozierte Fraktur, ohne dass Fragmentkontakt besteht (25).

1.4 Diagnostik

1.4.1 Anamnese

Bei jeder notfallmäßigen Vorstellung muss eine Anamnese erhoben werden. Bei pädiatrischen Patienten mit akutem Trauma ist eine ausführliche Anamnese nicht immer notwendig und darf nicht überbewertet sein. Der Grund dafür ist, dass der Unfallmechanismus bei noch offenen Wachstumsfugen weniger Bedeutung als beim Erwachsenen hat und keinen großen Einfluss auf den weiteren Verlauf nimmt. Zudem kommt es bei einer ausführlichen Anamnese zu einer größeren Zeitverzögerung bei womöglich starken Schmerzen und diese führt zu Ungeduld und Unzufriedenheit bei den Erziehungsberechtigten und dem Patienten. Das Ziel ist daher, festzustellen, ob es sich um ein adäquates Trauma handelt, die Lokalisation der Verletzung zu bestimmen und die Stärke der Schmerzen zu erfassen (24-26). Natürlich sollte dennoch eine Kindeswohlgefährdung (nicht-akzidentelles Trauma) ausgeschlossen werden.

1.4.2 Klinische Untersuchung

Bei der allgemeinen klinischen Untersuchung steht die Inspektion an erster Stelle. Wichtig ist es, nicht nur die betroffene Stelle zu inspizieren, sondern auch den gesamten Körper, um weitere, oberflächlich erscheinende, Verletzungen auszuschließen (25). Bei der Untersuchung sollte man auf Schwellung, offene Wunden, Fehlstellungen, Hämatome, Bewegungseinschränkung und eine Schonhaltung achten (24-26). Eine Palpation des Ellenbogens soll sehr vorsichtig erfolgen ggf. bei ausgeprägter Deformität oder Weichteilverletzungen unterlassen werden (26). Eine komplette körperliche Untersuchung soll bei Bedarf durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass keine Begleitverletzung vorliegt (25, 28).

Aufgrund einer erhöhten Komplikationsgefahr (vaskuläre oder nervale Läsionen) sollten die periphere Durchblutung, Motorik und Sensibilität (pDMS) bei jedem Verdacht auf eine SCHF beidseits untersucht werden. Zur Überprüfung der Durchblutung ist es erforderlich, die Pulse (A. radialis und A. ulnaris) distal des Bruchs am Handgelenk zu tasten. Zudem soll die Rekapillarisationszeit an der Fingerkuppe bestimmt werden (24, 25, 30).

Zu den klinischen Symptomen einer Durchblutungsbeeinträchtigung gehören zum Beispiel Schmerzen, motorische und sensible Ausfälle, Blässe sowie Temperaturverminderung der betroffenen Hand (31). Die Nervenuntersuchung wird im nächsten Kapitel ausführlich erklärt.

1.4.3 Sonografie des Ellenbogens

Die Fraktursonografie im Kindesalter spielt aktuell eine immer größere Rolle bei der Diagnostik und zeigt zuverlässige Ergebnisse bei den richtigen Indikationen (25, 32, 33) wie unsicherem Verdacht oder Abwesenheit sicherer Frakturzeichen.

Die Sonografie kann nach der klinischen Untersuchung im Bereich des Ellenbogens angewendet werden, um ein positives Fettkörperzeichen (siehe Abb. 4) darzustellen (34-36), dass einem indirekten Frakturzeichen im Ellenbogenbereich entspricht. Zu der Differentialdiagnosen gehören die SCHF, Condylus-Fraktur oder Radiushalsfraktur. Dafür muss ein Linearschallkopf am distalen Humerus dorsal longitudinal angelegt werden. Diese Untersuchung hat eine Sensitivität von 97,3 Prozent und eine Spezifität von 90,5 Prozent (35). Somit kann bei unauffälligem Befund auf ein Röntgenbild verzichtet werden (36).

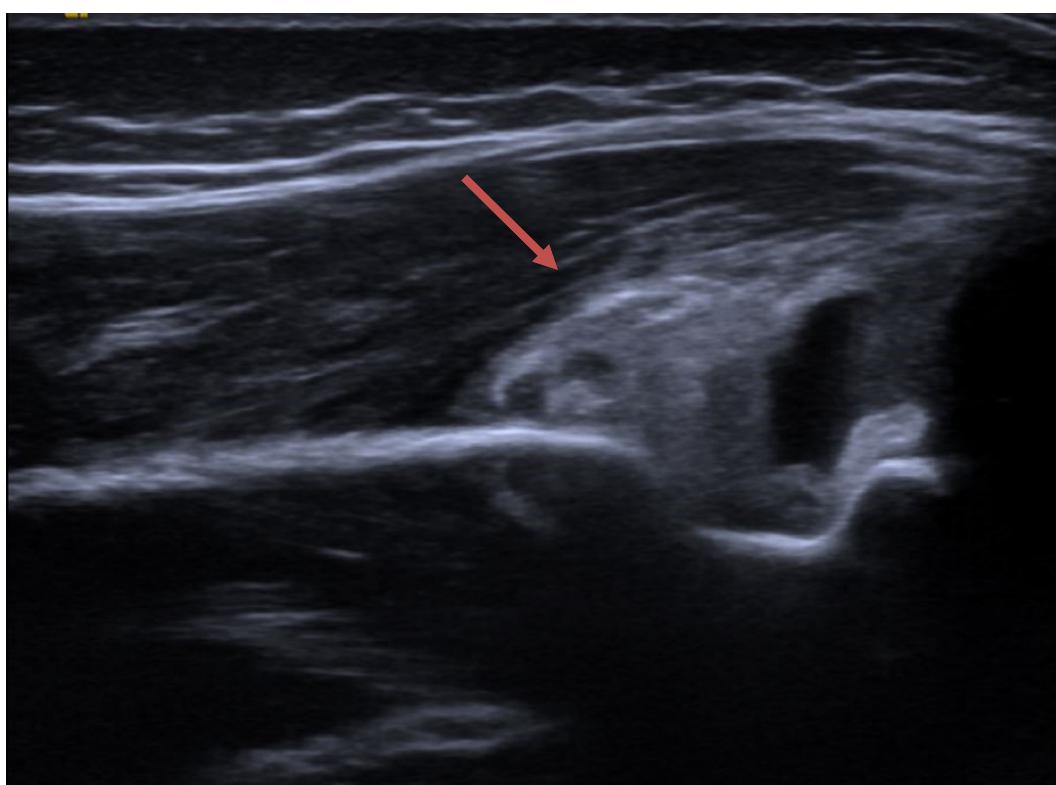


Abb. 4 zeigt ein sonografisches Bild vom Ellenbogengelenk dorsal mit einem positiven Fettkörperzeichen und somit Verdacht auf Fraktur des distalen Humerus (= Hämarthros).

1.4.4 Röntgen-Diagnostik

Der Goldstandard zur Diagnosestellung einer Differentialdiagnosen ist das Röntgenbild in zwei Ebenen: anterior-posterior (a.-p.) und seitlich (24, 25). Auf die seitliche Aufnahme kann bei eindeutiger OP-Indikation in der anterior-posterioren Röntgenaufnahme verzichtet werden (25). Es ist jedoch nicht immer einfach, eine SCHF im Röntgen darzustellen. Diese Schwierigkeit betrifft vor allem die undislozierten Frakturen wie Frakturen Typ I und Typ II nach v. Laer. Die Diagnose lässt sich hier oft nur mithilfe der Rogers-Hilfslinie oder indirekter Röntgenzeichen (24, 25) wie positives Fettpolsterzeichen (fat pad sign) (37, 38), bei passender Klinik stellen.

Das Fettpolsterzeichen oder Fettkörperzeichen deutet auf einen Gelenkerguss hin, der die Fettpolster des Ellenbogengelenks nach vorne oder hinten drückt und sie somit im Röntgenbild sichtbar macht (siehe Abb. 5). Der Gelenkerguss bei einer SCHF kann sowohl das vordere Fettpolster, aus der Fossa coronoidea und der Fossa radialis, als auch das hintere Fettpolster, aus der Fossa olecrani, verdrängen (24, 39). Eine Abwesenheit des Fat-pad-Zeichens schließt eine Fraktur nicht aus.



Abb. 5 Positive vordere und hintere Fettpolsterzeichen in einer seitlichen Röntgenaufnahme (28)

Mit Hilfe der Rogers-Hilfslinie kann die Fehlstellung bei einer SCHF sowie der Frakturtyp (Extensions- oder Flexionsfraktur) festgestellt werden (6). Zur Darstellung der Rogers-Hilfslinie zieht man eine Linie entlang der vorderen Kante des Humerusschaftes in einem seitlichen Röntgenbild des Ellenbogens durch das Capitulum humeri. Im Normalfall schneidet diese Linie das Capitulum humeri am Übergang vom mittleren zum hinteren Drittel. Bei einer Extensionsfraktur ist die Rogers-Hilfslinie nach vorne verlagert, bei einer Flexionsfraktur ist sie nach hinten verlagert (Siehe Abb. 6) (12, 24-26).

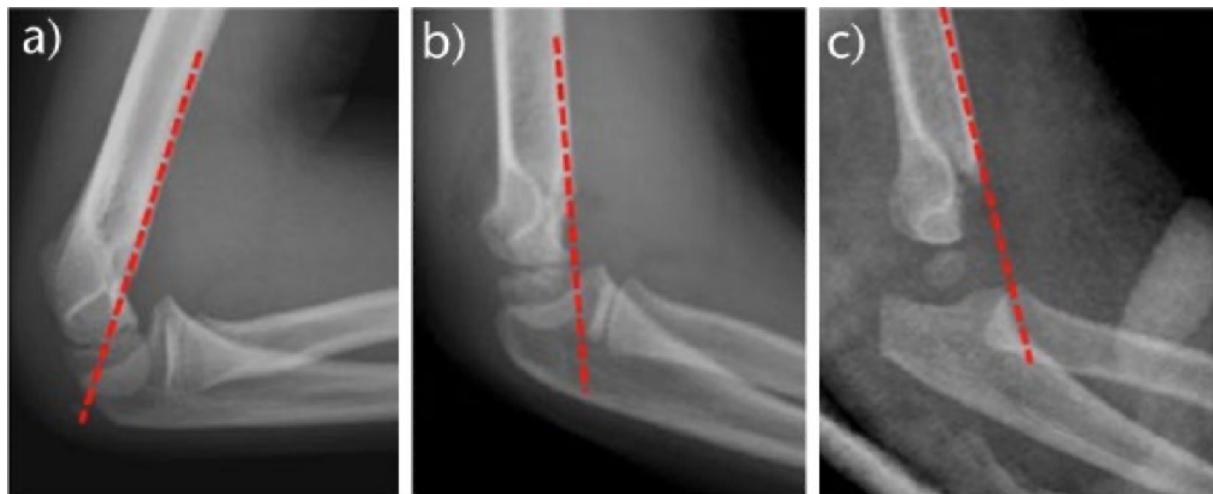


Abb. 6 Bild a zeigt einen unauffälligen Befund, Bilder b und c zeigen eine Extensionsfraktur mit pathologischem Verlauf der Rogers-Hilfslinie (28).

Neben dem Fettpolsterzeichen und der Rogers-Hilfslinie kann der Baumann-Winkel im anterior-posterioren Röntgenbild zur Diagnose der SCHF verwendet werden. Der Baumann-Winkel ist der Winkel zwischen der Längsachse des Humerus und der Epiphysenachse des Capitulum humeri (siehe Abb. 7) (26, 28, 40). Physiologisch beträgt dieser Winkel zwischen 64° und 81° (41). Der Baumann-Winkel ist schwer exakt zu bestimmen und hat in der modernen Kindertraumatologie an Bedeutung verloren. Für eine korrekte Messung ist eine präzise Positionierung des Patienten sowie eine exakte Ausrichtung des Röntgenstrahlers auf das flach an der Platte anliegende distale Humerusende erforderlich. Zusätzlich zeigt der Baumann-Winkel eine gewisse Variabilität zwischen verschiedenen Beobachtern und bei wiederholten Messungen durch denselben Beobachter (26).



Abb. 7. Physiologischer Baumanwinkel in einem a.p. Röntgenbild vom Ellenbogen (28).

1.5 Therapie

Zur Behandlung der SCHF steht die konservative oder die chirurgische bzw. operative Therapie zur Wahl. Die Entscheidung zur Therapiewahl hängt von der Fraktur und möglichen Begleitverletzungen ab.

1.5.1 Konservative Therapie

Die konservative Therapie erfolgt mittels einer Oberarmschiene (Typ I) oder Blount-Schlinge (Typ II), auch bekannt als Cuff-and-Collar-Verband. Die Indikation für die konservative Behandlung ist eine SCHF Typ I nach v. Laer und eine stabile Fraktur Typ II ohne Dislokationsgefahr mit bis zu 20° Ante- oder Rekurvation bis zum 6. Lebensjahr (3, 24, 25, 42). Bei einer leicht dislozierten SCHF Typ II nach v. Laer kann eine Redression oder eine primäre geschlossene Reposition und die Anlage einer Blount-Schlinge im Anschluss angestrebt werden (25). Durch den Zug des M. trizeps brachii wird das distale Frakturfragment bei den Extensionsfrakturen nach ventral an dem proximalen Anteil gedrückt.

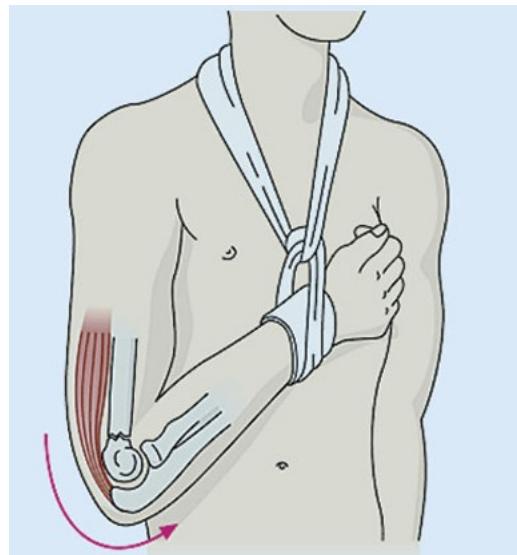


Abb. 8 zeigt ein Kind mit einer Blount-Schlinge bei einer SCHF (43)

Bei Behandlung in einer Oberarmschiene sollte primär auf die Anlage einer zirkulären Gipsschiene bei bedrohlichem Schwellungspotenzial verzichtet werden, um die Gefahr eines Kompartmentsyndroms zu verringern.

Eine Röntgenverlaufskontrolle sollte bei den Kindern mit einer SCHF Typ II nach v. Laer bei nicht chirurgischer Therapie am 5. bis 7. Tag durchgeführt werden, um eine sekundäre Dislokation auszuschließen (25). Hier reicht eine seitliche Röntgenaufnahme aus. Eine radiologische Verlaufskontrolle bei nicht dislozierten SCHF Typ I ist nach L.M. Wessel 2016 nicht notwendig (24).

Die Ruhigstellung sollte je nach Patientenalter zwischen drei bis vier Wochen betragen und anschließend sollte eine radiologische Konsolidierungskontrolle durchgeführt werden. (24, 25, 44). Eine Physiotherapie ist in den meisten Fällen nicht notwendig (24).

1.5.2 Operative Therapie

Zu der operativen Therapie gehört die geschlossene und offene Reposition mit Osteosynthese. Die geschlossene Reposition sollte das primäre Vorgehen sein und angestrebt werden, da diese in bis zu 95% der Fälle gelingt. Wenn nicht, dann ist die offene Reposition die zweite Wahl. Zu den chirurgisch behandelten Frakturen zählen die dislozierten SCHF, Typ III und Typ IV sowie in manchen Fällen Typ II nach v. Laer, die sich in der Redression nicht reponieren lassen (3, 24-26).

Eine Indikation zur operativen Therapie stellen auch Komplikationen der suprakondylären Humerusfraktur wie Verletzung der Leitungsbahnen (Gefäße und Nerven), offene Fraktur und Kompartmentsyndrom (25) dar.

In der Literatur sind verschiedene Methoden für das Repositionsmanöver der SCHF beschrieben. Bei der Extensionsfraktur sollte vor Beginn des Repositionsmanövers zunächst ein Längszug durch den Operateur durchgeführt werden. Dieser dient dazu, die Weichteile zu dehnen, um möglicherweise interponierte Strukturen zu lösen. Gleichzeitig wird das distale Frakturfragment nach kaudal gezogen, wodurch eine Distanz zwischen den Fragmenten geschaffen wird.

Anschließend erfolgt die Reposition durch vorsichtigen Druck auf das distale Frakturfragment bzw. das Olecranon mit vorsichtiger maximaler Beugung des Armes (43). Sollte im seitlichen Röntgenbild weiterhin ein Rotationsfehler bestehen, könnte diese durch Pro- oder Supination korrigiert werden. Für die Reposition einer distal posterior dislozierten Fraktur muss der Operateur Druck von ventral in die Höhe des distal dorsal liegenden Fragments üben. Im Anschluss ist das Ergebnis mittels Röntgenbilder in zwei Ebenen zu überprüfen. Die geschlossene Reposition sollte bei SCHF Typ III und Typ IV maximal zweimal durchgeführt werden (24).

Heutzutage werden suprakondyläre Humerusfrakturen mittels Kirschner-Drähte, ESIN (elastisch-stabile intermedulläre Marknagelung) oder Fixateur-Externe im deutschsprachigen Raum versorgt (24, 25, 43). Bevorzugt wird die perkutan gekreuzte K-Draht Osteosynthese (43). Eine andere Methode bei der K-Draht-Osteosynthese ist es, die Kirschner-Drähte lateral anzubringen. Nach der Reposition fängt man bei den gekreuzten K-Drähten erst mit dem lateralen K-Draht an. Grund dafür ist, dass der Epicondylus radialis meistens trotz der Weichteilschwellung gut tastbar ist (45). Zur Vermeidung der Durchbohrung der Wachstumsfuge sollte der K-Draht nicht zu weit distal eingebracht werden (26) und möglichst nicht ins Gelenk.

Der zweite K-Draht wird über den Epicondylus ulnaris angebracht. Die Palpation des Epicondylus ulnaris ist häufig beim geschwollenen gebeugten Ellenbogen schwierig, sodass manchmal erst der Ellenbogen leicht gestreckt werden muss, um das Tasten des Epicondylus ulnaris und des Sulcus ulnaris zu ermöglichen. Nach Ansetzen des Drahts muss der Ellenbogen wieder flektiert werden. Beide Drähte sollen von unten hinten (distal-dorsal) schräg über die Frakturlinie nach oben vorne (proximal-ventral) bis durch die Gegenkortikalis angebracht werden (45). Für eine stabile und gute Fixation der Fraktur mit den K-Drähten sollen die Drähte sich proximal der Fraktur kreuzen (24, 26) (s. Abb. 9). Laut Weinberg sind zwei stabile K-Drähte für die Versorgung vollkommen ausreichend (43).

Es gibt in der Literatur keine eindeutige Antwort darauf, ob die Kirschnerdrahtenden am Ende perkutan ausgeleitet oder subkutan platziert werden sollten. Diese Frage wird oft unterschiedlich behandelt (3, 15, 24, 29, 46, 47). In der kinderchirurgischen Klinik der Universitätsmedizin Mannheim und somit bei allen Kindern in dieser Studie wurden die Drahtenden perkutan belassen. Nach Reposition und Kirschner-Draht-Osteosynthese soll die Fraktur in einer Oberarmschiene ruhiggestellt werden.

Die perkutane eingebrachten K-Drähte sollen nach drei bis vier Wochen und die versenkten K-Drähte nach vier bis sechs Wochen in einem kleinen Eingriff entfernt werden (48).

Alternative zur K-Draht-Osteosynthese sind wie oben erwähnt, die Osteosynthese mittels ESIN und Fixateur externe. Die Versorgung mit dem Fixateur externe kann bei Revisionseingriffen oder schon in Fehlstellung konsolidierte Fraktur angewandt werden. Ein Vorteil beider Methoden ist, dass postoperativ keine Oberarmgipsschiene notwendig ist (3). Eine Studie aus 2007 durch K. Schäffer zeigte, dass bei 60 behandelten Kindern mit ESIN keinen Nervenschaden aufgetreten ist (3).



Abb. 9 zeigt eine SCHF Typ II vor (a und b) und nach (c und d) der Versorgung mittels K-Draht Osteosynthese (43).

Nach erfolglosen Versuchen einer geschlossenen Reposition wird die Indikation zur offenen Reposition und Osteosynthese gestellt (24, 26). Das Umsteigen auf die offene Behandlung wird in der derselben Narkose durchgeführt. Zur offenen Darstellung der Fraktur gibt es drei Zugänge: den ventralen, dorsalen, medialen und lateralen Zugang. Bei dem ventralen Zugang ist die gute Darstellung der Gefäße möglich. Über den ulnaren Zugang kann der N. ulnaris ebenfalls sicher dargestellt und geschont werden (26).

1.6 Komplikationen

Es gibt mehrere potenzielle Komplikationen einer SCHF. Die Komplikationen können im Rahmen der Versorgung, aber auch im Rahmen des Frakturmechanismus auftreten und sind meistens gut therapierbar. Mögliche Komplikationen sind Nervenläsionen, Gefäßverletzungen, Kompartmentsyndrom, Volkmann-Kontraktur, Bewegungseinschränkung, Achsenfehlstellung und Infektionen (25).

