

Obere Extremität 2012 · 7:228–238
DOI 10.1007/s11678-012-0188-7
Eingegangen: 11. März 2012
Angenommen: 11. Juni 2012
Online publiziert: 23. November 2012
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Johannes Mayr¹ · Erich Rutz² · Olaf Magerkurth³ · Gaston De Bernardis¹

¹Abteilung für Kinderchirurgie, Universitätskinderspital beider Basel, Basel, Schweiz

²Abteilung für Kinder-, und Neuroorthopädie, Universitätskinderspital beider Basel, Basel, Schweiz

³Abteilung für Kinderradiologie, Universitätskinderspital beider Basel, Basel, Schweiz

Behandlung der kindlichen proximalen Humerusfrakturen

Einleitung

Proximale Humerusfrakturen machen 2–5 % aller Frakturen langer Röhrenknochen bei Kindern und Jugendlichen aus, und 3–6 % aller Epiphysenverletzungen [9, 25, 27]. Ziel dieser Arbeit ist es, das hohe Spontankorrekturpotenzial von Fehlstellungen nach proximalen Humerusfrakturen aufzuzeigen und in die Behandlungsplanung einzubeziehen, sowie die operativen Behandlungsmöglichkeiten von Frakturen und Epiphysenlösungen am proximalen Humerusende im Kindes- und Jugendalter darzustellen. Die verschiedenen Frakturformen am proximalen Humerusende weisen unterschiedliche Altersgipfel auf.

Diagnose und Klassifikation

Bei der Inspektion des Patienten erweckt eine Schwellung im Bereich der Schulter den Verdacht auf eine Fraktur. Diese kann im Vergleich zur Gegenseite aber nur diskret ausgebildet sein, da das Schultergelenk von Akromion, Skapula und zahlreichen Muskeln und Sehnen verdeckt wird. Eine sanfte und schonende Palpation kann helfen, mögliche Differenzialdiagnosen einzuzgrenzen und eine adäquate Bildgebung zu wählen. Die Differenzialdiagnosen zur proximalen Humerusfraktur sind mit absteigender Häufigkeit: Klavikulafraktur, akromioklavikuläre Luxation, Osteomyelitis oder Omarthritis, Schulterluxation und Läsion des Plexus brachialis. Bei Verdacht auf eine proximale Humerusfraktur wird grundsätzlich, mit Ausnahme des Säuglingsalters, eine a.-p.-Aufnahme und eine Y-Aufnah-

me empfohlen. Auf eine transthorakale Aufnahme sollte vorerst aus strahlenhygienischen Gründen verzichtet werden, da diese meistens keine Zusatzinformationen bringt. Bei Neugeborenen und Babys hat der Ultraschall zur Primärdiagnostik der sehr seltenen proximalen Humerusverletzungen inzwischen einen klinischen Stellenwert erlangt, zumal auch instabile Salter-Harris-Typ-I-Epiphysenlösungen in der statischen und dynamischen Sonographie unter Verwendung von mittel- bis hochauflösenden Linearschallköpfen sicher nachgewiesen werden können, auch wenn noch keines der drei proximalen Humeruskopf-Epiphysenkernzentren sekundär ossifiziert ist [11].

Spezielle und erweiterte bildgebende Verfahren werden im Rahmen der Klassifikationsläuterung der Frakturtypen besprochen. Die Klassifikation erfolgt nach Frakturlokalisation. Die verschiedenen Frakturformen werden in Fugenfrakturen, metaphysäre Fakturen sowie Abrisse der Tubercula majus und minus unterteilt.

Salter-Harris-Typ-I-Epiphysenlösung

Salter-Harris-Typ-I-Epiphysenlösungen treten v. a. bis zum 5. Lebensjahr auf, wobei ein Gipfel im Neugeborenenalter (Geburstraumata) und Kleinkindalter liegt. Eine proximale Humerusepiphysenlösung beim Neugeborenen (Salter-Harris-I-Verletzung) [12] ist wegen der noch fehlenden sekundären Knochenkernosifikation im Humeruskopfzentrum am Röntgenbild nur aufgrund von indirekten Frakturzeichen (z. B. verbreiterter Weichteilschatten) erkennbar, im Ultraschall [11] und MRI hingegen gut nachweisbar.