1.6.1 Vaskuläre Verletzungen

Gefäßläsionen bei der SCHF sind selten. Die Häufigkeit liegt in der Literatur zwischen 0,7 und 20 % (49-54). Das Risiko steigt bei den stark dislozierten SCHF wie Typ IV nach v. Laer (55).

Ursachen für eine Durchblutungsstörung können Gefäßdehnung, Einklemmung des Gefäßes (A. brachialis) in den Frakturspalt, Kompression durch Weichteilschwellung oder Hämatome, Thrombosen und Spasmen (45, 56, 57) sein. Eine komplette Durchtrennung der A. brachialis durch die Frakturkante ist extrem selten (58, 59). Bei der Mehrheit (80%) der Kinder mit präoperativer Durchblutungsstörung wird das Problem nach einer erfolgreichen geschlossenen Reposition behoben (57).

Wenn der Puls nach der geschlossenen oder offenen Reposition wieder tastbar ist, sind keine weiteren Maßnahmen notwendig (60, 61). Sollte der Puls jedoch weiterhin nicht tastbar sein, kein Dopplersignal über den Handgelenkarterien vorhanden sein und klinische Anzeichen einer Gefäßverletzung wie kalte Hand, blasses Haut und schmerzhafte Handbewegungen auftreten, müssen die Gefäße exploriert und Verletzungen behandelt werden (59, 62).

1.6.2 Volkmann-Kontraktur und Kompartmentsyndrom

Die Volkmann-Kontraktur (Kontraktur der Unterarm- und Handmuskulatur) tritt selten durch eine Perfusionsstörung oder Nervenkompression bei der SCHF nach Gefäß- und Nervenverletzungen oder Kompartmentsyndrom auf. Sie tritt bei 0.5% aller suprakondylären Humerusfraktur (63) auf. Die klinischen Symptome äußern sich wie bei einem Kompartmentsyndrom, durch starke Schmerzen, Sensibilitätsausfälle und auffälligen Pulsstatus. Bei unbehandeltem Kompartmentsyndrom kann es schon nach sechs Stunden zur irreversiblen Nerven- und Muskelschaden (45, 64) kommen.

1.6.3 Infektion

Eine Infektion im Rahmen der SCHF ist selten und kann im Rahmen einer offenen Fraktur oder postoperativ nach einer Osteosynthese auftreten. Die Wahrscheinlichkeit einer Infektion liegt laut Literatur bei bis zu 6% (65). Die meisten Infektionen sind oberflächliche Infektionen und treten im Rahmen der K-Draht-Osteosynthese auf. Eine Osteomyelitis etwa entlang perkutan ausgeleiteter K-Drähte ist seltener, kann aber vorkommen. (66).

2.0. Nervenläsionen bei suprakondylären Humerusfrakturen im Kindesalter

2.1. Definition, Allgemeines und Epidemiologie

Periphere Nervenverletzungen treten im Kindesalter am häufigsten durch eine Glasschnittrverletzung an Unterarm und Hand auf (24). Stumpfe Verletzungen können aber auch eine Nervenläsion verursachen (24). Nervenläsionen gehören zu den häufigen Komplikationen einer SCHF. Die Häufigkeitsrate einer Nervenläsion bei der SCHF beträgt 10-20 % in der Literatur (50, 67-69).

Das Verletzungsrisiko peripherer Nerven steigt bei komplizierten und offenen Frakturen an (50). Die Läsionen können sowohl primär im Rahmen des Frakturmechanismus durch eine Dehnung, Einklemmung oder Kompression als auch sekundär bei der Reposition oder durch die K-Draht-Osteosynthese iatrogen auftreten.

Alle drei Hauptnerven (Nervus radialis, Nervus medianus und Nervus ulnaris) können primär verletzt werden. Allerdings variiert die Wahrscheinlichkeit einer Verletzung je nach Nerv und unterscheidet sich auch je nach Literaturquelle. Nervus radialis und Nervus medianus sind am häufigsten betroffen bei primären Nervenläsionen, während eine primäre Verletzung des Nervus ulnaris seltener zu beobachten ist (15, 69).

In einer großen multizentrischen Studie von Weinberg et al. beträgt die Häufigkeit einer Verletzung des N. radialis bis zu 44,4% und des N. medianus bis zu 35,6%. In einer anderen Studie von McGraw et al. und Tomaszewski et al. ist der am häufigsten primär verletzter Nerv der N. medianus (50, 70).

Aufgrund des anatomischen Verlaufs des N. ulnaris ist das Risiko einer Läsion des Nervs iatrogen, durch die Reposition oder die perkutane K-Draht-Osteosynthese, am höchsten (68). Die Inzidenz einer iatrogenen Verletzung des N. ulnaris beträgt 3- 15% (24, 68, 71, 72) bei dieser OP-Technik.

Beurteilt man die Nervenverletzungen anhand des Frakturtyps, ist zu beobachten, dass die Verletzungen am häufigsten bei der Extensionsfraktur auftreten, während Flexionsfrakturen nur selten mit Nervenschäden des N. ulnaris verbunden sind (69, 73). Extensionsfrakturen mit posteromedialer Verschiebung neigen dazu, den N. radialis zu verletzen, wohingegen eine Extensionsfraktur mit posterolateraler Verschiebung zu einer Schädigung des N. medianus führt (69, 73).

Eine komplette Durchtrennung eines peripheren Nervs durch die SCHF ist selten. Eine Nervenläsion kann sowohl sensible, rein motorische als auch beide Ausfälle gleichzeitig verursachen. Die meist Nervenläsionen (>90%) bei der suprakondylären Humerusfraktur sind einfach und heilen spontan zur Restitutio ad integrum innerhalb von drei bis sechs Monaten (43, 48, 74).

2.2. Anatomie der Nerven

Wie bereits erwähnt ist es von großer Bedeutung, die Anatomie zu beherrschen, um mögliche klinische Symptome eines Nervenausfalls zu erkennen und eine intraoperative Nervenläsion zu vermeiden. Die Kenntnis des Aufbaus und der Patho-Physiologie von Nerven ist essenziell für die Beurteilung bestehender Nervenschädigungen und die Erstellung eines geeigneten Therapieplans.

2.2.1. Die makroskopische Anatomie der langen Nerven

2.2.1.1. Nervus medianus

Der Nervus medianus ist die Fortsetzung aus der medialen Wurzel des medialen Faszikels und der lateralen Wurzel des lateralen Faszikels aus dem Plexus brachialis (C6-T1). Nach dieser Vereinigung verläuft der N. medianus im Sulcus bicipitalis medialis in Richtung des Ellenbogens, oberhalb der A. brachialis, und läuft zwischen den beiden Köpfen des M. pronator teres im Ellenbogen nach distal weiter. Am Unterarm verläuft der Nerv zwischen den beiden Fingerbeugemuskeln (M. flexor digitorum superficialis und profundus) bis zum Handgelenk. Hier läuft der N. medianus unter dem Retinaculum flexorum durch den Karpaltunnel bis zu seinem Endziel, den Fingern, und teilt sich in seine motorischen und sensiblen Endäste auf (22, 23).

Der Nerv hat am Oberarm keine Funktionen oder Innervationsgebiete, da er seine Äste erst am Unterarm abgibt. Der N. medianus innerviert zwölf Muskeln motorisch, darunter die meisten Beugemuskeln des Unterarmes und des Daumens (Thenar). Sensibel innerviert er die Haut der Fingerkuppen der radialen 3 ½ Fingern und die Hohlhand palmar bis zu Mitte des vierten Fingers (22, 23).

2.2.1.2. Nervus radialis

Der Nervus radialis ist die Fortsetzung des Fasciculus posterior aus dem Plexus brachialis (C5-T1). Der Nerv tritt dorsal am Oberarm mit der A. profunda brachii zwischen zwei der drei Köpfe der M. triceps brachii (Caput longum und Caput laterale), auch Trizepsschlitz genannt und verläuft im Sulcus n. radialis am Humerus dorsal nach distal. Am distalen Oberarm tritt der Nerv zwischen dem M. brachialis und M. brachioradialis in die Ellenbeuge. Hier verzweigt er sich in zwei Hauptäste, Ramus profundus und Ramus superficialis (23). Der R. profundus verläuft distal zum Handgelenk durch den Supinatorkanal im M. supinator. Der zweite Ast des N. radialis, der R. superficialis, zieht mit der A. radialis am Unterarm entlang des M. brachioradialis zur Hand und endet als sensibler Hautast (22).

Der N. radialis innerviert im Vergleich zum N. medianus Muskeln am Ober- und Unterarm. Er innerviert motorisch alle Streckmuskeln des Armes und die radiale Muskelgruppe. Sensorisch versorgt der Nerv die Haut auf der Rückseite des Arms, durch den Ramus superficialis die dorsalen radialen 2 ½ Finger sowie das Ellenbogengelenk und die Handgelenke.

2.2.1.3. Nervus ulnaris

Der N. ulnaris ist die kräftigste Fortsetzung des medialen Faszikels (C8-T1). Der Nerv verläuft distal des Unterarms im Sulcus bicipitalis medialis bis zur Mitte des Oberarmes, dann durch das Septum intermusculare mediale dorsale zum Epicondylus medialis (im Sulcus nervi ulnaris) zum Ellenbogen, wo er im Sulcus nervi ulnaris den Ellenbogen erreicht. Am Unterarm zieht der N. ulnaris mit der A. ulnaris unterhalb des M. flexor carpi ulnaris bis zum Handgelenk. Anschließend durch die Guyon-Loge zur Handfläche. Hier teilt er sich in seine Endäste, Ramus profundus und Ramus superficialis auf (22, 23).

Der N. ulnaris innerviert am Oberarm wie der N. medianus keine Muskeln, somit sind alle Innervationsgebiete des Nervs am Unterarm. Er innerviert motorisch verschiedene Muskeln, darunter einzelne Beugemuskeln des Unterarms und des Daumens, die Muskeln der Mittelhand sowie alle Muskeln des Kleinfingers (Hypothenar). Sensorisch innerviert der Nerv die Haut der ulnaren $1\frac{1}{2}$ Finger auf der palmaren Seite, die Haut der ulnaren $2\frac{1}{2}$ Finger auf der Rückseite (23).

2.2.2. Aufbau der peripheren Nerven (mikroskopische Anatomie)

Der periphere Nerv besteht aus gemischt motorischen, sensiblen, nozizeptiven und autonomen Nervenfasern, auch Axone genannt, Schwann-Zellen sowie Bindegewebe, die die Axone umhüllen und umgeben.

Die Schwann-Zellen bilden die Myelinscheide um die peripheren Axone. Diese dient dazu, das periphere Axon zu isolieren und die saltatorische Erregungsleitung zu ermöglichen, was die Erregungsleitungsgeschwindigkeit entlang des peripheren Nervs erheblich erhöht. Die Schwann-Zellen spielen auch eine wichtige und entscheidende Rolle bei der Nervenregeneration nach einer Verletzung des Nervs (75).

Das Axon und seine Schwann-Zellen-Umhüllung (bzw. Nervenfaser) wird von einer bindegewebigen Schicht umrahmt, dem Endoneurium. Mehrere durch das Endoneurium umhüllte Nervenfasern werden zu Bündeln, den Faszikeln, zusammengefasst. Jeder Faszikel ist von einer dreischichtigen getrennten kollagenen Schicht umhüllt. Diese Hülle wird Perineurium genannt. Als letzte Schicht (auch die äußere Hülle des peripheren Nervs) umhüllt das „Epineurium“ mehrere von Perineurium umgebene Faszikelgruppen (Nervenfaserstränge). Es besteht aus Kollagen- und elastischen Fasern, steht in Verbindung mit der Dura mater proximal und schützt die Nervenfasern sowie ermöglicht die Dehnungsfähigkeit des Nervs (18, 76).

2.3. Regeneration und Klassifikation der peripheren Nervenläsionen

Bei einer Nervenläsion kommt es je nach Verletzungsgrad vor der Nervregeneration zu unterschiedlichen Prozessen. Nach einer Axonotmesis findet die sog. Waller-Degeneration statt, hier degeneriert das verletzte Axon und die umgebende Myelinschicht distal der Verletzungsstelle anterograd. Der Abbau geschieht durch die Schwann-Zellen und phagozytierende Makrophagen. Der Erfolg der Regeneration wird stark von Verletzungsgrad und den dadurch verursachten degenerativen Veränderungen beeinflusst. (77).

Die Schwann-Zellen spielen nicht nur eine wichtige Rolle bei der Degeneration, sondern auch bei der Regeneration. Während der Degeneration produzieren die proliferierenden Schwann-Zellen Wachstumsfaktoren und Komponenten, die für die Regeneration erforderlich sind. (78). Nach Abschluss der Degeneration bleiben noch die Büngner-Bänder, lange Ketten aus kollabierten Schwann-Zellen, und die Hüllstrukturen übrig, um die axonale Reinnervation zu leiten (77). Die Reinnervation erfolgt durch neue Axon-Sprosse vom proximal nach distal mit einer Geschwindigkeit von 1mm bis 3mm pro Tag bis zum Zielorgan (24, 77).

Weltweit werden zwei Hauptklassifikationen für Nervenläsionen im Praxisalltag verwendet: die einfache Klassifikation nach Seddon und die ausführliche Klassifikation nach Sunderland (24, 77, 79). Beide Klassifikationen ordnen die Nervenverletzungen entsprechend ihrem Schweregrad ein (79).

Die Seddon-Klassifikation gliedert die Nervenverletzungen in drei Grade: Neurapraxie, Axonotmesis und Neurotmesis. Bei der Neurapraxie „Typ I“ kommt es zu Verlangsamung der Nervenleitung oder auch zu einer vorübergehenden lokalen Leitungsblockade des Nervs auf Grund einer Demyelinisierung. Die Nervenfaser und deren Hüllstrukturen sind hier nicht durchtrennt. Meist kommt es zu einer Neurapraxie durch eine Dehnungs- oder Kompressionsverletzung sowie ein stumpfes Trauma (80). Die Nervenläsionen mit einer Neurapraxie erholen sich spontan nach Wochen durch eine Remyelinisierung, sodass hier keine Waller-Degeneration auftritt (24, 79).

Beim zweiten Grad der Seddon-Klassifikation, Axonotmesis, besteht eine axonale Kontinuitätsunterbrechung ohne Unterbrechung bzw. Verletzung aller bindegewebigen Nervhüllschichten (Endoneurium, Perineurium und Epineurium). Klinisch führt eine Nervenläsion mit Axonotmesis zu einem kompletten Verlust der sensorischen und motorischen Funktion des Nervs. Bei der Axonotmesis tritt im Gegensatz zur Neurapraxie die Waller-Degeneration distal der Verletzung auf. Die erhaltenen Nervhüllen leisten bei der Regeneration des Nervs viel (24, 77, 79), somit ist die Wahrscheinlichkeit einer spontanen funktionellen Erholung hoch (77).

Die Neurotmesis beschreibt die komplette Durchtrennung, sowohl der Axone als auch deren umgebender bindegewebiger Hüllen, eines Nervs und ist der höchste Grad der Nervenläsionen (24, 79). Es kommt hier ebenfalls zu einem vollständigen Funktionsverlust des Nervs und eine spontane Heilung ohne chirurgischer Eingriff ist sehr unwahrscheinlich (77).

Sunderland teilt die Seddon-Klassifikation ausführlicher in fünf Grade ein. Grad I nach Sunderland-Klassifikation ist die Neuropraxie (Typ I nach Seddon). Grad II ist die Axonotmesis ohne Verletzung einer der drei Hüllstrukturen.

Der dritte Grad ist eine axonale Unterbrechung, Axonotmesis, mit Verletzung des Endoneuriums. Bei dem vierten Grad ist das Perineurium auch verletzt. Der fünfte Grad entspricht dem dritten Grad nach Seddon (Neurotmesis): eine komplette Durchtrennung des Nervs und seiner Hüllstrukturen (Endoneurium, Perineurium und Epineurium) (24, 77, 79).

Klassifikation	Seddon	Sunderland
Grad I	Neurapraxie	Neurapraxie
Beschreibung	Temporäre Funktionsstörung, keine dauerhafte Schädigung der Axone oder der umgebenden Gewebe.	Nur Myelinscheide betroffen, vollständige Erholung in Wochen.
Grad II	Axonotmesis	Axonotmesis
Beschreibung	Schädigung der Axone, jedoch keine Unterbrechung der umgebenden Hüllstrukturen.	Axone durchtrennt, Endoneurium intakt, Regeneration möglich, dauert Monate.
Grad III	Neurotmesis	Axonotmesis mit endoneuralem Schaden
Beschreibung	Komplette Durchtrennung des Nervs inklusive des umgebenden Bindegewebes.	Axone und Endoneurium geschädigt, Perineurium intakt, Regeneration dauert länger.
Grad IV	-	Axonotmesis mit perineuraler Schaden
Beschreibung	-	Axone, Endoneurium und Perineurium geschädigt, Epineurium intakt, schlechte Prognose ohne chirurgische Intervention.
Grad V	-	Neurotmesis
Beschreibung	-	Komplette Durchtrennung des Nervs inklusive des Epineuriums, sehr schlechte Prognose ohne chirurgische Intervention.

Tabelle 3 ist eine Zusammenfassung der Seddon- und Sunderland Klassifikationen

2.4. Diagnostik

Die Diagnose „Nervenläsion“ bei pädiatrischen Patienten kann eine Herausforderung im klinischen Alltag darstellen. Die Diagnose kann mit Hilfe von Anamnese, klinischer Untersuchung, Elektroneurografie und Bildgebung (Neurosonografie) festgestellt werden.

2.4.1. Anamnese und klinische Untersuchung

Die klinische Untersuchung sollte bei Kindern nach einer ausführlichen Anamnese mit der Beobachtung des betroffenen Armes begonnen werden, um festzustellen wie das Kind die obere Extremität spontan bewegt und nutzt. Dabei sind insbesondere die Integration der betroffenen Hand in Aktivitäten, bevorzugte Greifmuster sowie die allgemeine Haltung und das Erscheinungsbild der Hand zu beachten, da diese wichtigen Hinweise auf mögliche Nervenbeeinträchtigungen liefern (24, 81).

Zu den klinischen Beschwerden einer peripheren Nervenverletzung gehören Missemmpfindungen, Taubheitsgefühl, Muskelschwäche, Lähmungen, Funktionsausfälle, Hyperthermie und trockene Haut an der verletzten Extremität sowie Schmerzen. Dabei treten Schmerzen bei Kindern seltener auf, insbesondere nicht bei vollständiger Durchtrennung des Nervs (24).

Eine klinische Untersuchung der peripheren Nerven, die bei Nervenverletzungen oder -kompression maßgeblich ist, ist das Hoffmann-Tinel-Zeichen. Es wird durch Klopfen auf den betroffenen Nerv ausgelöst, was bei Vorliegen einer Nervenschädigung zu einem elektrisierenden Schmerz an der Stelle der Läsion des Nervs führt (82, 83).

Die Läsion eines peripheren Nervs der oberen Extremität führt, je nach Verletzungsstelle, zu typischen klinischen Erscheinungsbildern. Die proximale und mittlere Läsion des N. radialis kann zum motorischen Ausfall des M. triceps brachii, hier vor allem bei Läsion im Bereich der Axilla vor dem Austritt des R. muscularis, zum Ausfall der gesamten Hand- und Fingerstrecker-Muskulatur sowie des M. abductor pollicis longus führen. Klinisch kann sich diese Läsion als Fallhand manifestieren. Die Sensibilitätsausfälle des N. radialis betreffen sein autonomes Versorgungsgebiet in der ersten Zwischenfingerfalte und an der dorsalen Seite des ersten bis dritten Fingers sowie am radialen Handrücken (22, 82).

Eine Nervenläsion des N. medianus proximal führt zur sog. Schwurhand. Bei einer Schwurhand kann die betroffene Person ihre Finger nicht vollständig beugen, insbesondere den Daumen, den Zeigefinger und den Mittelfinger. Wenn sie versuchten, eine Faust zu machen, bleiben diese Finger gestreckt, während der Ring- und der kleine Finger gebeugt sind, weil die Beugemuskeln der Ring- und Kleinfinger (Flexor digitorum profundus D IV und D V) durch den Nervus ulnaris innerviert werden. Diese Nervenschädigung führt auch zu Sensibilitätsstörungen und einem Verlust der Feinmotorik im Versorgungsgebiet des N. medianus, was alltägliche Handgriffe stark beeinträchtigen kann. Im Gegensatz zu den proximalen Verletzungen des N. medianus kommt es bei der distalen Nerv-Verletzung nur zu Sensibilitätsausfällen ohne das typische Erscheinungsbild „Schwurhand“ (22, 82).

Das charakteristische klinische Bild einer Verletzung des N. ulnaris mit motorischem Ausfall ist die sog. Krallenhand. Dabei sind die Grundgelenke der Finger überstreckt und die Mittel- und Endgelenke der Finger durch den Ausfall der Mm. interossei gebeugt, was der Hand das Aussehen einer Kralle verleiht. Die Krallenstellung des zweiten und dritten Fingers ist durch die Teilinnervation durch den N. medianus weniger ausgeprägt. Ein weiteres Zeichen einer motorischen Läsion des N. ulnaris ist der Ausfall des M. adductor pollicis, der durch das Froment-Zeichen festgestellt werden kann. Hier wird der Patient gebeten, ein Blatt Papier zwischen Daumen und Zeigefinger zu halten, wobei der Daumen gestreckt bleibt. Beim Ausfall des medianus-innervierten M. adductor pollicis beugt der Patient den Daumen als Kompensation mit Hilfe des M. flexor pollicis longus, um das Papier festzuhalten. Ein weiteres klinisches Zeichen einer Verletzung des Nervs ist nach längerer Zeit die Atrophie der Mm. interossei. Die Sensibilitätsausfälle des N. ulnaris manifestieren sich typischerweise am Kleinfinger, an der ulnaren palmaren Hälfte des Ringfingers mit der Handfläche und an der ulnaren Seite des Handrückens sowie an der Haut über dem Kleinfinger bis zum ulnaren Teil des Mittelfingers (22, 82).

2.4.2. Sonografie

Die Bedeutung der Nervensonografie nimmt im Diagnostikverfahren der Nerventraumatologie im klinischen Alltag immer mehr zu (83). Bei guter sonografischer Auflösung bietet die Nervensonografie wichtige Informationen zur Struktur des peripheren Nervensystems, zur präzisen Lokalisierung pathologischer Veränderungen und häufig auch zur Ursache von Nervenschädigungen (84). Trotz guter Diagnostik der Nervensonografie sollte auf einer klinischen Untersuchung nicht verzichtet werden (84).

Es gibt verschiedene sonografische Kriterien für die Beurteilung einer traumatischen Nervenverletzung wie Verlust der Kontinuität bei Darstellung von zwei Nervenstümpfen und fusiforme Schwellung mit hypoechogener Echotextur (83). Mittels der Sonografie kann vor allem bei schweren Nervenläsionen zwischen Verletzungen Grad IV und Grad V nach Sunderland unterschieden werden. Eine Nervenverletzung fünften Grades kann durch eine Kontinuitätsunterbrechung oder im späteren Stadium durch die Darstellung eines Neuroms, entsprechend einer echoarmen oder teils echogenen runden Masse, am proximalen Nervenstumpf festgestellt werden. Eine Verletzung vierten Grades kann im Verlauf durch die Bildung eines Kontinuitätsneuroms bei intaktem Epineurium erkannt werden (83, 84).

2.4.3. Neurophysiologische Diagnostik

Neurophysiologische Untersuchungen, wie Elektromyografie (EMG) und Elektroneurografie, sind ein wichtiger Bestandteil der Diagnostik von Nervenläsionen. Sie liefern Informationen über die Pathophysiologie, den Schweregrad, die prognostische Einschätzung sowie das Alter und die Lokalisation der Nervenverletzung. Die optimalen Untersuchungszeitpunkte sind ca. drei Wochen posttraumatisch.

Die EMG misst die elektrische Aktivität von Muskeln. Dabei werden kleine Nadeln in die Muskulatur eingeführt, um elektrische Signale während der Muskelkontraktion und in Ruhe zu erfassen. Dadurch können die Schädigung lokalisiert, die Prognose abgeschätzt und der Verlauf beurteilt werden (88).

Die zweite neurophysiologische Untersuchung ist die Neurografie, auch als Nervenleitgeschwindigkeitsmessung bekannt. Dabei werden elektrische Impulse an den Nerven gesendet, um deren Reizleitungsgeschwindigkeit und Reaktion zu messen, sowohl distal als auch proximal der Verletzungsstelle (88).

2.5. Therapie der Nervenläsion (Chirurgisch/Konservativ)

Bei der Entscheidung zwischen konservativer und operativer Behandlung von Nervenverletzungen im Kindesalter spielen mehrere Faktoren eine wesentliche Rolle, darunter die Frage, ob die Läsion iatrogen oder posttraumatisch entstanden ist sowie der Schweregrad der Verletzung (89). Im Allgemeinen erholen sich die Kinder nach einer Nervenverletzung und deren Behandlung deutlich besser als Erwachsene. Das liegt unter anderem daran, dass ihre Nervenfasern kürzere Strecken zurücklegen müssen, um geschädigte Bereiche zu erreichen. Zudem ist das Gehirn von Kindern anpassungsfähiger, was die Wiederherstellung sensorischer und motorischer Funktionen erleichtert. Mit zunehmendem Alter nimmt diese Fähigkeit jedoch ab, insbesondere nach dem 10. Lebensjahr (84).

In der Literatur gibt es unterschiedliche Ansätze zum Umgang mit Nervenverletzungen bei Kindern nach einem Trauma. In vielen Fällen wird eine spontane Erholung der Nervenfunktion innerhalb von bis zu sechs Monaten durch Abwarten erreicht, sogar bei iatrogenen Verletzungen, wie zum Beispiel einer Nervenschädigung durch die Perforation mit einem K-Draht (85-87). Andere Studien empfehlen hingegen eine chirurgische Exploration und Dekompression des Nervs nach einer iatrogenen Läsion (87).

Nach einer operativen Therapie der SCHF sollte der neurologische Status der betroffenen oberen Extremität erneut durch eine klinische Untersuchung überprüft werden, bei der die Sensibilität und Motorik aller drei Hauptherven (N. ulnaris, N. radialis und N. medianus) beurteilt wird. Wird postoperativ eine neue, iatogene Nervenläsion festgestellt, besteht die Indikation für eine operative Revision mit Darstellung des betroffenen Nervs (89, (87). Bei einer Drahtperforation wird empfohlen, den Draht neu zu positionieren (90), und bei einer Nervkompression sollte eine Neurolyse durchgeführt werden (89).

Bei einer bereits präoperativ bekannten Nervenläsion und einer postoperativen Verschlechterung des neurologischen Befunds wird ebenfalls eine operative Revision empfohlen (90). Im Falle gleichgebliebener neurologischer Ausfälle sollte eine regelmäßige klinische Verlaufskontrolle in vierwöchigen Abständen bis zur kompletten Remission erfolgen. Bleibt die Nervenläsion nach acht Wochen unverändert, sind weiterführende diagnostische Maßnahmen wie Elektromyografie (EMG), Neurografie und Sonografie erforderlich (86). Zeigt sich hier eine Verletzung Grad I (Neurapraxie)

mit Leitungsblock, kann eine konservative Therapie mit Abwarten und regelmäßigen Kontrollen weitergeführt werden. Ergo-, Physiotherapie und elektrische Muskelstimulationen sollten zur Unterstützung der konservativen Therapie, v. a. bei niedrigem Verletzungsgrad des Nervs, in Betracht gezogen werden. Bei persistierenden Beschwerden für weitere zwei Monate soll eine operative Exploration bei Verdacht auf permanente Druckeinwirkung erfolgen (90).

Zeigt sich in der weiteren Diagnostik eine axonale Schädigung, kann ebenfalls zunächst eine konservative Therapie fortgeführt werden. Allerdings ist auf den Reinnervationszeitraum zu achten, denn bei Überschreiten des festgelegten Reinnervationszeitpunkts sollte der betroffene Nerv operativ dargestellt und die Ursache behoben werden (87, 88). Zeigt die Bildgebung eine vollständige Durchtrennung des peripheren Nervs (Neurotmesis), so ist eine operative Behandlung indiziert (89).

Wird bei der operativen Revision bzw. Exploration ein mechanischer Druck auf den betroffenen peripheren Nerv ohne Eröffnung des Epineuriums entfernt, spricht man von einer Dekompression oder externen Neurolyse. Im Gegensatz dazu bezeichnet die innere Neurolyse die mikrochirurgische Präparation zwischen den Faszikelbündeln, die mit einer Epineuriotomie oder Epineuriektomie kombiniert wird (89).

Liegt eine vollständige Nervendurchtrennung (Neurotmesis) vor, wird der Nerv komplett dargestellt. Bei einer kurzen Distanz zwischen den Nervstümpfen wird die Nervenkontinuität durch eine spannungsfreie End-zu-End-Naht wiederhergestellt. Ist der Abstand jedoch zu groß und eine spannungsfreie Naht nicht möglich, sollte in einem späteren Eingriff (sekundär) eine Nerventransfer durchgeführt werden (86, 89).

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Patienten

Die Daten wurden retrospektiv über eine Procedurensuche und Diagnosensuche in den Klinikdatenbanken der Universitätsklinik Mannheim erhoben. Dabei wurden Patienten identifiziert, die im Zeitraum von 2013 bis 2017 in der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie aufgrund einer suprakondylären Humerusfraktur entweder konservativ oder operativ stationär behandelt wurden. Einschlusskriterien waren somit die Diagnose einer suprakondylären Humerusfraktur und die stationäre Aufnahme in der kinderchirurgischen Klinik der Universitätsklinik Mannheim im genannten Zeitraum. Patienten, die ambulant behandelt wurden, sowie solche mit anderen Ellenbogenfrakturen bzw. ellenbogennahen Frakturen wurden ausgeschlossen.

Tabelle 4 bietet eine Übersicht zu den Ein- und Ausschlusskriterien der Patienten:

Einschlusskriterien
Kinderchirurgische Patienten (Alter: 0 Jahre bis 18 Jahre)
Stationäre Aufnahme in der kinderchirurgischen Klinik der Universitätsklinik Mannheim
Behandlungszeitraum: Zwischen 2013 und 2017
Ausschlusskriterien
Ambulante Behandlung der SCHF
Andere Ellenbogenfraktur bzw. ellenbogennahe Fraktur (außer SCHF)

2.2 Datenerhebung

Die Daten wurden über das SAP-System (Klinikinformationssystem) erhoben. Es wurden Dokumente der eingeschlossenen Patienten gesichtet. Von besonderer Relevanz waren die Arztbriefe, die Ambulanzbriefe, Befunde, Ambulanznotizen und ggf. die OP-Berichte. Alle relevanten Daten wurden in anonymisierter Form in einer Excel Tabelle (Microsoft Excel Office) festgehalten, wobei während des gesamten Prozesses die Einhaltung des Datenschutzes sichergestellt wurde.

2.2.1 Erhobene Daten

- Geburtsdatum
- Geschlecht
- Alter zum Zeitpunkt des Traumas
- Frakturtyp nach von Laer
- Behandlungsart der SCHF (konservativ oder chirurgisch)
- Art der Osteosynthese und Anzahl der eingebrachten K-Drähte
- Neurologischer Befund prä- und postoperativ
- Der betroffene Nerv
- Diagnostik der Nervenläsion
- Behandlungsart der Nervenläsion
- Zeit bis Restituta ad integrum der Nervenläsion

2.2.2 Datenbearbeitung und statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Medizinische Statistik der medizinischen Fakultät Mannheim. Zur Berechnung und Analyse wurde die statistische Analysesoftware SAS genutzt. Dabei wurden für qualitative Merkmale absolute und relative Häufigkeiten berechnet, während für quantitative Merkmale statistische Maßzahlen ermittelt wurden. Um Beziehungen zwischen den Merkmalen zu überprüfen, kamen verschiedene statistische Tests zum Einsatz.

Die Überprüfung von Häufigkeiten erfolgte mittels Chi-Quadrat-Test. Bei sehr kleinen Fallzahlen wurde Fishers exakter Test angewendet. Nominal skalierte Merkmale wurden über eine Vierfeldertafel analysiert, wobei abhängig von den erwarteten Häufigkeiten entweder der Chi-Quadrat-Test oder, bei weniger als fünf erwarteten Häufigkeiten, Fishers exakter Test automatisch berechnet wurde. Darüber hinaus wurde zur Analyse zeitabhängiger Ereignisse die Kaplan-Meier-Kurve verwendet.

3 ERGEBNISSE

3.1 Allgemein/Epidemiologie/Patientenkollektiv

Die Auswertung der Daten erfolgte bei den Kindern, die stationär zwischen den Jahren 2013 und 2017 bei suprakondylären Humerusfraktur in der kinderchirurgischen Abteilung der Universitätsklinik Mannheim eine Behandlung erhielten. Es wurden in diesem Zeitraum insgesamt 126 Kinder mit SCHF stationär sowohl operativ als auch konservativ behandelt.

3.1.1 Alter- und Geschlechtverteilung

Die Mehrheit der verletzten Kinder waren Jungen. Von 126 Patienten waren insgesamt 76 Jungen (60%) und 50 Mädchen (40%) betroffen (siehe Abbildung 10).

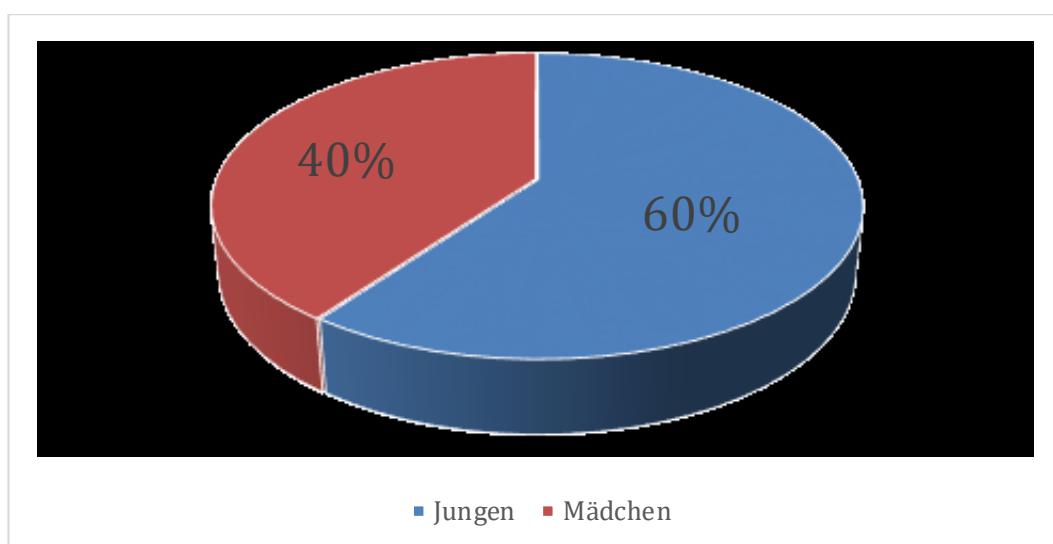


Abb. 10: Geschlechterverteilung der suprakondylären Humerusfraktur

Das Alter der Patienten lag am Aufnahmetag zwischen 4 Monaten und 14 Jahren. Der Mittelwert lag bei 6,06 ($\pm 2,65$) Jahren. Der Medianwert lag bei 6 Jahren. Das Durchschnittsalter in Monaten lag bei 78,06 ($\pm 31,06$). Das durchschnittliche Alter der Jungen betrug 6,4 Jahre, bei Mädchen lag der Wert im Gegensatz dazu bei 5,5 Jahren. Der Median lag bei 6 Jahren.

3.1.2 Seitenvergleich

Mehr als die Hälfte der Frakturen betrafen den linken Arm. 70 Kinder (55,6%) zogen sich eine SCHF des linken Armes und 56 (44,4%) eine SCHF des rechten Armes zu. Sowohl bei den Jungen als auch bei den Mädchen war der linke Arm häufiger betroffen.

3.1.3 Frakturklassifikation

Die Einteilung der SCHF erfolgte radiologisch durch Röntgenbilder nach der Einteilung nach von Laer. Mehr als die Hälfte der behandelten Kinder hatten eine suprakondyläre Humerusfraktur Typ IV nach v. Laer.

53.17% der Frakturen wurden als Typ IV, 37.30% als Typ III, 6.35% als Typ II und 3.17% als Typ I klassifiziert, wie in Abbildung 12 illustriert.

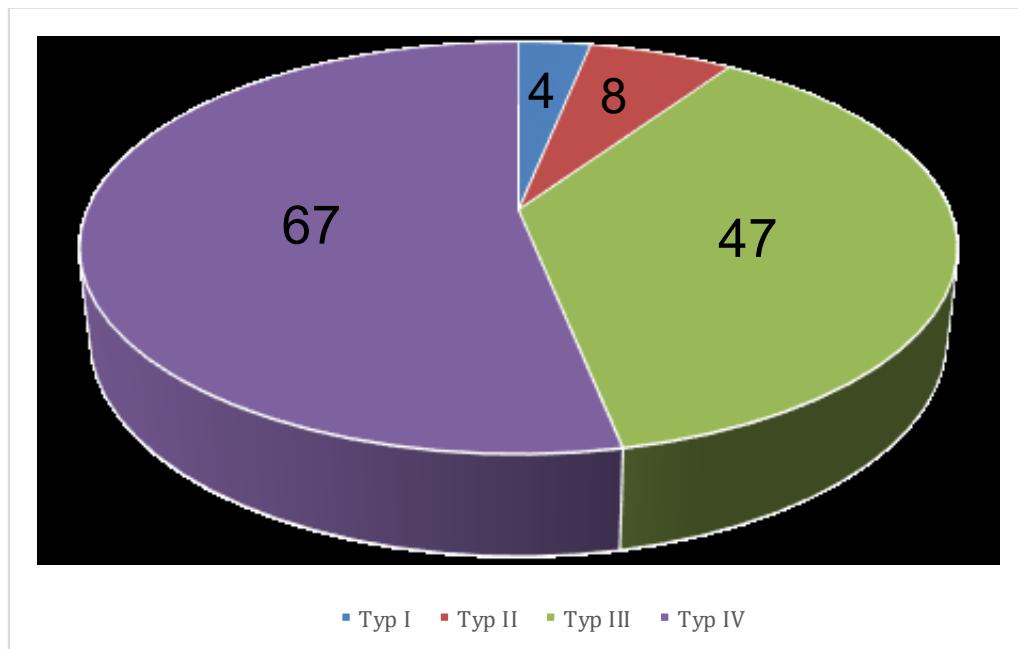


Abb. 11: Frakturklassifikation nach von Laer

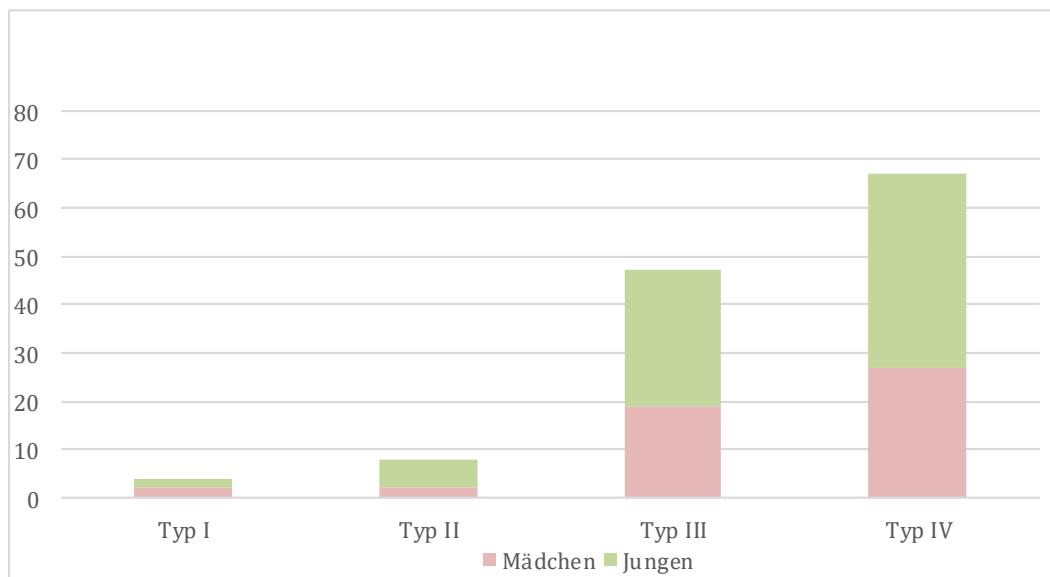


Abb. 12: Frakturklassifikation- und Geschlechterverteilung

Abbildung 12 zeigt die Geschlechterverteilung im Verhältnis zur Frakturklassifikation. Wie hier ersichtlich sind die Jungen (bis auf Typ I) bei allen Typen in der Überzahl.

3.1.4 Stationäre Aufnahme

Bei der Notwendigkeit einer chirurgischen Behandlung sowie kompliziertem Verlauf wies die Mehrheit der stationär behandelten Kinder eine SCHF Typ IV nach v. Laer auf. Zwei der vier Kinder mit dem Typ I nach v. Laer wurden aufgrund eines Schädel-Hirn-Traumas stationär zur neurologischen Überwachung aufgenommen. Bei den restlichen zwei Patienten war die Indikation zur stationären Aufnahme die intraoperative Versorgung von Begleitverletzungen.

Bei vier Kindern erfolgte die Anlage einer Blount-Schlinge nach Reposition unter Analgosedierung. Daraufhin war die stationäre Aufnahme zur Kreislaufüberwachung und Schmerztherapie erforderlich. Drei dieser Kinder hatten eine Fraktur Typ II und ein Kind eine Fraktur Typ III. Bei der Mehrheit betrug der stationäre Aufenthalt ein Tag.

3.1.5 Operative und konservative Therapie der SCHF

OP-Indikationen der SCHF sind Typ III und Typ IV Frakturen, sowie die ausbleibende Redression bei konservativer Behandlung mittels Blount-Schlinge bei Typ II Frakturen. Von allen Patienten, die zwischen 2013 und 2017 in der Klinik für Kinderchirurgie der Universitätsmedizin Mannheim aufgrund einer SCHF stationär behandelt wurden, erhielten insgesamt acht Patienten eine konservative Therapie. Sieben von ihnen wurden mit einer Blount-Schlinge, auch Collar and Cuff Verband genannt, versorgt, ein Patient mit einer Oberarmschiene. Von den vier Patienten mit einer Fraktur Typ I bekamen drei Patienten eine Blount-Schlinge und ein Patient eine Oberarmschiene. Die drei Patienten mit einer Fraktur Typ II bekamen alle eine Blount-Schlinge. Ein Patient hatte Fraktur Typ III und bekam ebenfalls eine Blount-Schlinge. Die Dauer der Ruhigstellung mit der Blount-Schlinge betrug drei Wochen.

Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt, dass insgesamt acht Patienten zwischen 2013 und 2017 in der Kinderchirurgie der Universitätsmedizin Mannheim konservativ behandelt wurden, entweder mit einer Blount-Schlinge oder einer Oberarmschiene:

Frakturtyp	Gesamtanzahl der Patienten	Blount-Schlinge	Oberarmschiene
Typ I	4	3	1
Typ II	3	3	0
Typ III	1	1	0

Tabelle 5: Anzahl der konservativ behandelten Patienten nach Frakturtyp

Die restlichen 118 Patienten wurden operativ versorgt. Kein Patient mit einer Fraktur vom Typ I wurde operativ behandelt. Fünf Patienten mit einer Fraktur vom Typ II wurden jedoch operativ versorgt: Bei fünf der acht Patienten mit einer SCHF Typ II nach v. Laer wurde nach initialer konservativer Therapie bei ausbleibender Reposition mit einer perkutanen gekreuzten K- Draht- Osteosynthese geschlossen reponiert.

Von diesen 118 Patienten hatten 46 eine Fraktur vom Typ III. Am häufigsten wurden Patienten mit einer Fraktur Typ IV operativ behandelt. Insgesamt wurden 67 Patienten mit einer Fraktur Typ IV operiert (s. Abb. 13).

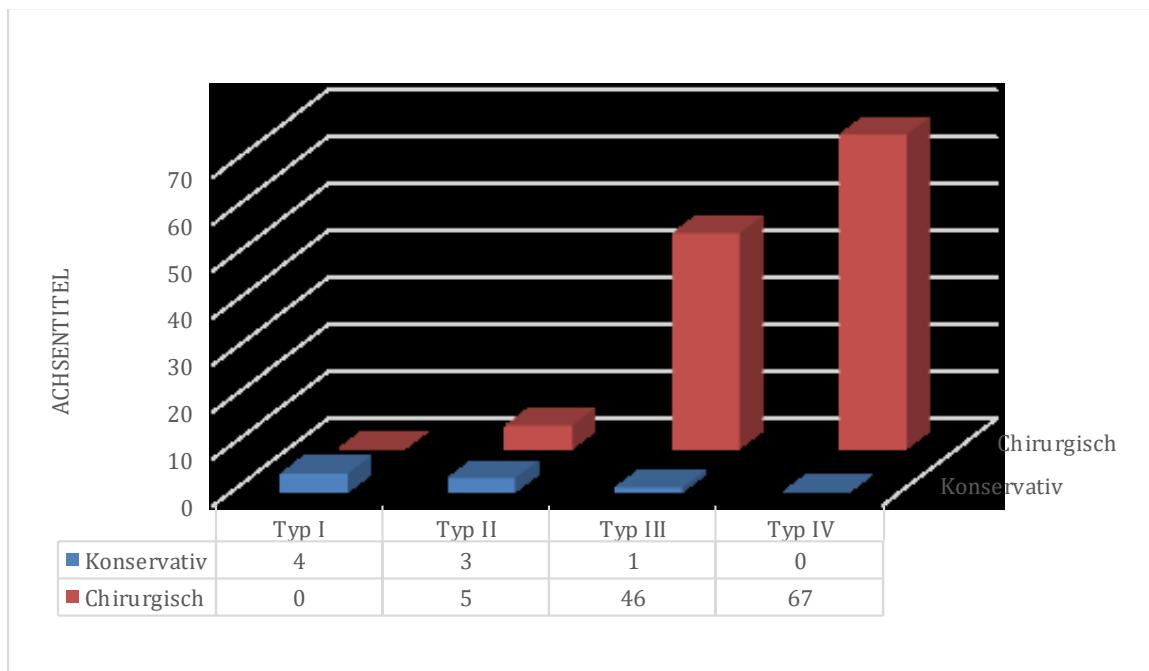


Abb. 13 illustriert die Verteilung der Patienten nach konservativer und operativer Behandlung

In 102 Fällen (86,5 %) wurde eine geschlossene Reposition mit gekreuzter Kirschner-Draht-Osteosynthese durchgeführt. Die offene Reposition mit perkutaner Kirschner-Draht-Osteosynthese kam in 16 Fällen (13,5 %) vor.

Bei der Mehrheit der operativ versorgten Frakturen mit K-Draht-Osteosynthese kamen zwei gekreuzte K-Drähte zum Einsatz (95 %), einer von der ulnaren und einer von der radialen Seite. Sechs Frakturen mit Typ III und IV nach v. Laer wurden mit drei K-Drähten stabilisiert, davon zwei durch eine geschlossene Reposition. Eine suprakondyläre Humerusfraktur vom Typ IV nach v. Laer links wurde mittels K-Drähten offen reponiert und retiniert.

Postoperativ erhielten alle Kinder eine Oberarmschiene, die durchschnittlich für drei bis vier Wochen belassen wurde.

3.2 Nervenschäden

Im betrachteten Patientenkollektiv trat bei den acht Kindern mit konservativer Behandlung durch Cuff-and-Collar-Verband keine Nervenschäden auf. Insgesamt zeigte sich bei 26 Kinder (22%) der 118 operierten Patienten präoperativ und/oder postoperativ ein neuronales Defizit.

3.2.1 Präoperative Nervenläsion

Präoperativ hatten 14 Kinder (11,8%) der 118 operativ versorgten Kinder neurologische Ausfälle. Davon hatten 10 Kinder (8,5%) rein sensible Ausfälle, ein Kind (0,8%) rein motorische Ausfälle sowie drei Kinder (2,5%) kombinierte Ausfälle. 2 der 10 Kinder mit präoperativ rein sensiblem Ausfall zeigten postoperative keine Auffälligkeiten (s. Tabelle 6).

	Sensible	Motorische	Kombiniert
Anzahl der Kinder	10	1	3

Tabelle 6: Übersicht der präoperativen neurologischen Ausfälle nach Art des Ausfalls

3.2.2 Postoperative Nervenläsion

Wie aus Tabelle 7 hervorgeht, wiesen 26 Patienten (22%) von den 118 operierten Patienten mit einer SCHF postoperativ neurologische Ausfälle auf. Elf Kinder (9,3%) zeigten rein sensible Ausfälle und lediglich ein Kind (0,84%) hatte postoperativ einen isolierten motorischen Ausfall. Bei einer Betrachtung der präoperativen und postoperativen Nervenläsionen fällt auf, dass die Anzahl der Patienten mit kombinierter Nervenläsion postoperativ deutlich höher war. Insgesamt zeigten nämlich 14 der 23 Kinder einen sensiblen und motorischen Ausfall. Bei zwei Patienten war die präoperative Überprüfung der peripheren Durchblutung, Motorik und Sensibilität nicht möglich.

	Sensible	Motorische	Kombinierte
Anzahl der Kinder	11	1	14

Tabelle 7: Übersicht der postoperativen neurologischen Ausfälle nach Art des Ausfalls

3.2.3 iatrogene Verletzungen

Bei einer neu aufgetretenen postoperativen Nervenläsion spricht man von einer iatrogenen Verletzung. Zwei der 14 Kinder mit einem neurologischen Defizit vor der Operation zeigten postoperativ keine neurologischen Ausfälle mehr. Die zwei Patienten hatten präoperativ eine rein sensible Störung. Die restlichen 12 Kinder wiesen postoperativ weiterhin Nervenläsionen auf. Eine neue postoperative Nervenläsion zeigte sich bei 14 (11,8%), davon war die pDMS bei zwei Kindern präoperativ nicht prüfbar. Davon hatten drei Kinder eine Sensibilitätsstörung und 11 Kinder einen kombinierten neurologischen Ausfall, entsprechend 9,3% des gesamten Patientenkollektivs.

Bei sechs Kindern mit iatrigerer Nervenverletzung bestand eine SCHF Typ III nach v. Laer. Acht Kinder hatten eine Fraktur Typ IV nach v. Laer.

In zehn Fällen wurde eine geschlossene Reposition mit perkutan, gekreuzter K-Drahtosteosynthese durchgeführt. Bei vier Patienten erfolgte eine offene Reposition nach einem Fehlversuch der Reposition der Fraktur durch geschlossene Reposition. Bei 12 Kindern erfolgte die Osteosynthese mittels zwei K-Drähten. Bei zwei offenen Repositionen wurden einmal drei K-Drähte und einmal lediglich vier K-Drähte benötigt.

3.2.4 Nerven je nach Verteilung (N. ulnaris, radialis, medianus)

Bei den 14 Patienten mit iatrogenen bzw. sekundären Nervenverletzungen kam es zu 16 Nervenschäden. Insgesamt war der N. ulnaris 11-mal, N. radialis dreimal und der N. medianus zweimal betroffen (siehe Abbildung 14).

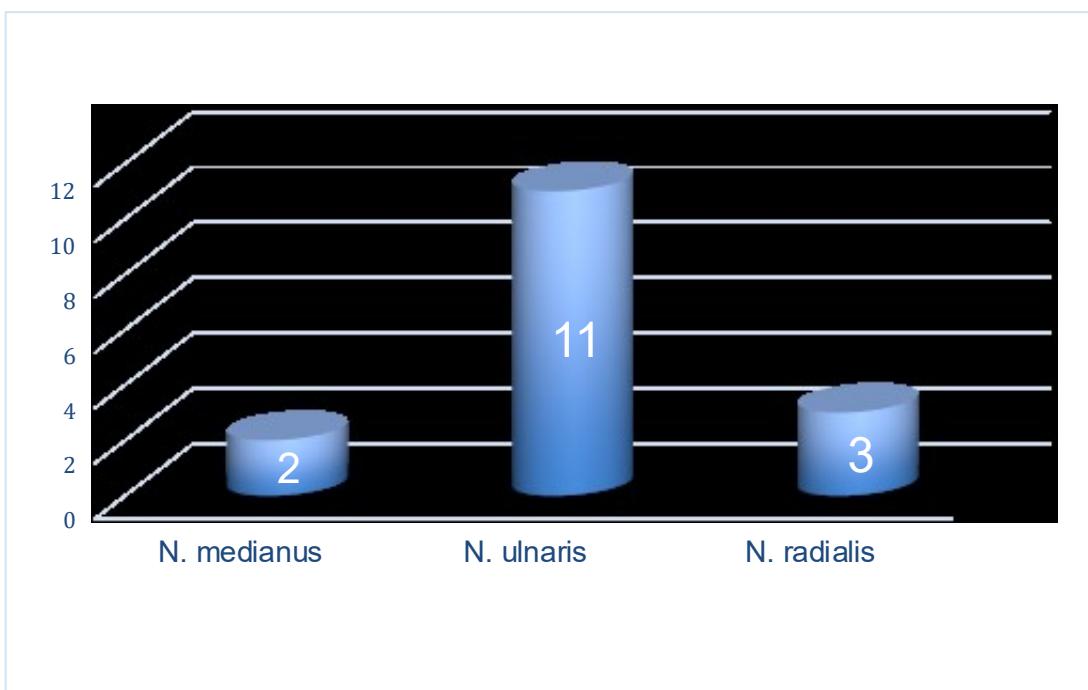


Abb.14: Anzahl der betroffenen Nerven bei iatrogenen Nervenverletzungen

Die Läsion des N. ulnaris war in neun Fällen isoliert, bei zwei Kindern bestand eine kombinierte Nervenläsion, einmal N. ulnaris mit N. radialis und N. ulnaris mit N. medianus. In einem Fall trat ein isolierter N. radialis Ausfall auf. Ein isolierter Ausfall des N. medianus trat ebenfalls einmal auf.

Bei der isolierten Läsion des N. radialis bestand ein rein motorischer Ausfall. In beiden Fällen mit kombinierter Nervenläsion hatten die Kinder sowohl einen motorischen als auch einen sensiblen Ausfall. Bei der isolierten Verletzung des N. medianus kam es zu einem motorischen und sensiblen Ausfall, was am wahrscheinlichsten für eine Einklemmung des Nervs spricht. Drei der neun Kinder mit Läsion des N. ulnaris litten an einem rein sensiblen Ausfall im Innervationsgebiet des Nervs und sechs Kinder hatten einen kombinierten (motorisch und sensiblen) Ausfall.

3.2.5 Diagnostik der Nervenläsion

Neben der klinischen Untersuchung wurde eine Nervensonografie zur weiteren Diagnostik der Nervenläsionen bei sieben Kindern mit einer Nervenläsion durchgeführt. Drei der sieben Kinder wiesen präoperativ eine Nervenverletzung auf, drei weitere Kinder litten an einer iatrogenen Nervenverletzung. Bei einem Patienten war eine klinische Untersuchung präoperativ nicht möglich, jedoch traten postoperativ neurologische Auffälligkeiten auf.

Die Nervensonografie bei Kindern mit frakturbedingten Nervenläsionen zeigte eine partielle Axonotmesis. Bei dem Kind, bei dem der neurologische Status präoperativ nicht erfasst werden konnte, wurde sonografisch eine Neurapraxie des Nervus medianus diagnostiziert.

Bei Kindern mit iatrogenen Nervenverletzungen ergab die Nervensonografie bei allen drei eine Durchspießung des Nervus ulnaris. Zudem wurde bei einem dieser Kinder eine zusätzliche Verletzung des Nervus radialis festgestellt, die durch eine Einklemmung im Frakturspalt verursacht war. Diese drei Kinder wurden operativ behandelt und erhielten postoperativ neurosonografische Verlaufskontrollen.

Bei dem ersten Kind zeigte sich keine Kontinuitätsunterbrechung des Nervs. Beim zweiten Kind wurde eine kurzstreckige, deutliche Aufweitung des gesamten Nervenquerschnitts festgestellt, ohne Hinweise auf die Entwicklung eines Neuroms oder eine Kontinuitätsunterbrechung. Die Nervensonografie des dritten Kindes ergab eine Axonotmesis, wobei im Verlauf ein Verdacht auf eine Diskontinuität des Nervus radialis bestand, sodass eine erneute Revision erfolgte. Intraoperativ wurde der sonografische Befund bestätigt; es zeigte sich eine segmentale, unvollständige Nekrose des N. radialis, woraufhin nach einer Segmentresektion eine Transplantation durchgeführt wurde.

Im Rahmen der weiterführenden diagnostischen Abklärung von Nervenläsionen wurden neben der klinischen Untersuchung und der Nervensonografie auch neurophysiologische Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund einer schlechten Compliance der Kinder musste die Untersuchung bei drei Patienten abgebrochen werden, sodass nur bei vier Kindern eine Neurografie durchgeführt werden konnte.

3.2.6 Therapie der Nervenläsion

Das in der Abbildung 15 dargestellte Schema beschreibt ein strukturiertes Behandlungskonzept zur Bewertung und Therapie von Nervenverletzungen basierend auf präoperativen und postoperativen neurologischen Befunden. Das Konzept unterteilt sich in drei Hauptkategorien: präoperative regelrechte Befunde, präoperative pathologische neurologische Befunde und unklare Befunde.

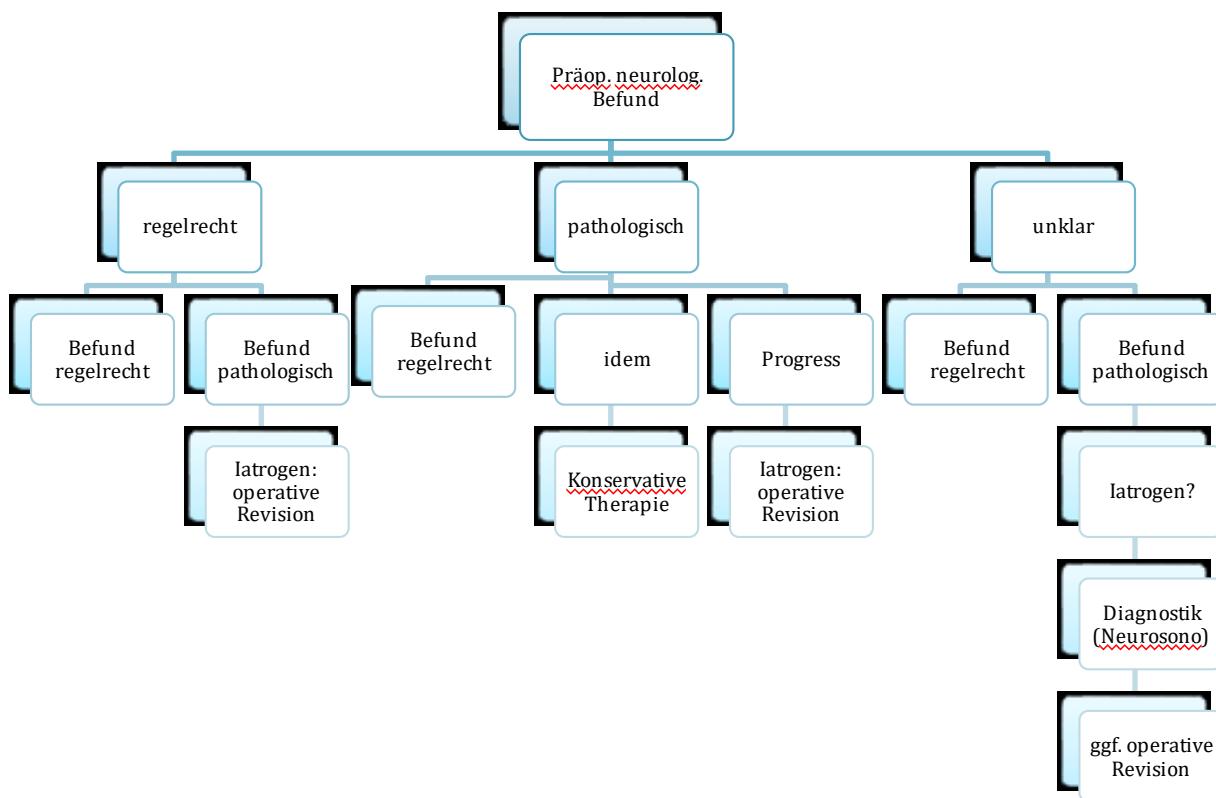


Abb. 15: Behandlungsschema der Nervenläsion in der kinderchirurgischen Klinik Mannheim

Bei präoperativem regelrechtem Befund und postoperativem pathologischem Befund wird hier von einer iatrogenen Ursache ausgegangen. In diesem Fall ist eine operative Revision erforderlich.

Bei einem präoperativ pathologischen Befund und einem unveränderten postoperativen Befund (idem) wird eine konservative Therapie angestrebt. In Fällen einer Verschlechterung (Progression) wird eine iatrogene Ursache angenommen, und die Nervenverletzung wird ebenfalls durch eine operative Revision behandelt.

Besteht eine postoperative neurologische Auffälligkeit bei einem unklaren präoperativen neurologischen Befund, wie in der letzten Kategorie, wird zunächst eine iatrogene Ursache geprüft. Hierzu erfolgt eine weiterführende Diagnostik (wie Nervensonografie, Neurografie und EMG). Basierend auf den diagnostischen Ergebnissen wird die Entscheidung zur weiteren Therapie getroffen.

Insgesamt wurden 26 Kinder nach der Frakturversorgung mit einer Nervenläsion in der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie behandelt. Davon waren 14 Kinder mit iatrogener Nervenläsion und 12 Kinder mit frakturbedingter Nervenläsion. Bei zwei Kindern mit präoperativen Sensibilitätsstörungen verbesserten sich die Beschwerden vollständig nach der operativen Therapie der SCHF.

Von den 26 behandelten Kindern wurden 16 Patienten (61,5 %) konservativ therapiert. Darunter befanden sich drei Kinder (11,5 %), die nur durch Abwarten ohne weitere therapeutische Maßnahmen behandelt wurden (s. Abb. 16). Die restlichen 13 Patienten (50%) erhielten konservative Behandlungsmaßnahmen wie Physiotherapie, Ergotherapie, transkutane elektrische Nervenstimulation (TENS) und die Anwendung einer Radialis-Lagerungsschiene.

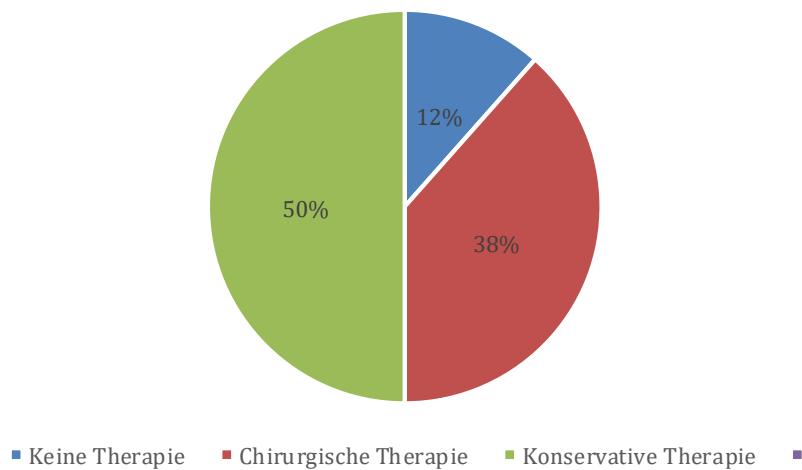


Abb. 16: Die Häufigkeitsverteilung der Behandlung der Nervenverletzung

Elf Patienten wiesen nicht-iatrogene Nervenläsionen auf, während bei fünf Kindern iatrogene Nervenverletzungen diagnostiziert wurden. Sieben Patienten (26,9 %) erhielten eine kombinierte Therapie aus Physio- und Ergotherapie. Zwei Kinder wurden ausschließlich physiotherapeutisch behandelt. Zwei weitere Kinder wurden mit einer Radialis-Lagerungsschiene und TENS versorgt, wobei eines dieser Kinder zusätzlich Physio- und Ergotherapie erhielt (s. Tabelle 8).