Salter-Harris-Typ-II-Epiphysenlösung

Ab dem 11. Lebensjahr werden v. a. Salter-Harris-Typ-II-Epiphysenlösungen beobachtet [3]. Der Anteil der dislozierten Epiphysenlösungen überwiegt dabei gegenüber den undislozierten Epiphysenlösungen. Je größer der metaphysäre Keil und je steiler die Bruchfläche zur Epiphysenfuge verläuft, desto instabiler verhält sich die Fraktur auch nach erfolgter Reposition. Bei Adoleszenten mit geringem Remodellingpotenzial ist eine sichere Retention des Repositonsergebnisses wichtig, um ein gutes funktionelles Ausheilungsergebnis sicherzustellen [12].

Salter-Harris-Typ-III- und -Typ-IV-Epiphysenfrakturen

Über die Salter-Harris-III-Fraktur am proximalen Humerus wurde selten anekdotisch berichtet, und über eine Salter-Harris-IV-Frakturen gibt es in der Literatur keinen Bericht.

Subkapitale metaphysäre Humerusfrakturen

Subkapitale metaphysäre Humerusfrakturen stellen die häufigste proximale Humerusfrakturform insgesamt dar [31]. Sie haben ihren Altersgipfel zwischen dem 5. und 11. Lebensjahr [12] und zeigen meist, bedingt durch das v. a. dorsal und medial kräftig stabilisierende Periost, eine tolerierbare Dislokation [11] und kaum multifragmentäre Frakturformen. Subkapitale metaphysäre Humerusfrakturen können dadurch meist konservativ behandelt

Tab. 1 Klassifikation nach Neer und Horwitz [23]	
Frakturtypklassifikation	Dislokation
I	< 5 mm
II	< 1/3 Schaftbreite
III	1/3–2/3 Schaftbreite
IV	> 2/3 Schaftbreite

werden [8]. Kommt es dennoch zur Ausbildung einer dislozierten Fraktur, so liegt das distale Fragment häufig durch den Muskelzug des Musculus pectoralis major nach vorne und medial verlagert und zeigt v. a. eine Antekurvationsstellung [8].

Bei den proximalen Humerusfrakturen kann das Ausmaß der Ad-latus-Dislokation mithilfe der Einteilung nach Neer und Horwitz [23] angegeben werden (► Tab. 1), da diese maßgeblich die Wahl der Therapie beeinflusst.

Abrissfrakturen des Tuberculum majus und minus

Der Abriss des Tuberculum majus ist meistens mit einer Schulterluxation assoziiert. Der Abriss des Tuberculum minus entsteht durch starke externe Rotationskräfte im präpubertären Alter und wird bei kleinen und wenig dislozierten Fragmenten besser in einer axillaren Aufnahme sichtbar oder muss mittels CT oder MRI dargestellt werden [19].

Pathologische proximale Humerusfrakturen

Der proximale Humerusmetaphysenbereich ist mit rund 51 % die häufigste Lokalisation juveniler Knochenzysten. Diese treten in allen Altersgruppen auf, wobei sie beim weiblichen Geschlecht leicht überwiegen [29]. Juvenile Knochenzysten am proximalen Humerusende werden meist durch pathologische Frakturen manifest. Da es sich dabei um mit klarer Flüssigkeit gefüllte Zysten mit fibröser Zystenwand handelt, kann man manchmal am Unfallröntgenbild ein „fallen fragment sign“ (dünnes Knochenfragment, das am Boden der flüssigkeitsgefüllten Knochenzyste liegt) erkennen.

Sehr häufig kommt es dabei zu gering dislozierten pathologischen Frakturen, und es bleibt ausreichend Zeit zur Abklä-

rung eines Knochentumors respektive der Knochenveränderung.

Primär bedarf es in diesen Fällen nur einer kindgerechten Schmerztherapie und eines Gilchrist-Verbands. Besteht Unklarheit über die Dignität der Knochenläsion, sollte die weitere Abklärung mittels MRI/CT oder Tumorbiopsie in Rücksprache mit einem Knochentumorzentrum erfolgen.

Maligne Osteosarkome wie auch das Ewing-Sarkom sind insgesamt selten, lokalisierten sich aber im Kindes-, und Adoleszentenalter nach dem Kniegelenkbereich, wo sie am häufigsten sind, am zweithäufigsten im Bereich des proximalen Humerus. Somit sind solche bösartigen Prozesse – wenn auch selten – immer im Hinterkopf zu behalten und fordern einen interdisziplinären Zugang gemeinsam mit den Onkologen, Radiologen und dem behandelnden Chirurgen. Ossäre Metastasen im Kindesalter stellen eine Rarität dar.

Differenzialdiagnose Kindesmisshandlung

Bei proximalen Humerusfrakturen von Kleinkindern und Babys ist als wichtige Differenzialdiagnose eine Kindesmisshandlung als Verletzungsursache in Betracht zu ziehen und auszuschließen [24]. Proximale Humerusfrakturen bei unter 18 Monate alten Kleinkindern oder Babys sind zwar keine typischen Misshandlungsfolgen, die Möglichkeit einer Misshandlung als Verletzungsursache sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden [28]. Hinweisend können eine verspätete Vorstellung im Spital nach der Fraktur, sowie eine Vorstellung durch eine andere Person als die beim Unfall anwesenden erziehungsberechtigten Personen, oder eine fehlende Besorgtheit der Eltern oder ein anderes auffälliges Elternverhalten sein [28]. Auch eine wechselnde oder unwahrscheinlich klingende Unfallhergangsschilderung und klinische oder radiologische Hinweise auf vorangegangene Verletzungen oder Frakturen, bzw. Frakturen unterschiedlichen Alters, sind bei misshandelten Kindern häufig anzutreffen [24].

Erstuntersuchung und Schmerztherapie

Die rasche Verabreichung einer adäquaten Schmerztherapie ist der vordringliche Wunsch von solcherart verletzten, bewusstseinsklaren Kindern.

Prüfung der Peripherie

Sensibilität, Motorik und Durchblutung des verletzten Arms sollten vorsichtig und genau untersucht und dokumentiert werden. Gefäßläsionen sind auch bei komplett dislozierten proximalen Humerusfrakturen im Wachstumsalter extrem selten [2, 16]. Zu bedenken ist jedoch, dass es sehr selten durch Zunahme des Frakturhämatoms auch im Verlauf zu einer Nervenfunktionsbeeinträchtigung oder Durchblutungsstörung im Bereich der Gefäßnervenscheide in der Axilla kommen kann.

Stumpfe Gefäßtraumata oder Überdehnungsstraumen können zu einer Intimaläsion der A. axillaris führen, die eine rasche Abklärung mit Duplexsonographie oder Angiographie erfordert [26]. Das kritische Zeitintervall für eine Rekonstruktion liegt unter 8 h [13]. Bei Bestätigung einer klinisch relevanten Gefäßverletzung wird nach notfallmäßiger Reposition und Retention der Fraktur der Arm abduziert und außenrotiert, und die Gefäßexploration über einen axillären Zugang vorgenommen [25].

Nervenläsionen bei dislozierten proximalen Humerusfrakturen sind sehr selten und haben eine gute Spontanheilungsprognose, sodass nach Versorgung der Fraktur der weitere Verlauf der Nervenläsion abgewartet werden kann [11].

Die Interposition eines Armnervs, z. B. des N. radialis, im Frakturspalt ist sehr selten und geht meist mit einer primären, vollständigen Lähmung des Nervs einher. Bei den häufiger vorkommenden Nerventeilläsionen wird eine neurophysiologische Untersuchung durchgeführt und bei günstigem Verlauf der Spontanheilungsverlauf abgewartet, der bis zu 9 Monate in Anspruch nehmen kann. Zusätzlich wird eine ergotherapeutische oder physiotherapeutische Behandlung, ggf. mit zusätzlicher Schienenbehandlung, durchgeführt.