Behandlungsart	Anzahl der Patienten
Kombinierte Therapie (Physio- und Ergotherapie)	7
Ausschließlich Physiotherapie	2
Radialis-Lagerungsschiene	2
TENS	2

Tabelle 8: Anzahl der Patienten bei der jeweiligen Behandlungsart

Von den 16 konservativ behandelten Patienten litten 15 Kinder an einer Fraktur Typ IV nach von Laer, ein Kind an einer Fraktur Typ-III nach von Laer.

Die übrigen zehn Patienten (38,5%) mit Nervenläsionen erhielten eine chirurgische Therapie. Die Mehrheit, bestehend aus neun Kinder, hat eine iatrogene Nervenverletzung, während lediglich ein Kind an einer frakturbedingten Nervenläsion litt. Sieben der neun Kinder hatten sensible und motorische Ausfälle, während die restlichen zwei Kinder mit iatrogener Nervenverletzung ausschließlich einen rein sensiblen Ausfall aufwiesen. Alle Operationen erfolgte mikrochirurgisch mit einer Lupenbrille und eine Operation mit dem Mikroskop.

Bei allen zehn Patienten war der N. ulnaris verletzt, bei einem Kind war eine zusätzliche Begleitverletzung des N. radialis und bei einem Kind eine zusätzliche Begleitverletzung des N. medianus. Intraoperativ erfolgte ebenfalls bei allen Patienten eine Neurolyse des N. ulnaris mit ventraler Transposition. Intraoperativ hat sich dargestellt, dass bei drei Kinder eine Verletzung des N. Ulnaris durch eine K-Draht Durchspießung und bei sieben Kinder durch eine Kompression verursacht wurde.

Bei dem Kind mit der zusätzlichen Begleitverletzung des N. radialis infolge einer Einklemmung im Frakturspalt wurde ebenfalls eine Neurolyse durchgeführt. Allerdings zeigte sich im Verlauf keine Besserung des Befunds, sodass im Rahmen weiterer Diagnostik die Indikation für eine erneute operative Revision gestellt wurde. Nach intraoperativer Darstellung des N. radialis wurden drei Strecken von jeweils 5 cm Länge aus 3 Faszikeln bei einer partiellen segmentalen narbigen Degeneration entfernt. Anschließend erfolgte eine Transplantation des N. suralis als Interpositionsverfahren.

Sechs Kinder erhielten ergänzend zur operativen Versorgung eine unterstützende Behandlung in Form von Physio- und Ergotherapie. Darüber hinaus wurden bei vier dieser sechs Kinder eine TENS-Therapie und eine Ulnaris-Lagerungsschiene angewendet. Zwei der zehn chirurgisch behandelten Kinder erhielten ausschließlich eine TENS-Therapie

3.2.1 Prognose der Nervenläsion

Von den 26 behandelten Patienten mit Nervenverletzung wurden neun Kinder (34,6%) aufgrund eines Behandlungsabbruchs in der kinderchirurgischen Klinik aus der Prognosestatistik ausgeschlossen (Drop-out). Drei Kinder (11,5%) wurden chirurgisch und sechs Kinder (23,1%) konservativ behandelt. Die restlichen 17 Patienten erreichten unabhängig von der Behandlungsart eine vollständige Remission (Restitutio ad integrum). Zehn Kinder (58,8 %) wurden konservativ behandelt, während sieben Kinder (41,2 %) eine chirurgische Therapie erhielten.

Die durchschnittliche Zeit bis zu Restitutio ad integrum betrug 198,58 Tage (ca. 6,54 Monaten). Die längste Zeit bis zur vollständigen Genesung lag bei 713 Tagen nach einer konservativen Therapie bei einer iatrogenen Verletzung des N. medianus und N. ulnaris. Die kürzeste Zeit bis zu Restitutio ad integrum betrug hingegen nur 2 Tage, ebenfalls nach einer konservativen Therapie bei einer nicht-iatrogenen Verletzung des Nervus medianus.

Abb. 17 zeigt die Kaplan-Meier-Kurve, welche den Verlauf der Nervenverletzungsrate im Verhältnis zu Zeit in Tagen für zwei Behandlungsgruppen darstellt. Gruppe I, dargestellt durch die rote Kurve, repräsentiert die Nervenschädigungsrate bei konservativ behandelten Patienten, während Gruppe II, dargestellt durch die blaue Kurve, die Nervenschädigungsrate bei chirurgisch behandelten Patienten zeigt. Die Abnahme der Kurven signalisiert das Auftreten von Ereignissen (Nervenschädigungen) in den jeweiligen Gruppen.

Die Y-Achse der Kaplan-Meier-Kurve stellt die Wahrscheinlichkeit dar, dass die Nervenschädigungen mit fortschreitender Zeit abnehmen. Sie wurde als "Nervenschädigungsrate" bezeichnet. Mit zunehmender Zeit reduziert sich die Anzahl der Patienten mit bestehenden Nervenschädigungen kontinuierlich, bis schließlich alle Patienten eine vollständige Heilung erreicht haben und keine Nervenschäden mehr vorliegen. Diese Darstellung verdeutlicht den Heilungsverlauf für beide Behandlungsgruppen (konservativ vs. chirurgisch) über den betrachteten Zeitraum.

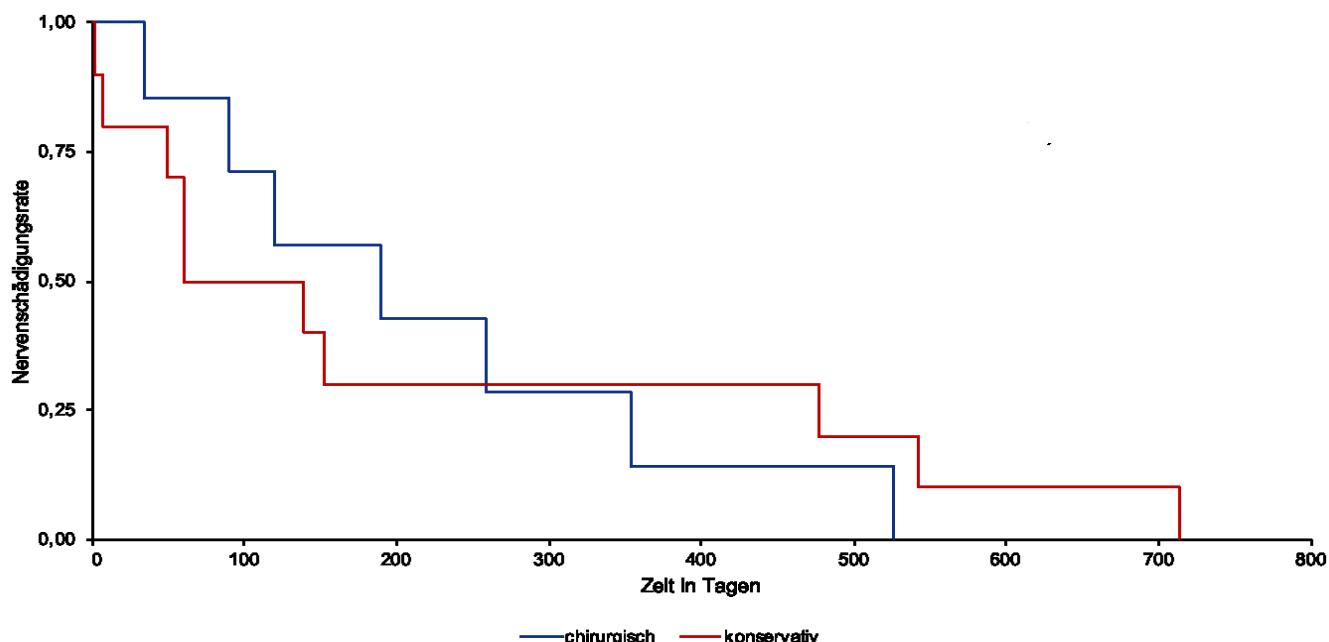


Abb. 17: Kaplan-Meier-Kurve mit dem Verlauf der Nervenverletzungsrate im Verhältnis zu Zeit

DISKUSSION

3.3 Patientenkollektiv

Diese Studie basiert auf den Daten von 126 Patienten, die im Zeitraum vom 01.01.2013 bis zum 31.12.2017 mit SCHF stationär in der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie in der Universitätsklinik Mannheim behandelt wurden. Kinder mit einer SCHF, die ambulant versorgt werden konnte, sind in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Die jährliche Verteilung der Patienten ist in der nachstehenden Tabelle dargestellt.

Jahr	Anzahl der Kinder
2013	28
2014	20
2015	20
2016	22
2017	36

Tabelle 9: Anzahl der verletzten Kinder über die vier Jahre

Vergleicht man die Patientenzahl mit anderen Studien ist anzumerken, dass die Patientenzahl in der vorliegenden Arbeit eher gering ist. Ein Grund dafür ist auch der Ausschluss der konservativ behandelten Kinder mit SCHF Typ I und II.

3.3.1 Alter

Am Tag der Aufnahme hatten die Patienten ein Alter zwischen 4 Monaten und 14 Jahren. Das Durchschnittsalter betrug 6,06 Jahre ($\pm 2,65$) und der Median lag bei 6 Jahren. Der Median stimmt mit den Beobachtungen von Barr 2014 (8) überein. Es ist festzustellen, dass das Durchschnittsalter der Jungen in dieser Studie mit 6,4 Jahren fast ein Jahr höher lag als das der Mädchen, das bei 5,5 Jahren lag. Das jüngste Kind in der Studie war vier Monate alt und der einzige Patient unter einem Jahr. Es wurde aufgrund einer stationären Aufnahme zur Überwachung einer Commotio cerebri in die Untersuchung miteingeschlossen. Der älteste Patient war ebenfalls ein Einzelfall und 14 Jahre alt.

In der Patientengruppe fanden sich keine Kinder im Alter von 12 oder 13 Jahren, und insgesamt waren lediglich 12 % der betroffenen Kinder älter als zehn Jahre. Dies bestätigt sowohl die Beobachtung von Barr, dass die Inzidenz mit zunehmendem Alter abnimmt (8) als auch die Erkenntnis, dass die suprakondyläre Humerusfraktur (SCHF) in der Altersgruppe von fünf bis sieben Jahren am häufigsten auftritt (8-12).

3.3.2 Geschlecht

Wie bereits erwähnt, war die Geschlechtsverteilung in vielen Studien unterschiedlich und uneinheitlich. In Studien wie denen von Weinberg et al. (15), Khoshbin et al. (16) und Jain et al. (87) sowie Schaffer et al. (3) zeigte sich ein leicht höherer Anteil männlicher Patienten. Hingegen berichtete Houshian et al. (7) dass in deren Studie mit 54 % die Mehrheit der betroffenen Kinder Mädchen waren.

In unserer Studie machte die Mehrheit der verletzten Kinder mit einer suprakondylären Humerusfraktur (SCHF) Jungen aus, die 60 % (76 Jungen) der Fälle ausmachten, während 40 % der Fälle Mädchen betrafen. Dieses Verhältnis entspricht 1,5:1. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass männliche Kinder ein erhöhtes Risiko für eine SCHF aufweisen.

3.4 Seitenverteilung

Unabhängig vom Geschlecht war in dieser Studie der linke Arm mit 55,6 % (n= 70) die am häufigsten betroffene Seite bei suprakondylären Humerusfrakturen, während der rechte Arm mit 44,4 % seltener betroffen war. Auch in den Arbeiten von Weinberg et al. (15), Fernandez et al. (73) und Madjar-Simic et al. (12) zeigte sich, dass der linke Arm häufiger betroffen ist. Im Gegensatz dazu berichteten Jain et al. (87) in ihrer Studie, dass die rechte Seite häufiger betroffen war als die linke.

Eine plausible Erklärung für die häufigere Betroffenheit der linken Seite ist die Dominanz der rechten Hand, wodurch der linke Arm häufiger zum Abstützen bei Stürzen verwendet wird. Zusätzlich könnten biomechanische Faktoren und die typische Positionierung des nicht-dominanten Arms bei kindlichen Aktivitäten eine Rolle spielen (73).

3.5 Frakturklassifikation

Die Einteilung der suprakondylären Humerusfraktur variiert sowohl international als auch innerhalb Deutschlands erheblich. In der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie der Universitätsklinik Mannheim wird die Klassifikation nach von Laer angewendet. Daher basiert diese Arbeit auf der Einteilung der SCHF gemäß von Laer. Bei mehr als der Hälfte der verletzten Kinder in dieser Arbeit wurde eine suprakondyläre Humerusfraktur des Typs IV nach v. Laer diagnostiziert. Die Frakturen verteilten sich wie folgt: 53,17 % waren Typ IV (67 Kinder), 37,30 % Typ III (47 Kinder), 6,35 % Typ II (8 Kinder) und 3,17 % Typ I (4 Kinder). Der Anteil männlicher Patienten war in allen Klassifikationen höher als der Anteil weiblicher Patienten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stimmen mit den Erkenntnissen von Poredda (40), Claireaux et al. (89) und Mangwani et al. (90) überein, wonach die suprakondyläre Humerusfraktur (SCHF) vom Typ IV nach von Laer bzw. Typ III nach Gartland am häufigsten bei operativ behandelten Kindern auftritt.

Im Vergleich dazu zeigte sich in der Studie von Josek mit anderen Klassifikationen der SCHF, dass die häufigste Fraktur der SCHF Typ I nach Baumann mit 49 % war (45). Ähnlich fand Houshian et al. (7) bei 64 % der untersuchten Fälle eine Fraktur vom Typ I nach Gartland, was der Klassifikation Typ I nach von Laer entspricht.

Der hohe Anteil an Frakturen des Typs IV und III in dieser Studie lässt sich darauf zurückführen, dass die stationäre Aufnahme als Einschlusskriterium definiert wurde. Frakturen des Typs I oder II werden in den meisten Fällen konservativ und ambulant behandelt, was die geringe Zahl dieser Frakturtypen in der vorliegenden Studie erklärt.

Von den 126 Patienten mit einer SCHF wies lediglich ein Kind eine offene Fraktur auf, was weniger als 1 % entspricht. Dieser Anteil liegt im Vergleich zur Literatur niedriger. In der Arbeit von Poreda 2019 (40) wurde ein Wert von 1,7 % angegeben, während bei Weinberg et al. (15) und Kohshbin et al. (16) der Anteil offener Frakturen ebenfalls bei 1 % lag. Wohingegen der Anteil der offenen SCHF bei Mangwani et al. bei 2% war (90). Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Risiko einer offenen Fraktur bei suprakondylären Humerusfrakturen im Kindesalter selten ist.

3.6 Therapie der suprakondylären Humerusfraktur

3.6.1 Die konservative Therapie

Wie oben bereits erwähnt, können nicht-dislozierte SCHF, wie Typ I und Typ II nach v. Laer, konservativ behandelt werden. Zu den möglichen Behandlungsoptionen zählen die Anlage einer Oberarmschiene bzw. eines Oberarmgipses oder eines Cuff-and-Collar-Verbandes, der auch als Blount-Schlinge bezeichnet wird. In der vorliegenden Arbeit erhielten nur acht Kinder eine konservative Therapie, davon sieben mittels einer Blount-Schlinge und ein Kind mittels Oberarmschiene. Die Hälfte der Kinder erlitt eine SCHF Typ I nach v. Laer, drei Kinder eine SCHF Typ II und ein Kind eine SCHF Typ III nach v. Laer. Aufgrund der geringen Fallzahl lassen sich keine fundierten Aussagen oder Schlussfolgerungen ableiten. Ferner zeigt sich in der Literatur eine heterogene und teils abweichende Darstellung.

In der Arbeit von Josek (2017) aus der Charité wurde der Oberarmgips als bevorzugte Methode der konservativen Therapie angewendet. Insgesamt wurden 200 Kinder mit einer SCHF konservativ ambulant behandelt. Von diesen erhielten 154 Kinder eine Ruhigstellung mittels Oberarmgips (142 mit einer SCHF Typ I nach Baumann, acht mit Typ II und vier mit Typ III nach Baumann). Die verbleibenden 46 Patienten wurden mit einer Blount-Schlinge behandelt (26 Kinder mit Typ I nach Baumann, 19 mit Typ II und ein Kind mit Typ III) (45).

In der Studie von Ballal et al. (91) wurde das therapeutische Vorgehen der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie in Mannheim bei der Behandlung der SCHF Typ I als effizient bestätigt. Die Ergebnisse zeigten, dass Kinder, die mit einer Oberarmschiene behandelt wurden, weniger Schmerzen hatten und einen geringeren Bedarf an Schmerzmitteln aufwiesen als jene, die mit einem Cuff-and-Collar-Verband (Blount-Schlinge) versorgt wurden. In einer weiteren Studie von Roberts et al. (92) wurden zwei Gruppen mit SCHF Typ IIa nach Gartland untersucht, die jeweils unterschiedliche konservative Therapiemethoden erhielten. Gruppe I wurde mit einer Oberarmschiene behandelt, während Gruppe II einen Cuff-and-Collar-Verband erhielt. Die Ergebnisse der Studie zeigten keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Komplikationen oder die Notwendigkeit einer sekundären chirurgischen Therapie zwischen den beiden Gruppen.

In unserer Studie wurden fünf Kinder mit einer SCHF Typ II aufgrund einer sekundären Dislokation operativ behandelt. Diese Kinder hatten zuvor eine konservative Therapie mittels Blount-Schlinge erhalten. Obwohl die geringe Fallzahl keine belastbaren Aussagen erlaubt, stellt sich dennoch die Frage, ob eine initiale Behandlung mit einer Oberarmschiene möglicherweise die erhöhten Schmerzen und den gesteigerten Schmerzmittelbedarf hätte vermeiden können.

3.6.2 Die operative Therapie

Der größte Teil der Kinder, und zwar 93,6% (118 Patienten), in dieser Arbeit mit einer SCHF wurden der operativen Therapie zugeführt. Die operative Versorgung erfolgte bei 102 Fällen (86,5%) mittels geschlossener Reposition und perkutaner K-Draht-Osteosynthese. Bei den restlichen 13,5 % (16 Frakturen) erfolgte eine offene Reposition mit ebenfalls perkutaner K-Draht-Osteosynthese. Bis auf drei Kinder (18,7%) mit einer SCHF Typ III erlitten die Kinder (81,3%) eine SCHF Typ IV.

Die große multizentrische Studie von Weinberg et al. (2002), in der 476 Kinder operativ behandelt wurden (von insgesamt 886 Kindern mit einer SCHF), zeigte, dass bei 28 % der Patienten eine offene Reposition erforderlich war. Der Großteil der operativ behandelten Kinder hatte eine SCHF Typ IV nach v. Laer (15). Ein Vergleich mit den Ergebnissen unserer Arbeit zeigt sowohl Übereinstimmungen als auch Unterschiede. Eine Übereinstimmung besteht darin, dass die Wahrscheinlichkeit einer offenen Reposition bei SCHF Typ IV nach v. Laer höher ist als bei anderen Typen. Dies ist zu erwarten, da die geschlossene Reposition aufgrund der starken Dislokation und möglicher Weichteilverletzungen bei Typ IV häufig erschwert ist. Der Unterschied im prozentualen Anteil der offenen Repositionen zwischen unserer Arbeit und der Studie von Weinberg könnte durch die deutliche Differenz in der Patientenzahl erklärt werden. Außerdem waren in dieser Studie mehrere unfallchirurgische Kliniken eingeschlossen, die grundsätzlich ein offenes Vorgehen wählten.

Die verschiedenen Osteosyntheseverfahren zur operativen Behandlung der SCHF, wie die K-Draht-Osteosynthese, ESIN oder Fixateur externe, sind ausführlich untersucht worden. Es gibt jedoch in der Literatur unterschiedliche Ansichten darüber, welches Verfahren die Methode der Wahl sein sollte. Selbst bei der K-Draht-Osteosynthese bestehen Variationen, insbesondere in der Anzahl der Drähte und ihrer Positionierung: ob gekreuzt oder ausschließlich von radial eingebracht. Letzteres, um die iatrogene Schädigung des N. ulnaris zu vermeiden.

In der großen multizentrischen Kohortenstudie von Claireaux et al. (89) wurde der Unterschied zwischen drei Konfigurationen von K-Draht-Osteosynthesen bei SCHF Typ II und III nach Gartland untersucht. Gruppe I erhielt eine geschlossene Reposition mit zwei gekreuzten K-Drähten, Gruppe II wurde mit drei von radial gesetzten K-Drähten behandelt, und Gruppe III erhielt drei gekreuzte K-Drähte (zwei radial und einer ulnar). Die Ergebnisse zeigten, dass Gruppe III (mit drei gekreuzten K-Drähten) eine bessere Aufrechterhaltung der Reposition aufwies als die anderen Gruppen. Bezuglich der iatrogenen Nervenverletzungen gab es jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei Behandlungsansätzen (89). Dies ist verwunderlich, da bei der Konfiguration mit Drähten, die nur von radial eingebracht werden, der N. ulnaris gar nicht tangiert werden sollte (26, 93, 94).