Übersicht	Zusammenfassung · Abstract
<p>Remodellingpotenzial proximaler Humerusfrakturen</p> <p>Frakturen des proximalen Humerus weisen das ausgeprägteste Remodellingpotenzial aller Frakturen im Wachstumsalter auf [27]. Dazu trägt besonders das starke Längenwachstum bei, das von der proximalen Humerusepiphyse ausgeht. Diese Wachstumsfuge steuert rund 80 % zum Humeruslängenwachstum bei [7]. Des Weiteren begünstigt die Ausbildung des Schultergelenks als Kugelgelenk mit entsprechenden Korrekturmechanismen in allen drei Bewegungsebenen des Schultergelenkes das Remodelling in allen drei Raumebenen.</p> <p>Behandlungsprobleme und Wachstumsstörungen</p> <p>Im Vergleich zu anderen Fehlstellungen im proximalen Humerusbereich korrigieren sich Valgusfehlstellungen im Rahmen des Remodelling am geringsten [31]. Valgusfehlstellungen stören kosmetisch umso mehr, je weiter distal von der Epiphyse die Fraktur verläuft. Deshalb kommt der Vermeidung einer kosmetisch störenden, bleibenden Valgusfehlstellung wesentliche Bedeutung in der Behandlung proximaler Humerusfrakturen zu [31].</p> <p>Repositionshindernisse</p> <p>Die korrekte Reposition und sichere Retention von proximalen Humerusfrakturen von knapp vor dem Wachstumsfugeschluss stehenden Adoleszenten (Mädchen: 13–15 Jahre; Knaben 14–16 Jahre) gestaltet sich mitunter technisch aufwendig [1, 12]. Ein federnder Widerstand beim Repositionsmöver sollte den Verdacht auf ein Frakturinterponat erwecken. In den Frakturspalt eingeschlagene Weichteile (meist Periost, sehr selten Sehne des langen Bizepskopfs) [1], begründen in manchen Studien einen bis 52%igen Anteil offener Repositionen zur Behebung von Repositionshindernissen im Rahmen von operativen Frakturbehandlungen [1, 8]. Es wurde experimentell gezeigt, dass die Sehne des langen Bizepskopfs nur bei 100%iger Dislokation des distalen Fragments nach anterior mit dem Frakturbe-</p>	<p>Obere Extremität 2012 · 7:228–238 DOI 10.1007/s11678-012-0188-7 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012</p> <p>J. Mayr · E. Rutz · O. Magerkurth · G. De Bernardis</p> <p>Behandlung der kindlichen proximalen Humerusfrakturen</p> <p>Zusammenfassung</p> <p>Frakturen des proximalen Humerus im Kindesalter können wegen des hohen Spontankorrekturpotenzials für Fehlstellungen in der Nähe der proximalen Humeruswachstumsfuge in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle mit sehr gutem funktionellem Ergebnis konservativ behandelt werden. Ziel dieser Übersicht ist es, die Indikationen und Techniken für die operative Behandlung dieser Verletzungen im Wachstumsalter darzustellen. Indikationen zur primären Reposition und ggf. Stabilisation stellen kosmetisch störende Valgusfehlstellungen bei Kindern und dislozierte proximale Epiphysenlösungen und proximale Humerusfrakturen von vor dem Wachstumsabschluss stehenden Jugendlichen dar, da hier das Remodellingpotenzial fehlt. Während die geschlossene Reposition und perkutane Kirschner-Draht-Fixation von dislozierten proximalen Humerusfrakturen und Epiphysenlösungen sich durch die Möglichkeit die Drahtenden über die Hautoberfläche vorstehen zu lassen und dann ambu-</p> <p>lant zu entfernen, sowie die meist geringere Durchleuchtungszeit auszeichnet, fehlt dieser Methode die Übungsstabilität im Vergleich zur elastisch stabilen intramedullären Schienung („elastic stable intramedullary nailing“, ESIN). Die ESIN zeichnet sich dagegen durch Übungsstabilität aus, jedoch um den Preis eines 2. Eingriffes in Narkose für die Metallentfernung. Die für die ESIN notwendige exakte Vorreposition für die korrekte Einbringung der Markschenen erfordert meist eine längere Durchleuchtungszeit im Vergleich zur Stabilisation mit perkutan eingekochten Kirschner-Drähten. Die Interposition von Weichteilen wie Periost oder selten der Sehne des langen Bizepskopfs vorne im Frakturspalt bedingt einen erheblichen Anteil offener Repositionen (bis 50 %) bei operativer Frakturstabilisation.</p> <p>Schlüsselwörter Epiphysiolyse · Fraktur · Humerus · Kind · Subkapital</p> <p>The therapy of proximal humeral fractures in children</p> <p>Abstract</p> <p>Due to the outstanding remodeling capacity of the proximal humerus region in children, the majority of proximal humeral fractures and epiphyseal separations are managed without reduction by application of a Gilchrist bandage for 3 weeks. This overview aims to describe the indications for reduction and operative fracture stabilization and to describe the techniques applied to treat these injuries in children and adolescents. A visible valgus deformity in children and displaced epiphyseal fractures in adolescents with reduced remodeling capacity of the proximal end of the humerus represent the main indications for operative treatment. When closed reduction and percutaneous Kirschner (K) wire fixation is performed with the ends left through the skin, K-wires can be removed without general anesthesia in out-</p> <p>patient clinics and image intensifier radiation time is usually lower when compared with elastic stable intramedullary nailing (ESIN). However, K-wire fixation results in limited biomechanical stability thus precluding post-operative functional treatment without immobilization. The ESIN procedure allows post-operative functional treatment but requires a second surgical procedure under general anesthesia for implant removal. The interposition of soft tissues such as the periosteum or in rare cases the tendon of the long head of the biceps muscle causes a considerable rate (50 %) of open reductions when performing operative fracture stabilization.</p> <p>Keywords Epiphysiolyse · Fracture · Humerus · Child · Subcapital</p>

reich in Berührung kommt. In diesen Fällen wird ein präoperatives MR empfohlen [22].

Posttraumatische Wachstumsstörungen

Hemmende Wachstumsstörungen kommen sehr selten nach proximalen Humerusepiphysenlösungen und in Folge von operativen Komplikationen vor.

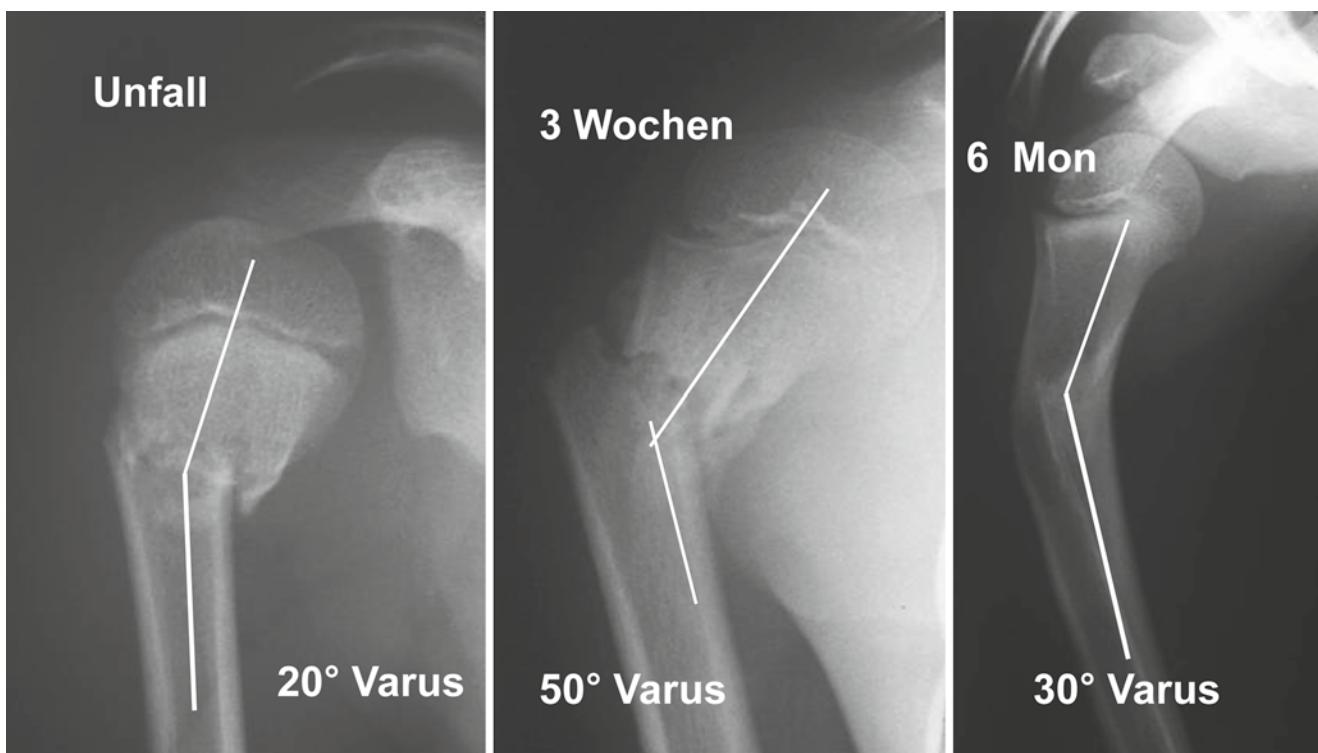


Abb. 1 ▲ Im Gilchrist-Verband ohne vorangegangene Reposition behandelte, diamentaphysäre Humerusfraktur, die am Unfallröntgenbild in Abduktionsstellung des Schultergelenks 20° Varusfehlstellung und 15 % Ad-latus-Verschiebung (bezogen auf die Schaftbreite) aufweist. Im Gilchrist-Verband kommt es innerhalb von 3 Wochen zur übungsstabilen Teilkonsolidation der Fraktur mit abstützender Kallusbildung medial, jedoch zur Zunahme des Varus auf 50°. Sechs Monate später hat sich die Varusstellung bereits auf 30° reduziert bei nunmehr zirkular konsolidierter Fraktur, wobei die Varusstellung klinisch nicht störend in Erscheinung tritt, und eine seitengleich freie Schulterbeweglichkeit besteht

Stimulative Wachstumsstörungen können zu einer geringen, funktionell nicht störenden Humerusverlängerung von ca. 1 cm führen [15].

Behandlungsalgorithmus

Die Behandlung der proximalen Humerusfrakturen ist in erster Linie vom Ausmaß der Frakturdisklokation, vom Knochenalter des Kindes und bei Teenagern wegen der Geschlechtsunterschiede im Knochenalter auch indirekt vom Geschlecht abhängig.

Konservative Behandlungsstrategie für proximale Humerusfrakturen

Im Alter bis zum 8. Lebensjahr: Auch bei Verschiebung um Schaftbreite und Ad-latus-Verschiebung um mehr als Schaftbreite, sowie bei Verkürzung um bis zu 2,5 cm, jedoch ohne Hautanspießung („tenting“), kann die konservative Therapie mit kindgerechter Schmerzbehandlung durch 3–6 Tage und Gilchrist-Verbandanlage