In der Arbeit von Afque et al. (93) wurden die Komplikationen und der Therapieerfolg nach geschlossener Reposition und K-Draht-Osteosynthese untersucht. Die Kinder wurden in zwei Gruppen eingeteilt: eine Gruppe mit von radial eingebrachter K-Draht-Osteosynthese und eine zweite Gruppe mit gekreuzter K-Draht-Osteosynthese. Dabei wurde besonderen Wert daraufgelegt, den Epicondylus ulnaris tasten zu können. Falls dies aufgrund der Schwellung nicht möglich war, wurde eine kleine ulnarseitige Inzision durchgeführt, um den Epicondylus darzustellen. In der ersten Gruppe traten postoperativ keine neurologischen Auffälligkeiten im Bereich des N. ulnaris auf.

In der zweiten Gruppe wurden bei drei von 40 Kindern Sensibilitätsstörungen im Ausbreitungsgebiet des N. ulnaris festgestellt. Die Studie zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen hinsichtlich der Stabilität der Frakturversorgung, des funktionellen Ergebnisses und der iatrogenen Nervenverletzung, vorausgesetzt, der Epicondylus ulnaris wurde mittels einer kleinen Inzision darzustellen (93).

Alle operierten Kinder in dieser Arbeit wurden mit perkutanen gekreuzten K-Drähten versorgt. Die Anzahl der Drähte variierte zwischen zwei und vier. Ein Kind erhielt vier K-Drähte, sechs Kinder wurden mit drei K-Drähten behandelt, und die übrigen Kinder erhielten jeweils zwei K-Drähte. Da in dieser Arbeit alle Patienten ausschließlich mit gekreuzten K-Drähten behandelt wurden, lassen sich keine Schlussfolgerungen zur Wahrscheinlichkeit oder zum signifikanten Risiko von Nervenverletzungen im Vergleich zu alternativen Techniken ziehen.

Mit 67 Fällen war die SCHF Typ IV nach v. Laer die am häufigsten operierte Fraktur. Dieses Ergebnis stimmt mit den Daten aus der Literatur, wie den Studien von Claireaux et al. (89) und Mangwani et al. (90) überein. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die kindlichen Knochen aufgrund ihrer biomechanischen Eigenschaften sowie der häufigeren hochenergetischen Unfallmechanismen anfälliger für dislozierte und schwierige Frakturen wie Typ IV sind. Ferner spielt die Dicke des distalen Humerus in der Entstehung von SCHF eine wichtige Rolle. Gerade oberhalb der Wachstumsfuge ist der Humerus sehr schmal mit einer wenig ausgeprägten Kortikalis. Bei Überstreckung des Ellenbogens wirkt das Olecranon als Hebel, wodurch es bei entsprechender Energie des Traumas zum Abriss mit kompletter Dislokation kommt, wie von Laer in seinem Buch beschreibt (26).

3.7 Nervenläsion bei der suprakondylären Humerusfraktur

3.7.1 primäre Nervenverletzung

In der vorliegenden Arbeit erlitten 11,8 % der Kinder (14 Patienten) mit einer SCHF in dem Zeitraum von 2013 bis 2017 eine primäre Nervenläsion, die als frakturbedingt einzustufen ist. Bei der Mehrheit der betroffenen Kinder (10 Patienten) lag ein rein sensibler Ausfall vor, ein Kind hatte eine rein motorische Schädigung, und die übrigen Kinder zeigten kombinierte Ausfälle. Von den 14 Kindern wiesen sieben (50 %) eine Läsion des N. medianus auf, drei Kinder (21,4 %) eine Läsion des N. radialis, ein Kind eine Läsion des N. ulnaris (7,1%), und drei Kinder hatten kombinierte Nervenverletzungen. Davon waren zwei Fälle Kombinationen aus N. medianus und N. ulnaris, während bei einem Kind sowohl der N. radialis als auch der N. ulnaris betroffen waren (s. Tabelle 10).

In der Arbeit von Khademolhosseini et al. (95) wiesen insgesamt neun Kinder (18,7 %) eine Nervenverletzung auf. Sechs Patienten (66,7 %) hatten eine Läsion des N. medianus, zwei Kinder (22,2 %) eine Läsion des N. ulnaris, und ein Kind (11,1 %) eine Läsion des N. radialis (95).

In der Studie von Joyce et al. (96) wurden bei 50 Patienten (6,6%) Nervenläsionen festgestellt. Davon hatten 30 Patienten (60 %) eine Verletzung des N. medianus, neun Kinder (18 %) eine Läsion des N. radialis und ebenfalls neun Kinder (18 %) eine Läsion des N. ulnaris. Zusätzlich zeigten zwei Kinder eine kombinierte Nervenläsion (96).

In der Studie von Bashyal et al. (66) hatten 11,9 % der Kinder (74 Patienten) eine präoperative Nervenläsion. Neben den drei Hauptnerven wurde der N. interosseus anterior in dieser Studie separat vom N. medianus betrachtet. Fasst man die Anteile des N. interosseus anterior und des N. medianus zusammen, ergibt sich eine Verteilung der Nervenverletzungen von 28,5 % für den N. radialis (20 Kinder), 14,2 % für den N. ulnaris (10 Kinder) und 57,1 % für den N. medianus (40 Kinder). Zudem traten in dieser Studie vier kombinierte Nervenverletzungen auf (66).

	N. ulnaris	N. radialis	N. medianus
Diese Arbeit	7,1 %	21,4 %	50 %
Khademolhosseini et al.	22,2 %	11,1 %	66,7 %
Joyce et al.	18 %	18 %	60 %
Bashyal et al.	14,2 %	28,5 %	57,1 %

Tabelle 10: Verteilung der primären Nervenläsionen in verschiedenen Studien

Die Inzidenz einer primären Nervenläsion bei der SCHF in unserer Studie lag mit 11,9 % nahezu auf dem gleichen Niveau wie bei Bashyal et al. (11,9 %) (66) und Babal et al. (11,3 %) (68). Höhere Werte wurden bei Carmer et al. (14,8 %) und Khademolhosseini et al. (18,7 %) berichtet (95, 97), während Joyce et al. (6,6 %) (96) einen niedrigeren Wert angab. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Inzidenz einer primären Nervenverletzung bei SCHF typischerweise zwischen 6 % und 19 % liegt. In einigen Studien wird dieser Wert jedoch noch höher angegeben.

Vergleicht man die Ergebnisse unserer Arbeit mit den Studien von Khademolhosseini et al. (95) Joyce et al. (96) und Bashyal et al. (66) zeigt sich, dass in allen drei Studien die häufigste primäre Nervenverletzung im Rahmen der SCHF den N. medianus betrifft. Die Reihenfolge der weiteren betroffenen Nerven variiert jedoch zwischen den Studien. In unserer Arbeit steht der N. radialis an zweiter Stelle, während eine Läsion des N. ulnaris am seltensten auftritt, sofern kombinierte Nervenverletzungen nicht berücksichtigt werden. Betrachtet man jedoch auch die kombinierten Nervenverletzungen, ist die Verteilung der Verletzungen des N. radialis und des N. ulnaris gleich.

Es ist ebenfalls bemerkenswert, dass die Anzahl der Kinder mit einer Nervenläsion in der Studie von Joyce et al. (96) aufgrund der größeren Patientenanzahl deutlich höher ausfiel. In der Arbeit von Khademolhosseini et al. (95) wurde hingegen keine kombinierte Nervenverletzung festgestellt.

Bis auf zwei Kinder hatten die 12 Kinder mit einer primären Nervenläsion in dieser Arbeit eine SCHF Typ IV nach von Laer; ein Kind hatte ein Typ II und ein weiteres Kind ein Typ III. In der Studie von Khademolhosseini et al. (95) erlitten alle Kinder mit einer primären Nervenläsion eine Typ III-Fraktur nach Gartland, und bei Carmer et al. (97) waren 14 von 15 Fällen ebenfalls Typ III nach Gartland. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei stark dislozierten SCHF das Risiko für eine frakturbedingte Nervenverletzung deutlich erhöht ist.

Es bleibt außerdem festzuhalten, dass Verletzungen der Nn. medianus und radialis eher Verletzungsbedingt sind, wohingegen Verletzungen des N. ulnaris in der Regel iatgener Natur sind (26).

Es ist wichtig zu betonen, dass die neurologische Untersuchung bei frisch verletzten Kindern oft schwierig sein kann und eine Nervenverletzung leicht übersehen werden kann. Ein Fallbeispiel aus unserem Patientenkollektiv zeigt dies deutlich: Ein achtjähriger Junge mit einer SCHF Typ II nach v. Laer wurde initial konservativ mit einer Blount-Schlinge behandelt. Bei der Erstvorstellung wurden keine neurologischen Auffälligkeiten festgestellt. Bei der Verlaufskontrolle am vierten Tag zur Überprüfung der Reposition zeigte sich jedoch ein Ausfall des N. radialis. Aufgrund einer sekundären Dislokation wurde eine geschlossene Reposition mit K-Draht-Osteosynthese durchgeführt. Der neurologische Ausfall des N. radialis persistierte postoperativ, wurde jedoch konservativ behandelt. Nach viereinhalb Monaten kam es zu einer vollständigen Wiederherstellung der Funktion (Restitutio ad integrum).

3.7.2 iatrogene Nervenverletzung

Die iatrogene Nervenverletzung stellt einen wichtigen Teil der Komplikationen bei SCHF im Kindesalter dar und betrifft im Wesentlichen den N. ulnaris. Seit Jahren wird dazu in überwiegend retrospektiven Studien geforscht. In der vorliegenden Arbeit wurden alle neuen, postoperativ festgestellten Nervenläsionen als iatrogene bzw. sekundäre Nervenverletzungen gewertet. Insgesamt waren hiervon 12 % der Fälle (n=14 Kinder) betroffen.

In 21% (n=3) der iatrogenen Nervenverletzungen lag ein rein sensibler Ausfall vor, während bei den übrigen elf Kindern sowohl motorische als auch sensible Ausfälle festgestellt wurden. Im Vergleich zu primären Nervenläsionen fällt auf, dass die iatrogenen Nervenverletzungen häufiger mit kombinierten Ausfällen einhergehen. Zu bemerken ist, dass die iatrogene Schädigung in den meisten Fällen den Nervus ulnaris betrifft. Abhängig von der Art der Schädigung – sei es durch Druck oder kleinste Faserverletzungen, beispielsweise verursacht durch einen K-Draht – zeigt sich anfänglich häufig eine überwiegend sensible Beeinträchtigung. Stellen sich bei einer genaueren Untersuchung jedoch sowohl motorische als auch sensible Funktionsstörungen heraus, ist eine iatrogene Schädigung, wie etwa durch die direkte Perforation des Nervs, als wahrscheinlichste Ursache anzunehmen. Bei Hülsemann et al. (98) hatten alle vier chirurgisch behandelten iatrogenen Nervenverletzungen kombinierte Ausfälle in Motorik und Sensibilität.

In der Literatur wird eine genaue Unterscheidung zwischen Sensibilitäts- und Motorikausfällen nicht oft vorgenommen. Das liegt zum einen daran, dass die Untersuchung bei frisch verletzten Kindern wegen ihrer eingeschränkten Compliance oft schwierig ist. Andererseits wird in der Praxis nicht immer ausreichend gründlich untersucht. Hinzu kommt, dass Nervenverletzungen ohne Durchtrennung häufig erst verzögert erkannt werden, da sich solche Läsionen oft erst im Verlauf vollständig zeigen.

Der am häufigsten sekundär bzw. iatrogen betroffene Nerv war der N. ulnaris mit 78 % (n = 11). In neun Fällen (64 %) trat die Ulnarisläsion isoliert auf, während sie bei zwei Kindern kombiniert vorlag – einmal in Kombination mit einer Läsion des N. radialis und einmal zusätzlich zum N. medianus. Die übrigen drei Patienten wiesen einmal eine isolierte Medianusläsion und zweimal eine isolierte Radialisläsion auf. Die Häufigkeit der Medianusläsion lag insgesamt bei 14% (n=2), während die Radialisläsion 21 % (n = 3) ausmachte (s. Tabelle 11).

Es ist wichtig zu betonen, dass bei zwei der 14 Kinder mit sekundärer Nervenverletzung die präoperative Erhebung des neurologischen Status nicht möglich war. Eines dieser Kinder hatte eine isolierte Läsion des N. medianus, das andere eine isolierte Läsion des N. radialis. Dies wirft die Frage auf, ob diese Verletzungen tatsächlich iatrogen oder frakturbedingt waren. Apodiktisch kann man jedoch sagen, dass Medianusläsionen immer frakturbedingt, Radialisläsionen meist frakturbedingt und Ulnarisläsionen fast immer iatrogen sind. Dies verdeutlicht erneut, wie schwierig eine genaue neurologische Untersuchung bei frisch verletzten Kindern sein kann und leicht übersehen werden.

In der Arbeit von Hülsemann et al. trat bei nur 2 % der Kinder nach einer geschlossenen Reposition und K-Draht-Osteosynthese bei einer SCHF eine iatrogene Nervenverletzung auf, die chirurgisch behandelt wurden. Davon waren alle Fälle (100 %) auf eine Läsion des N. ulnaris zurückzuführen. Es ist jedoch wichtig zu erwähnen dass bei der Arbeit von Hülsemann nicht die komplette Zahl der iatrogenen Verletzungen, unabhängig von ihrer Behandlung, angegeben wurde (98).

Bei Khademolhosseini et al. (95) lag die Inzidenz sekundärer Nervenverletzungen bei 14 % (n = 39). Der größte Anteil der betroffenen Nerven entfiel auf den N. ulnaris mit 34 Fällen (87%), gefolgt vom N. radialis mit 3 Verletzungen (8 %) und dem N. medianus, der in 2 Fällen betroffen war (5 %) (95). In der Studie von Guner et al. wurde bei 3% der Kinder (n = 3) von insgesamt 91 untersuchten Patienten eine iatrogene Nervenverletzung festgestellt. Zwei dieser drei Kinder (67%) wiesen eine Ulnarisläsion auf, während ein Kind (33 %) an einer Radialisläsion litt (99). Ramachandran et al. (88) dokumentierten innerhalb von fünf Jahren 23 Fälle von iatrogenen Nervenverletzungen. Davon betrafen 61 % den N. ulnaris, 21 % den N. medianus, und 17 % entfielen auf den N. radialis (88) (s. Tabelle 11).

	N. ulnaris	N. radialis	N. medianus
Diese Arbeit	78%	21%	14%
Hülsemann et al.	100%	0%	0%
Khademolhosseini et al.	87%	8%	5%
Gunter et al.	67%	33%	0%
Ramachandran et al.	61%	17%	22%

Tabelle 11 Verteilung der sekundären Nervenläsionen in verschiedenen Studien

Bei Gosen et al. lag die Inzidenz iatogener Nervenverletzungen bei 5,2 %. Die Mehrzahl der Fälle betraf eine Läsion des N. ulnaris (n = 9), gefolgt von zwei Kindern mit einer Läsion des N. medianus und einem Kind mit einer Läsion des N. radialis. Es ist hervorzuheben, dass bei zwei Kindern mit einer postoperativen Ulnarisläsion die neurologische Untersuchung präoperativ nicht möglich war (57).

Vergleicht man die hiesige Arbeit mit den Studien von Hülsemann et al., Khademolhosseini et al., Guner et al. und Gosen et al., zeigt sich, dass die Inzidenz iatogener Nervenverletzungen bei der operativen Therapie der SCHF stark schwankt und zwischen 2 % und 14 % liegt. Der in unserer Arbeit festgestellte Wert befindet sich im oberen Bereich dieser Bandbreite. Zudem bestätigen die Ergebnisse, dass der N. ulnaris der am häufigsten iatrogen verletzter Nerv bei einer SCHF ist (57, 95, 98, 99).

Im Gegensatz zu den oben genannten Studien berichteten Kunsche-Mandl et al. von lediglich einem Kind (1%) von insgesamt 78 Fällen mit einer iatrogenen Nervenverletzung nach geschlossener Reposition und gekreuzter K-Draht-Osteosynthese. Diese betraf den N. radialis (100).

Ähnlich war es in der Studie von Kocher et al., in der nach einem Vergleich zwischen gekreuzter und lateraler K-Draht-Osteosynthese keine iatrogenen Nervenverletzungen auftraten (29).

Von den 14 Kindern mit einer sekundären Nervenverletzung wurden in zehn Fällen die Frakturen mittels geschlossener Reposition und perkutaner, gekreuzter K-Draht-Osteosynthese versorgt. Bei den übrigen vier Patienten erfolgte eine offene Reposition, nachdem die geschlossene Reposition nicht erfolgreich war. Es ist hierbei wichtig zu betonen, dass das hypothetische Risiko einer iatrogenen Nervenverletzung insbesondere bei der geschlossenen und weniger bei der offenen Reposition besteht.

In der Studie von Gosens et al. (57) wurde bei elf Kindern eine offene Reposition durchgeführt. Fünf dieser Kinder entwickelten postoperativ eine Nervenläsion, wobei es sich in zwei Fällen um sekundäre bzw. iatrogene Nervenläsionen handelte (einmal eine Radialis- und einmal eine Medianusläsion). Bei den übrigen drei Kindern konnte die präoperative Untersuchung der pDMS nicht durchgeführt werden (57).

In der Studie von Poreda zeigte sich ein klarer, statistisch hochsignifikanter Zusammenhang zwischen der Repositionsmethode und dem Auftreten postoperativer Nervenläsionen des N. ulnaris ($p < 0,0001$) (40). In ihrer Studie war das Risiko, bei einer geschlossenen Reposition eine Läsion des N. ulnaris zu erleiden, 20,4-mal höher als bei einer offenen Reposition (40).

In der vorliegenden Arbeit hatten acht Kinder mit sekundärer Nervenverletzung, knapp die Hälfte (57%), eine SCHF Typ IV nach von Laer, während sechs Kinder (42%) eine SCHF Typ III nach von Laer aufwiesen. Im Gegensatz dazu litten in der Studie von Khademolhosseini et al. (95) fast alle Kinder mit einer iatrogenen Nervenverletzung, bis auf zwei Fälle, an einer SCHF Typ III nach Gartland. Auch in der Studie von Guner et al. (99) wiesen alle Kinder mit Nervenverletzungen eine SCHF Typ III nach Gartland auf. Ähnlich zeigte sich bei Ramachandran et al. (88), dass die Mehrheit der Kinder mit iatrogenen Nervenverletzungen an einer SCHF Typ III nach Gartland litt. Das kann als Hinweis auf die Unmöglichkeit der Vermeidung einer Nervenläsion bei geschlossener K-Draht-Osteosynthese gewertet werden.

3.8 Therapie und Prognose der peripheren Nervenläsion bei der SCHF

In der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt 26 Nervenläsionen behandelt, entweder konservativ oder chirurgisch. Mehr als die Hälfte der Fälle (62 %, n = 16) wurde konservativ therapiert. Davon wurden drei Nervenläsionen durch reines Abwarten und regelmäßige Kontrollen behandelt. Die restlichen 13 Läsionen wurden mittels Physio- und Ergotherapie, TENS (transkutane elektrische Nervenstimulation) sowie Lagerungsschienen therapiert. Die übrigen 38 % der Nervenläsionen (n = 10) wurden chirurgisch behandelt, wobei eine Neurolyse mit ventraler Transposition durchgeführt wurde. In einem Fall kam eine Transplantation des N. suralis als Interpositionsverfahren zum Einsatz. Postoperativ erhielten die betroffenen Kinder zusätzliche Therapien wie Physio- und Ergotherapie.

Die Behandlung von Nervenläsionen, die im Zusammenhang mit einer SCHF im Kindesalter auftreten, wird in der Literatur intensiv diskutiert. Es existieren zahlreiche Meinungen und Publikationen zu diesem Thema.

In der Arbeit von Althaus (101) wurden 86 % der Nervenläsionen konservativ behandelt, 3 % blieben ohne Therapie (Abwarten), und 11 % wurden chirurgisch mittels Neurolyse versorgt. Guner et al. berichteten, dass alle elf dokumentierten Nervenläsionen konservativ durch Abwarten behandelt wurden (99). Joyce et al. beschrieben, dass der Großteil der Nervenläsionen operativ versorgt wurde (66 %, n = 33). Die Analyse der Daten der operierten Kinder wurde in zwei Gruppen unterteilt: Gruppe I umfasste Kinder, die eine frühzeitige Intervention erhielten, während Gruppe II Kinder mit einer späteren Revision des verletzten Nervs einschloss. Die übrigen 34 % (n = 17) wurden konservativ therapiert. In dieser Studie gab es keinen Fall einer K-Draht-Durchspießung. Intraoperativ wurde jedoch Einklemmungen oder Kompressionen durch Frakturfragmente, Nervruptur und Neurom festgestellt (96). Khademolhosseini et al. dokumentierten eine überwiegende konservative Behandlung von Nervenläsionen mit einem Anteil von 92 % (n = 44). Die chirurgische Therapie machte 8 % (n = 4) aus, wobei intraoperativ eine K-Draht-Durchspießung, eine Kompression des Nervs, eine Kontusion sowie unauffällige Befunde festgestellt wurden (95). Bei Hülsemann et al. wurden alle vier iatrogenen Nervenverletzungen operativ behandelt. Zwei Fälle (50 %) waren auf eine K-Draht-Durchspießung des N. ulnaris zurückzuführen, während ein Fall eine Kompression desselben Nervs zeigte (98). Bei McGraw et al. wurden 17 Kinder mit einer Nervenläsion bei einer SCHF festgestellt. Bei allen Läsionen erfolgte das Vorgehen mit Abwarten (70).

In der vorliegenden Arbeit wurden elf der konservativ behandelten Nervenläsionen als primäre Nervenverletzungen und fünf als sekundäre bzw. iatogene Läsionen klassifiziert. Im Gegensatz dazu waren nahezu alle chirurgisch behandelten Nervenläsionen (90 %, n = 9) iatrogen bedingt, während nur eine Läsion primär war. Bei 30 % der Fälle konnte intraoperativ eine Durchspießung des N. ulnaris durch den K-Draht festgestellt werden, während bei den übrigen 70 % eine Kompression des N. ulnaris vorlag. In einem Fall wurde zusätzlich eine Verletzung des N. radialis durch eine Einklemmung in der Frakturpalte diagnostiziert, die später eine Nerventransplantation erforderlich machte. Laut Hülsemann et al. trat in 50 % der operierten Fälle eine K-Draht-Durchspießung auf (98). Khademolhosseini et al. berichteten hingegen von nur einer Ulnarisläsion (25 %) durch K-Draht-Durchspießung (95). Fernandez et al. empfehlen bei iatrogenen Nervenverletzungen eine operative

Revision des betroffenen Nervs sowie bei einer K-Draht-Durchspießung entweder eine neue Platzierung oder die Entfernung der Drähte (73).

Im Gegensatz dazu sprechen sich Brown et al. und Weinberg et al. für die Entfernung der Drähte und ein anschließendes Abwarten aus (15, 86). Lyons et al. berichteten bei Kindern mit K-Draht-Durchspießungsverletzungen von einer Verbesserung, unabhängig davon, ob eine operative Revision, Drahtentfernung oder konservative Therapie durchgeführt wurde (85).

Während in der vorliegenden Studie, ähnlich wie bei Hülsemann et al. (98) und Joyce et al. (96), eine höhere Anzahl operativer Eingriffe zur Behandlung von Nervenläsionen durchgeführt wurde, zeigten andere Studien einen deutlich geringeren Anteil an operativen Maßnahmen oder sogar keine (99). Die Unterschiede im Management von Nervenverletzungen bei der SCHF sind, wie bereits erwähnt, erheblich. Fernandez et al. empfehlen aufgrund der hohen Spontanremissionsrate primärer Nervenverletzungen zunächst eine konservative Therapie. Bei einer Verschlechterung oder ausbleibender Besserung sollte innerhalb der ersten Wochen eine weiterführende Diagnostik, wie elektrophysiologische Untersuchungen (EMG und NLG), durchgeführt werden. Werden Reinnervationspotenziale nachgewiesen, wird ein abwartendes Vorgehen empfohlen. Sollten jedoch auch nach drei Monaten keine Reinnervationspotenziale feststellbar sein, ist eine operative Revision des durchzuführen (73). Dieses Vorgehen entspricht weitgehend dem Management primärer Nervenverletzungen in der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie in Mannheim, auf dem diese Studie basiert (siehe Abb. 15). In unserer Patienten Kohorte fiel jedoch auf, dass die Nervensonografie als ergänzende Diagnostik eine essenzielle Rolle spielt. Im Kindesalter zeigt sie sich aufgrund der besseren Compliance als vorteilhaft gegenüber EMG oder Neurografie.

McGraw et al. empfehlen auf Basis ihrer Ergebnisse ein abwartendes Vorgehen bei kindlichen frakturbedingten Nervenläsionen für mindestens fünf Monate. Falls jedoch eine offene Reposition der Fraktur notwendig ist, raten sie zu einer primären Nervenexploration im Rahmen der operativen Frakturversorgung (70).

In der deutschen Studie von Kraus et al. (2019) wird bei postoperativen Ulnarisläsionen zunächst ein abwartendes Vorgehen über vier Wochen empfohlen, ohne spezifische Behandlung. Nach dieser Zeit sollten die Drähte entfernt werden. Bei anhaltenden neurologischen Ausfällen wird eine Neurolyse des N. ulnaris durchgeführt, gefolgt von einer Förderungstherapie durch Ergotherapie (102).

In der vorliegenden Arbeit konnten aufgrund von Drop-Outs lediglich 17 von 26 behandelten Patienten mit Nervenläsionen ausgewertet werden. Von diesen erhielten 41 % (n = 7) eine chirurgische Therapie, während 59 % (n = 10) konservativ behandelt wurden. Alle Patienten zeigten unabhängig von der gewählten Therapieform eine vollständige Remission der Nervenläsionen.

Im Gegensatz zu anderen Studien, wie denen von Guner et al. (99) und Joyce et al. (96), die die Remission des Nervs nach den Kriterien von Birch, Bonney und Wynn Parry in vier Grade einteilten, wurde in der vorliegenden Arbeit aufgrund der unzureichenden Dokumentation der Fokus ausschließlich auf die vollständige Wiederherstellung der Nervenfunktion (Motorik und Sensibilität) (Restitutio ad integrum) gelegt.

Die durchschnittliche Zeit bis zur vollständigen Remission aller behandelten Nervenläsionen, unabhängig von der Therapieform, betrug etwa 6,5 Monate. Die kürzeste und die längste Remissionszeit wurden nach konservativer Therapie beobachtet (2 Tage bzw. knapp 2 Jahre). Die längere Remissionszeit betraf ein Kind mit einer sekundären Medianus- und iatrogenen Ulnarisläsion. Die durchschnittliche Remissionszeit beider Gruppen war nahezu identisch: Bei der operativen Therapie betrug sie 224,5 Tage (ca. 7 Monate und 14 Tage), während sie bei der konservativen Therapie bei 220,1 Tagen (ca. 7 Monate und 7 Tage) lag.

In der Studie von McGraw et al. wurden bis auf zwei Läsionen alle Symptome innerhalb von 9 Wochen behoben. Ein Kind zeigte einen motorischen Ausfall, der sich erst nach 3 Monaten besserte, und einen sensiblen Ausfall, der nach 9 Monaten vollständig remittierte. Beim zweiten Kind erfolgte eine chirurgische Revision des N. radialis nach 6 Monaten, gefolgt von einem Nerventransfer nach 14 Monaten (70).

Die Arbeit von Althaus zeigte nach einer durchschnittlichen Therapiedauer von 12 Monaten eine Verbesserung bei 92 % der Nervenläsionen. Von den behandelten Kindern beendeten 44 % die Nachsorge mit einem sehr guten Ergebnis, 17 % mit einem guten und 31 % mit einem zufriedenstellenden Ergebnis. Lediglich 8 % erzielten ein unbefriedigendes Resultat. Ihre Studie zeigte, dass die konservative Therapie der operativen Methode überlegen war. Regelmäßige Physiotherapie führte bei 97 % der Patienten zu Verbesserungen, wobei 43 % ein sehr gutes Ergebnis erreichten. Im Vergleich dazu erzielten Patienten, die chirurgisch durch eine Neurolyse behandelt wurden, nur in 50 % der Fälle eine Besserung der Nervenschädigung (101).

In der Studie von Guner et al. zeigten 9 von 11 Kindern innerhalb von 3 bis 12 Monaten (durchschnittlich 6,7 Monate) eine vollständige Genesung. Zwei Kinder zeigten nach 5 Monaten lediglich eine partielle Erholung (99).

In der Arbeit von Joyce et al. betrug die durchschnittliche Remissionszeit der Nervenläsionen 7,4 Monate. Sowohl bei chirurgischer als auch konservativer Therapie erreichten die meisten Kinder ein gutes oder sehr gutes Ergebnis. Ähnlich wie in der vorliegenden Arbeit hatten die Patienten mit konservativer Therapie eine kürzere Erholungszeit (6 Monate) im Vergleich zu den operierten Patienten (10 Monate). Laut Joyce et al. könnte dies durch die schwerwiegenderen Verletzungen in der operierten Gruppe erklärt werden, die häufig mit vaskulären Schäden einhergingen (96). Bemerkenswert ist, dass kein Patient der operierten Gruppe ein schlechtes oder mäßiges Ergebnis hatte, selbst in Fällen, die eine Nerventransplantation erforderten (96). Khademhosseini et al. berichteten ebenfalls von vollständigen Remissionen sowohl nach chirurgischer als auch konservativer Therapie. Die durchschnittliche Remissionszeit betrug 3,5 Monate, mit einer Spannweite von 3 Wochen bis 8 Monaten (95).

Unsere durchschnittliche Remissionszeit für beide Therapieformen lag ähnlich wie bei Guner et al. (99), war jedoch länger als bei Khademhosseini et al. (95) und kürzer als bei Althaus (101) und Joyce et al. (96).

Bei einem Kind mit iatgener bzw. sekundärer Nervenverletzung war die konservative Therapie zwar erfolgreich, benötigte jedoch mit knapp 2 Jahren (713 Tage) deutlich mehr Zeit. Diese Ergebnisse bestätigen die Empfehlung von Fernandez et al., bei sekundären Nervenläsionen eine operative Revision durchzuführen (73). Laut unserer Ergebnisse erscheint diese Vorgehensweise praktikabel und sinnvoll, um die Remissionszeit zu verkürzen.

Bei Guner et al. wurden alle Patienten ebenfalls konservativ behandelt und es kam nicht zur kompletten Remission bei allen Fällen (99). Ferner bestätigen die Ergebnisse von Joyce et al., dass die Patienten mit einer operativen Therapie bessere Outcomes erzielten (96).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die chirurgische Therapie insbesondere bei iatrogenen Nervenverletzungen sowie bei ausbleibender Besserung einer primären Nervenschädigung eine effektive Behandlungsoption darstellt und als Mittel der ersten Wahl in Betracht gezogen werden sollte.

3.9 Schwäche der Studie

Die retrospektive Ausrichtung der Studie bringt mit sich, dass weder die Auswahl der Beobachtungseinheiten noch die Art und Weise der Dokumentation oder der erfassten Merkmale im Nachhinein beeinflusst werden können. Angaben in den Akten, beispielsweise zu Befunden, können unvollständig oder fehlerhaft sein und lassen sich in der Regel nicht nachträglich korrigieren. Solche Schwächen in den Daten können zu Verzerrungen (Bias) führen, die die Aussagekraft der Ergebnisse mindern. Zudem ist die Patientenanzahl mit 126 Fällen begrenzt, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränkt und keine präzisen Aussagen zu den Spezifitäten einzelner Fälle erlaubt. Ein weiteres Problem ergibt sich, wenn Patienten, wie in dieser Studie, nicht zu einer Abschlussuntersuchung erscheinen und daher aus der Analyse ausgeschlossen werden müssen. Mithilfe von multizentrischen Registerstudien können diese Schwächen korrigiert werden. Um zu beweisen, ob gewisse Läsionen immer der operativen Behandlung zugeführt werden müssen, bräuchte es randomisierte Studien. Da es sich bei SCHF um akute Verletzungen handelt, wird es sehr schwierig sein die Eltern zu einer Randomisierung zu bewegen. Um präzisere Fragestellungen formulieren zu können, werden Registerstudien sehr hilfreich sein. Das könnte helfen, um sehr präzise randomisierte Studien zu konzipieren.

ZUSAMMENFASSUNG

Die suprakondyläre Humerusfraktur (SCHF) sind die häufigsten Ellenbogenfrakturen im Kindesalter und treten häufig bei Kindern zwischen 5 und 7 Jahren auf (8). Der überwiegende Anteil der Frakturen (95 %) ist vom Extensionstyp, verursacht durch einen Sturz auf den ausgestreckten Arm (18). Die Klassifikation der SCHF nach von Laer wird in der Kinderchirurgischen Klinik der Universitätsmedizin Mannheim als Standard verwendet. Dabei wird zwischen vier Frakturtypen unterschieden, von der nicht dislozierten Fraktur (Typ I) bis zur komplett dislozierten Fraktur (Typ IV) (15). Die Behandlung der SCHF erfolgt entweder konservativ oder chirurgisch. Konservative Verfahren wie die Anlage einer Oberarmschiene sind bei stabilen Frakturen vom Typ I und II indiziert (28). Für instabile oder dislozierte Frakturen (Typ III und IV) wird eine chirurgische Versorgung empfohlen. Die bevorzugte Methode ist die Osteosynthese mit K-Draht-Osteosynthese, die eine stabile Fixation der Fraktur gewährleistet (46). Eine der häufigsten Komplikationen bei SCHF sind Nervenläsionen, die bei 10–20 % der Fälle auftreten (53). Primär sind der Nervus radialis und der Nervus medianus am häufigsten betroffen, während der Nervus ulnaris hauptsächlich durch iatrogene Eingriffe verletzt wird (72). Nervenläsionen können motorische und sensible Ausfälle hervorrufen, die meist spontan innerhalb von drei bis sechs Monaten ausheilen (46). Die meisten Nervenverletzungen bei SCHF haben eine gute Prognose und führen zur vollständigen Erholung (77). Bei schweren Schädigungen, wie der Neurotmesis (vollständige Durchtrennung des Nervs), kann jedoch ein chirurgischer Eingriff erforderlich sein, um die Nervenfunktion wiederherzustellen (80).

Die vorliegende Arbeit untersucht die Häufigkeit, Therapie und Prognose von Nervenläsionen bei suprakondylären Humerusfrakturen im Kindesalter. Es handelt sich um eine retrospektive Analyse von Patientendaten der Klinik für Kinder- und Jugendchirurgie der Universitätsmedizin Mannheim zwischen 2013 und 2017. Die Mehrheit der Kinder in dieser Arbeit waren Jungen (60 %), was möglicherweise auf geschlechtsspezifische Unterschiede in Bewegungsdrang und Risikoverhalten hindeutet. Das durchschnittliche Alter der betroffenen Kinder lag bei 6,06 Jahren. Besonders häufig traten die Frakturen im Alter von fünf bis sieben Jahren auf, einem Alter, in dem die motorische Reife noch nicht vollständig entwickelt ist. Die Frakturen wurden überwiegend als Typ IV nach von Laer klassifiziert (53 %), gefolgt von Typ III (37 %). Typ I und II machten einen kleineren Anteil aus. Der linke Arm war häufiger betroffen (55 % der Fälle). Von den analysierten Fällen wurde die SCHF bei den meisten Kinder operativ mit Reposition und K-Draht Osteosynthese behandelt.

In der untersuchten Patientengruppe traten bei 14 Kindern (12 %) postoperative Nervenläsionen auf. Drei dieser Kinder litten an reinen Sensibilitätsstörungen, während bei 11 Kindern ein kombinierter neurologischer Ausfall vorlag. Die meisten dieser Verletzungen traten bei Frakturen des Typs III und IV nach von Laer auf. Hinsichtlich der betroffenen Nerven wurden insgesamt 16 sekundäre Nervenschäden bei 14 Patienten festgestellt. Der Nervus ulnaris war dabei mit 11 Fällen am häufigsten betroffen, meist isoliert, jedoch in einigen Fällen auch in Kombination mit dem N. radialis oder medianus. Der N. radialis war in drei Fällen geschädigt, darunter einmal isoliert. Der N. medianus war in zwei Fällen betroffen, meist in Kombination mit anderen Nerven.

Die Diagnostik der Nervenläsionen erfolgte mittels klinischer Untersuchung und Nervensonografie. Insgesamt wurden 26 Kinder mit Nervenläsionen nach Frakturversorgung behandelt, davon 14 mit iatrogenen und 12 mit frakturbedingten Verletzungen. 16 Patienten (61,5 %) erhielten eine konservative Therapie, darunter Physiotherapie, Ergotherapie, transkutane elektrische Nervenstimulation (TENS) oder Lagerungsschienen. Zehn Kinder (38,5 %) wurden chirurgisch behandelt, meist bei iatrogenen Verletzungen, wobei häufig sensible und motorische Ausfälle des N. ulnaris vorlagen. Alle Operationen wurden mikrochirurgisch durchgeführt, teils mit Neurolyse und in einem Fall mit Nervenrekonstruktion durch Transplantation. Ergänzend zur Operation erhielten einige Kinder Physio- und Ergotherapie oder TENS.

Von den 26 behandelten Patienten mit Nervenverletzungen konnten neun (35 %) aufgrund eines Behandlungsabbruchs nicht in die Prognosestatistik einbezogen werden. Von den verbleibenden 17 erreichten alle eine vollständige Genesung (Restitutio ad integrum), unabhängig von der Behandlungsart. Zehn Kinder (59 %) wurden konservativ, sieben (41 %) chirurgisch behandelt. Die durchschnittliche Heilungsdauer betrug etwa 6,5 Monate. Die längste Genesungszeit lag bei 713 Tagen nach einer konservativen Therapie, die kürzeste bei nur 2 Tagen, ebenfalls nach konservativer Behandlung.

Fazit:

Die iatrogenen Nervenverletzungen im Zusammenhang mit SCHF sind nicht selten und stellen eine Herausforderung im klinischen Alltag dar. Unsere Ergebnisse zeigen, dass der N. ulnaris der am häufigsten von iatrogenen Schäden betroffene periphere Nerv ist, während der N. radialis und N. medianus häufiger mit der Fraktur selbst assoziiert sind. Eine frühzeitige Diagnostik iatgener Nervenläsionen ist essenziell, um schwere Schäden wie eine Axonotmesis oder Neurotmesis auszuschließen. Die Therapie der Nervenverletzung richtet sich nach dem Schweregrad und der Art der Schädigung. Insgesamt weisen die Kinder trotz unterschiedlicher Verletzungsschwere eine gute Prognose auf, wobei die vollständige Genesung unabhängig von der Schwere der Verletzung erreicht werden kann.

4 LITERATURVERZEICHNIS

1. McRae R. EM. Praxis der Frakturenbehandlung mit einem Gleitwort von Christian Krettek. 4. deutsche Auflage 2009 ed. München: Elsevier, Urban & Fischer Verlag; 1987.
2. Wessel LM, Günter SM, Jablonski M, Sinnig M, Weinberg AM. Wie lässt sich die Wachstumsprognosenach kindlicher suprakondylärer Humerusfrakturerfassen? Der Orthopäde. 2003;32(9):824-32.
3. Schaffer K, Bohm R, Dietz HG. Die elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN) der suprakondylären Humerusfraktur im Kindesalter. Unfallchirurg. 2007;110(10):852-8.
4. Cheng JC, Ng BK, Ying SY, Lam PK. A 10-year study of the changes in the pattern and treatment of 6,493 fractures. J Pediatr Orthop. 1999;19(3):344-50.
5. Cheng JC, Shen WY. Limb fracture pattern in different pediatric age groups: a study of 3,350 children. J Orthop Trauma. 1993;7(1):15-22.
6. Marzi. Kindertraumatologie. Auflage, editor: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 2009.
7. Houshian S, Mehdi B, Larsen MS. The epidemiology of elbow fracture in children: analysis of 355 fractures, with special reference to supracondylar humerus fractures. J Orthop Sci. 2001;6(4):312-5.
8. Barr LV. Paediatric supracondylar humeral fractures: epidemiology, mechanisms and incidence during school holidays. J Child Orthop. 2014;8(2):167-70.
9. Shamsuddin SA, Penafort R, Sharaf I. Crossed-pin versus lateral-pin fixation in pediatric supracondylar fractures. Med J Malaysia. 2001;56 Suppl D:38-44.
10. Gera SK, Tan M, Lim YG, Lim K. Displaced Supracondylar Humerus Fractures in Children - Are They All Identical? Malays Orthop J. 2017;11(2):40-4.
11. Lacher M, Schaeffer K, Boehm R, Dietz HG. The treatment of supracondylar humeral fractures with elastic stable intramedullary nailing (ESIN) in children. J Pediatr Orthop. 2011;31(1):33-8.
12. Madjar-Simic I, Talic-Tanovic A, Hadziahmetovic Z, Sarac-Hadzihalilovic A. Radiographic assessment in the treatment of supracondylar humerus fractures in children. Acta Inform Med. 2012;20(3):154-9.
13. W. G. Die Supracondyläre Humerusfraktur im Kindesalter [Dissertation]. Würzburg1989.
14. Holt JB, Glass NA, Shah AS. Understanding the Epidemiology of Pediatric Supracondylar Humeral Fractures in the United States: Identifying Opportunities for Intervention. J Pediatr Orthop. 2018;38(5):e245-e51.
15. Weinberg AM, Marzi I, Gunter SM, Wessel L, Riedel J, von Laer L. Die suprakondyläre Oberarmfraktur im Kindesalter – eine Effizienzstudie. Unfallchirurg. 2002;105(3):208-16.
16. Khoshbin A, Leroux T, Wasserstein D, Wolfstadt J, Law PW, Mahomed N, et al. The epidemiology of paediatric supracondylar fracture fixation: a population-based study. Injury. 2014;45(4):701-8.
17. Maity A, Mondal BC, Saha D, Roy DS. A prospective randomized, double-blind, controlled clinical trial comparing epidural butorphanol plus corticosteroid with corticosteroid alone for sciatica due to herniated nucleus pulposus. Perspect Clin Res. 2012;3(1):16-21.
18. Zalpour C. Anatomie Physiologie 5., überarbeitete und ergänzte Auflage ed. München: Elsevier GmbH; 2022.

19. Schiebler TH. Anatomie 9. Auflage ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2005.
20. Benninghoff AD, D. Anatomie. Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie (Bd. 1). Zelle, Gewebe, Entwicklung, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem. 16. Auflage ed: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 2002.
21. Rauber AK, F., Leonhardt, H. Bewegungsapparat (Anatomie des Menschen 1). Stuttgart: Thieme; 1987.
22. Schünke M. SE, Schumacher U., Voll M., Wesker K. Prometheus Lernatlas der Anatomie. 2. Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2007.
23. Rengier F. BASICS Anatomie - Leitungsbahnen. Auflage, editor. München: Elsevier GmbH; 2019.
24. Marzi I. Kindertraumatologie. 3. Auflage ed. Berlin Heidelberg: Springer Verlang; 2016.
25. Schneimüller D MI, Meenen N. S1-Leitlinie: Suprakondyläre Humerusfraktur beim Kind: Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie e.V.; 12/2014.
26. Laer Lv. Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. 4. Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2001.
27. Skaggs DL, Hale JM, Bassett J, Kaminsky C, Kay RM, Tolo VT. Operative treatment of supracondylar fractures of the humerus in children. The consequences of pin placement. *J Bone Joint Surg Am.* 2001;83(5):735-40.
28. Vaquero-Picado A, Gonzalez-Moran G, Moraleda L. Management of supracondylar fractures of the humerus in children. *EFORT Open Rev.* 2018;3(10):526-40.
29. Kocher MS, Kasser JR, Waters PM, Bae D, Snyder BD, Hresko MT, et al. Lateral entry compared with medial and lateral entry pin fixation for completely displaced supracondylar humeral fractures in children. A randomized clinical trial. *J Bone Joint Surg Am.* 2007;89(4):706-12.
30. Jaschke W, Stojanovic R. [Adequate treatment of supracondylar fracture of the humerus with associated brachial artery and nerve injury in childhood (author's transl)]. *Z Kinderchir.* 1981;32(4):353-60.
31. Clusmann H, Pallua, Pape, Tingart. Chirurgie in 5 Tagen. Band 2 ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2012.
32. Moritz JD, Berthold LD, Soenksen SF, Alzen GF. Ultrasound in diagnosis of fractures in children: unnecessary harassment or useful addition to X-ray? *Ultraschall Med.* 2008;29(3):267-74.
33. Rathfelder FJ, Paar O. [Possibilities for using sonography as a diagnostic procedure in fractures during the growth period]. *Unfallchirurg.* 1995;98(12):645-9.
34. Rabiner JE, Khine H, Avner JR, Friedman LM, Tsung JW. Accuracy of point-of-care ultrasonography for diagnosis of elbow fractures in children. *Ann Emerg Med.* 2013;61(1):9-17.
35. Eckert K, Ackermann O, Janssen N, Schweiger B, Radeloff E, Liedgens P. Accuracy of the sonographic fat pad sign for primary screening of pediatric elbow fractures: a preliminary study. *J Med Ultrason* (2001). 2014;41(4):473-80.
36. Eckert K, Ackermann O. [Sonographic fracture diagnosis in children]. *Unfallchirurg.* 2014;117(4):355-68.
37. Norell HG. Roentgenologic visualization of the extracapsular fat; its importance in the diagnosis of traumatic injuries to the elbow. *Acta radiol.* 1954;42(3):205-10.
38. Eckert K, Ackermann O, Schweiger B, Radeloff E, Liedgens P. Ultrasound evaluation of elbow fractures in children. *J Med Ultrason* (2001). 2013;40(4):443-51.

39. McLennan MK. Radiology rounds. Supracondylar fracture of the distal humerus. *Can Fam Physician*. 1997;43:857, 64-9, 71-2.
40. Poreda S. Operative Versorgung der suprakondylären Humerusfraktur im Kindesalter mit ESIN und Kirschnerdraht-Osteosynthese – eine Komplikationsanalyse (Dissertation). München2019.
41. Waldt S EM, Wörtler K. Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskeletten Radiologie. 2. unveränderte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2017.
42. von Laer L. Die supracondyläre Humerusfraktur im Kindesalter. *Arch Orthop Trauma Surg* (1978). 1979;95(1-2):123-40.
43. Weinberg AM, Frei B, Holweg P. Suprakondyläre Humerusfraktur im Kindesalter. *Unfallchirurg*. 2020;123(4):309-25.
44. Bohn BB, O. & Werbeck, Ruediger. Konservative und operative Therapie der suprakondylären Humerusfraktur im Kindesalter. *Obere Extremität*. 2010;5. 143-50.
45. Josek C. Retrospektive Analyse von kindlichen supra- und y-condylären Humerusfrakturen im Zeitraum 2005-2010 unter besonderer Berücksichtigung des Verlaufs von nervalen Funktionsstörungen (Dissertation). Berlin2017.
46. Green DW, Widmann RF, Frank JS, Gardner MJ. Low incidence of ulnar nerve injury with crossed pin placement for pediatric supracondylar humerus fractures using a mini-open technique. *J Orthop Trauma*. 2005;19(3):158-63.
47. Mostafavi HR, Spero C. Crossed pin fixation of displaced supracondylar humerus fractures in children. *Clin Orthop Relat Res*. 2000(376):56-61.
48. Dietz I, Schmittenbecher, Slongo, Sommerfeldt. *Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie*. Heidelberg: Springer-Verlag GmbH; 2011.
49. Griffin KJ, Walsh SR, Markar S, Tang TY, Boyle JR, Hayes PD. The pink pulseless hand: a review of the literature regarding management of vascular complications of supracondylar humeral fractures in children. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2008;36(6):697-702.
50. Tomaszewski R, Wozowicz A, Wysocka-Wojakiewicz P. Analysis of Early Neurovascular Complications of Pediatric Supracondylar Humerus Fractures: A Long-Term Observation. *Biomed Res Int*. 2017;2017:2803790.
51. Gutwerk A, Behrendt P, Vetter S, Menzendorf L, Oates E, Jazra S, et al. Retrospective Mid-Term Follow-Up of Posttraumatic and Iatrogenic Neurovascular Complications in Surgically Treated Paediatric Patients with Distal Humerus Fracture. *Children (Basel)*. 2022;9(9).
52. Mohammadzadeh MA, Mohammadzadeh M, Mohammadzadeh A, Herfatkar R, Mohammadzadeh V, Baghi I, et al. Arterial damage accompanying supracondylar fractures of the humerus. *Trauma Mon*. 2012;16(4):160-3.
53. Louahem D, Cottalorda J. Acute ischemia and pink pulseless hand in 68 of 404 gartland type III supracondylar humeral fractures in children: Urgent management and therapeutic consensus. *Injury*. 2016;47(4):848-52.
54. Franklin CC, Skaggs DL. Approach to the pediatric supracondylar humeral fracture with neurovascular compromise. *Instr Course Lect*. 2013;62:429-33.
55. Omid R, Choi PD, Skaggs DL. Supracondylar humeral fractures in children. *J Bone Joint Surg Am*. 2008;90(5):1121-32.
56. Badkoobehi H, Choi PD, Bae DS, Skaggs DL. Management of the pulseless pediatric supracondylar humeral fracture. *J Bone Joint Surg Am*. 2015;97(11):937-43.
57. Gosens T, Bongers KJ. Neurovascular complications and functional outcome in displaced supracondylar fractures of the humerus in children. *Injury*. 2003;34(4):267-73.

58. Kelsch G, Savvidis E, Jenal G, Parsch K. Begleitende Gefäßkomplikationen bei suprakondylären Humerusfrakturen des Kindes. *Unfallchirurg*. 1999;102(9):708-15.
59. Campbell CC, Waters PM, Emans JB, Kasser JR, Millis MB. Neurovascular injury and displacement in type III supracondylar humerus fractures. *J Pediatr Orthop*. 1995;15(1):47-52.
60. Haasbeek JF, Cole WG. Open fractures of the arm in children. *J Bone Joint Surg Br*. 1995;77(4):576-81.
61. Weise K, Schwab E, Scheufele TM. Ellenbogenverletzungen im Kindesalter. *Der Unfallchirurg*. 1997;100(4):255-69.
62. Schoenecker PL, Delgado E, Rotman M, Sicard GA, Capelli AM. Pulseless arm in association with totally displaced supracondylar fracture. *J Orthop Trauma*. 1996;10(6):410-5.
63. J. Krenzien HR, A. Gußmann, A. Schildknecht. Das Compartmentsyndrom und die Volkmann-Kontraktur – sind sie bei der supracondylären Humerusfraktur vermeidbar? *Die Chirurgie*. 1998.
64. R. Böttcher KB, F. Dähne, A. Eisenschenk. Diagnose und Therapie der Volkmann-Kontraktur. *Trauma und Berufskrankheit*. 2006.
65. Wendling-Keim DS, Binder M, Dietz HG, Lehner M. Prognostic Factors for the Outcome of Supracondylar Humeral Fractures in Children. *Orthop Surg*. 2019;11(4):690-7.
66. Bashyal RK, Chu JY, Schoenecker PL, Dobbs MB, Luhmann SJ, Gordon JE. Complications after pinning of supracondylar distal humerus fractures. *J Pediatr Orthop*. 2009;29(7):704-8.
67. Kwok IH, Silk ZM, Quick TJ, Sinisi M, MacQuillan A, Fox M. Nerve injuries associated with supracondylar fractures of the humerus in children: our experience in a specialist peripheral nerve injury unit. *Bone Joint J*. 2016;98-B(6):851-6.
68. Babal JC, Mehlman CT, Klein G. Nerve injuries associated with pediatric supracondylar humeral fractures: a meta-analysis. *J Pediatr Orthop*. 2010;30(3):253-63.
69. Wang SI, Kwon TY, Hwang HP, Kim JR. Functional outcomes of Gartland III supracondylar humerus fractures with early neurovascular complications in children: A retrospective observational study. *Medicine (Baltimore)*. 2017;96(25):e7148.
70. McGraw JJ, Akbarnia BA, Hanel DP, Keppler L, Burdge RE. Neurological complications resulting from supracondylar fractures of the humerus in children. *J Pediatr Orthop*. 1986;6(6):647-50.
71. Joiner ER, Skaggs DL, Arkader A, Andras LM, Lightdale-Miric NR, Pace JL, et al. Iatrogenic nerve injuries in the treatment of supracondylar humerus fractures: are we really just missing nerve injuries on preoperative examination? *J Pediatr Orthop*. 2014;34(4):388-92.
72. Eberl R, Eder C, Smolle E, Weinberg AM, Hoellwarth ME, Singer G. Iatrogenic ulnar nerve injury after pin fixation and after antegrade nailing of supracondylar humeral fractures in children. *Acta Orthop*. 2011;82(5):606-9.
73. Fernandez FF EO, Wirth. *Suprakondyläre Humerusfrakturen im Wachstumsalter*. OUP. 2016;3: 140-5.
74. Louahem DM, Nebunescu A, Canavese F, Dimeglio A. Neurovascular complications and severe displacement in supracondylar humerus fractures in children: defensive or offensive strategy? *J Pediatr Orthop B*. 2006;15(1):51-7.
75. Huggenberger S, MN, Schröder H., Cozzi B., Granato A, Merighi A. *Neuroanatomie des Menschen*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2019.
76. Zilles K. *TBN. Anatomie*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2010.

77. Burnett MG, Zager EL. Pathophysiology of peripheral nerve injury: a brief review. *Neurosurg Focus*. 2004;16(5):E1.
78. Liu HM, Yang LH, Yang YJ. Schwann cell properties: 3. C-fos expression, bFGF production, phagocytosis and proliferation during Wallerian degeneration. *J Neuropathol Exp Neurol*. 1995;54(4):487-96.
79. Althagafi A, Nadi M. Acute Nerve Injury. StatPearls. Treasure Island (FL)2024.
80. Chhabra A, Ahlawat S, Belzberg A, Andressik G. Peripheral nerve injury grading simplified on MR neurography: As referenced to Seddon and Sunderland classifications. *Indian J Radiol Imaging*. 2014;24(3):217-24.
81. Ho ES. Evaluation of pediatric upper extremity peripheral nerve injuries. *J Hand Ther*. 2015;28(2):135-42; quiz 43.
82. A. Bender JR, B. Feddersen, G. Fesl. *Kurzlehrbuch Neurologie*. 4. Auflage ed. München: Elsevier GmbH; 2022.
83. DGOU D, DGNC, DGPRÄC, DGN. S3-Leitlinie: Versorgung peripherer Nervenverletzungen. überarbeiteter Version ed: AWMF online; 2023.
84. Schelle T. Methodik und was kann die Nervensonografie. *Klinische Neurophysiologie*, Georg Thieme Verlag. 2015:79-89.
85. Lyons JP, Ashley E, Hoffer MM. Ulnar nerve palsies after percutaneous cross-pinning of supracondylar fractures in children's elbows. *J Pediatr Orthop*. 1998;18(1):43-5.
86. Brown IC, Zinar DM. Traumatic and iatrogenic neurological complications after supracondylar humerus fractures in children. *J Pediatr Orthop*. 1995;15(4):440-3.
87. Jain S, Loganathan D, Habib Z, Mohan R. Displaced Pediatric Supracondylar Fracture (Gartland Type II and III): The Impact of Wire Fixation Type. *Cureus*. 2024;16(10):e72110.
88. Ramachandran M, Birch R, Eastwood DM. Clinical outcome of nerve injuries associated with supracondylar fractures of the humerus in children: the experience of a specialist referral centre. *J Bone Joint Surg Br*. 2006;88(1):90-4.
89. Claireaux H, Goodall R, Hill J, Wilson E, Coull P, Green S, et al. Multicentre collaborative cohort study of the use of Kirschner wires for the management of supracondylar fractures in children. *Chin J Traumatol*. 2019;22(5):249-54.
90. Mangwani J, Nadarajah R, Paterson JM. Supracondylar humeral fractures in children: ten years' experience in a teaching hospital. *J Bone Joint Surg Br*. 2006;88(3):362-5.
91. Ballal MS, Garg NK, Bass A, Bruce CE. Comparison between collar and cuffs and above elbow back slabs in the initial treatment of Gartland type I supracondylar humerus fractures. *J Pediatr Orthop B*. 2008;17(2):57-60.
92. Roberts L, Strelzow J, Schaeffer EK, Reilly CW, Mulpuri K. Nonoperative Treatment of Type IIA Supracondylar Humerus Fractures: Comparing 2 Modalities. *J Pediatr Orthop*. 2018;38(10):521-6.
93. Afaque SF, Singh A, Mahajan R, Ranjan R, Panda AK, Mishra A. Comparison of clinic-radiological outcome of cross pinning versus lateral pinning for displaced supracondylar fracture of humerus in children: A randomized controlled trial. *J Clin Orthop Trauma*. 2020;11(2):259-63.
94. Higuchi DH, de Oliveira GA, Alves JP, Lebedenco L, Dobashi ET. Supracondylar Fractures in Children: A Systematic Review of Treatment Options. *Acta Ortop Bras*. 2024;32(3):e278420.
95. Khademolhosseini M, Abd Rashid AH, Ibrahim S. Nerve injuries in supracondylar fractures of the humerus in children: is nerve exploration indicated? *J Pediatr Orthop B*. 2013;22(2):123-6.

96. Joyce KM, Dony A, Whitehouse H, Foster P, Bhat W, Bains R, et al. Neurovascular injury from supracondylar fractures in children: a 10-year experience of 762 cases. *J Hand Surg Eur Vol.* 2024;49(4):483-9.
97. Cramer KE, Green NE, Devito DP. Incidence of anterior interosseous nerve palsy in supracondylar humerus fractures in children. *J Pediatr Orthop.* 1993;13(4):502-5.
98. Hülsemann W, Habenicht R, Mann M. Management von Nervenschädigungen und Durchblutungsstörungen bei suprakondylären Humerusfrakturen im Kindesalter. *Obere Extremität.* 2010;5(3):151-7.
99. Guner S, Guven N, Karadas S, Ceylan MF, Turktas U, Gokalp MA, et al. Iatrogenic or fracture-related nerve injuries in supracondylar humerus fracture: is treatment necessary for nerve injury? *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* 2013;17(6):815-9.
100. Krusche-Mandl I, Aldrian S, Kottstorfer J, Seis A, Thalhammer G, Egkher A. Reply to comment on Irena Krusche-Mandl et al. Crossed pinning in paediatric supracondylar humerus fractures: a retrospective cohort analysis. *Int Orthop.* 2013;37(3):559.
101. Althaus CS. Dissertation: Posttraumatische Nervenläsionen am kindlichen Ellenbogen. Regensburg: Fakultät für Medizin der Universität Regensburg; 2022.
102. Kraus R, Schmittenbecher P. Was tun bei postoperativem Ulnarisschaden nach Kirschner-Draht-Osteosynthese der suprakondylären Humerusfraktur im Kindesalter? *Der Unfallchirurg.* 2019;122(5):339-44.

5 TABEILEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Tabelle 1 Die Tabelle 1 zeigt die Hauptmuskeln, die für die Bewegung im Ellenbogen zuständig sind (Seite 5)
- Tabelle 2 Die Klassifikation der SCHF nach Gartland (Seite 6)
- Tabelle 3 Ist eine Zusammenfassung der Seddon- und Sunderland Klassifikationen (Seite 20)
- Tabelle 4 Bietet eine Übersicht zu den Ein- und Ausschlusskriterien der Patienten (Seite 25)
- Tabelle 5 Anzahl der konservativ behandelten Patienten nach Frakturtyp (Seite 29)
- Tabelle 6 Übersicht der präoperativen neurologischen Ausfälle nach Art des Ausfalls (Seite 31)
- Tabelle 7 Übersicht der postoperativen neurologischen Ausfälle nach Art des Ausfalls (Seite 31)
- Tabelle 8 Anzahl der Patienten bei der jeweiligen Behandlungsart (Seite 35)
- Tabelle 9 Anzahl der verletzten Kinder über die vier Jahre (Seite 38)
- Tabelle 10 Verteilung der primären Nervenläsionen in verschiedenen Studien (Seite 44)
- Tabelle 11 Verteilung der sekundären Nervenläsionen in verschiedenen Studien (Seite 47)

- Abb. 1 Frakturmechanismus der Extensionsfraktur (Eigene Zeichnung) (Seite 2)
- Abb. 2 Bild I-links: Suprakondyläre Humerusextensionsfraktur vor und nach Reposition, Bild II-rechts Suprakondyläre Humerusflexionfraktur vor und nach Reposition (Eigene Zeichnung) (Seite 3)
- Abb. 3 Klassifikation der suprakondylären Humerusfraktur (SCHF) nach v. Laer (Typ I-IV) (Eigene Zeichnung) (Seite 6)
- Abb. 4 zeigt ein sonografisches Bild vom Ellenbogengelenk dorsal mit einem positiven Fettkörperzeichen und somit Verdacht auf Fraktur des distalen Humerus (= Hämarthros) (Seite 8)
- Abb. 5 Positive vordere und hintere Fettpolsterzeichen in einer seitlichen Röntgenaufnahme (Seite 9)
- Abb. 6 Bild a zeigt einen unauffälligen Befund, Bilder b und c zeigen eine Extensionsfraktur mit pathologischem Verlauf der Rogers-Hilfslinie (Seite 10)
- Abb. 7 Physiologischer Baumanwinkel in einem a.p. Röntgenbild vom Ellenbogen (Seite 11)
- Abb. 8 zeigt ein Kind mit einer Blount-Schlinge bei einer SCHF (Seite 12)
- Abb. 9 zeigt eine SCHF Typ II vor (a und b) und nach (c und d) der Versorgung mittels K-Draht Osteosynthese (Seite 14)
- Abb. 10 Geschlechterverteilung der suprakondylären Humerusfraktur (Seite 27)
- Abb. 11 Frakturklassifikation nach von Laer (Seite 28)
- Abb. 12 Frakturklassifikation- und Geschlechterverteilung (Seite 28)
- Abb. 13 illustriert die Verteilung der Patienten nach konservativer und operativer Behandlung (Seite 30)
- Abb. 14 Anzahl der betroffenen Nerven bei iatrogenen Nervenverletzungen (Seite 32)
- Abb. 15 Behandlungsschema der Nervenläsion in der kinderchirurgischen Klinik Mannheim (Seite 34)
- Abb. 16 Die Häufigkeitsverteilung der Behandlung der Nervenverletzung (Seite 35)
- Abb. 17 Kaplan-Meier-Kurve mit dem Verlauf der Nervenverletzungsrate im Verhältnis zu Zeit (Seite 37)

6 LEBENSLAUF

7 DANKSAGUNG

Ich möchte meinem Doktorvater, Herrn Prof. em. Dr. Dr. h.c. L. M. Wessel, meinen tiefen Dank aussprechen. Seine Unterstützung, sein Fachwissen und seine Anregungen haben diese Arbeit entscheidend geprägt und mich während des gesamten Prozesses begleitet.

Mein besonderer Dank gilt auch Frau Dr. Susanne Deeg, die mich als Betreuerin mit großem Engagement durch die Dissertation geführt hat. Ihre wertvollen Rückmeldungen und ihr beständiger Einsatz waren für mich eine große Hilfe.

Ferner bedanke ich mich bei Frau S. Büttner von der Abteilung für medizinische Statistik des Universitätsklinikums Mannheim, die mich mit ihrer Unterstützung und Beratung bei der statistischen Analyse der Daten unterstützt hat.

Meiner Familie und insbesondere meiner Frau danke ich von Herzen für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr Verständnis in allen Phasen meines Studiums und der Arbeit an dieser Dissertation. Ohne sie wäre diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.