für 3 Wochen in Absprache mit der Familie durchgeführt werden [2, 18].

Bei bis zu 10-jährigen Mädchen und bis zu 12-jährigen Knaben mit im Röntgenbild noch breit offener proximaler Humerusepiphysenfuge kann mit Einverständnis der Familie unter Hinweis auf die zu erwartende Spontankorrektur [31] eine Antekurvation, Varusfehlstellung oder Rekurvierung von <60°, und eine Valgusfehlstellung von <20° toleriert werden.

Bei über 11-jährigen Mädchen und über 13-jährigen Knaben ist eine Antekurvation, Varusfehlstellung oder Rekurvierung von <25°, oder eine Valgusfehlstellung von <12° tolerierbar.

Die überwiegende Zahl von proximalen Humerusfrakturen kann auf diese Weise mit sehr guten funktionellen Ergebnissen konservativ behandelt werden [4, 18], wie **Abb. 1 und 2 zeigen**.

Die proximale Humeruswachstumsfuge trägt bei männlichen Jugendlichen bis zum 17. Lebensjahr, bei weiblichen Jugendlichen bis zum 15. Lebensjahr zum

korrigierenden Längenwachstum am proximalen Humerusende bei [5].

Verspätet vorgestellte proximale Humerusfrakturen

Verspätet vorgestellte proximale Humerusfrakturen können im Falle von metaphysären Frakturen noch innerhalb der ersten 1–3 Wochen mittels offener Kallusmobilisation reponiert und stabilisiert werden, wenn keine Aussicht auf eine ausreichende Spontankorrektur gegeben ist. Zu einem späteren Zeitpunkt ist ggf. eine Korrekturosteotomie erforderlich, aber nur wenn eine bleibende Funktioneinschränkung der Schulterfunktion tatsächlich eintritt und sich im Verlauf nicht verbessert. In inakzeptabler Dislokation verheilende Epiphysenlösungen bei noch wachsender proximaler Humerusfuge sollten nicht nach mehr als einer Woche nach dem Trauma nachreponiert werden, um die noch wachsende Fuge nicht zu schädigen. Hier sollte besser abgewartet werden, ob nicht doch eine ausrei-

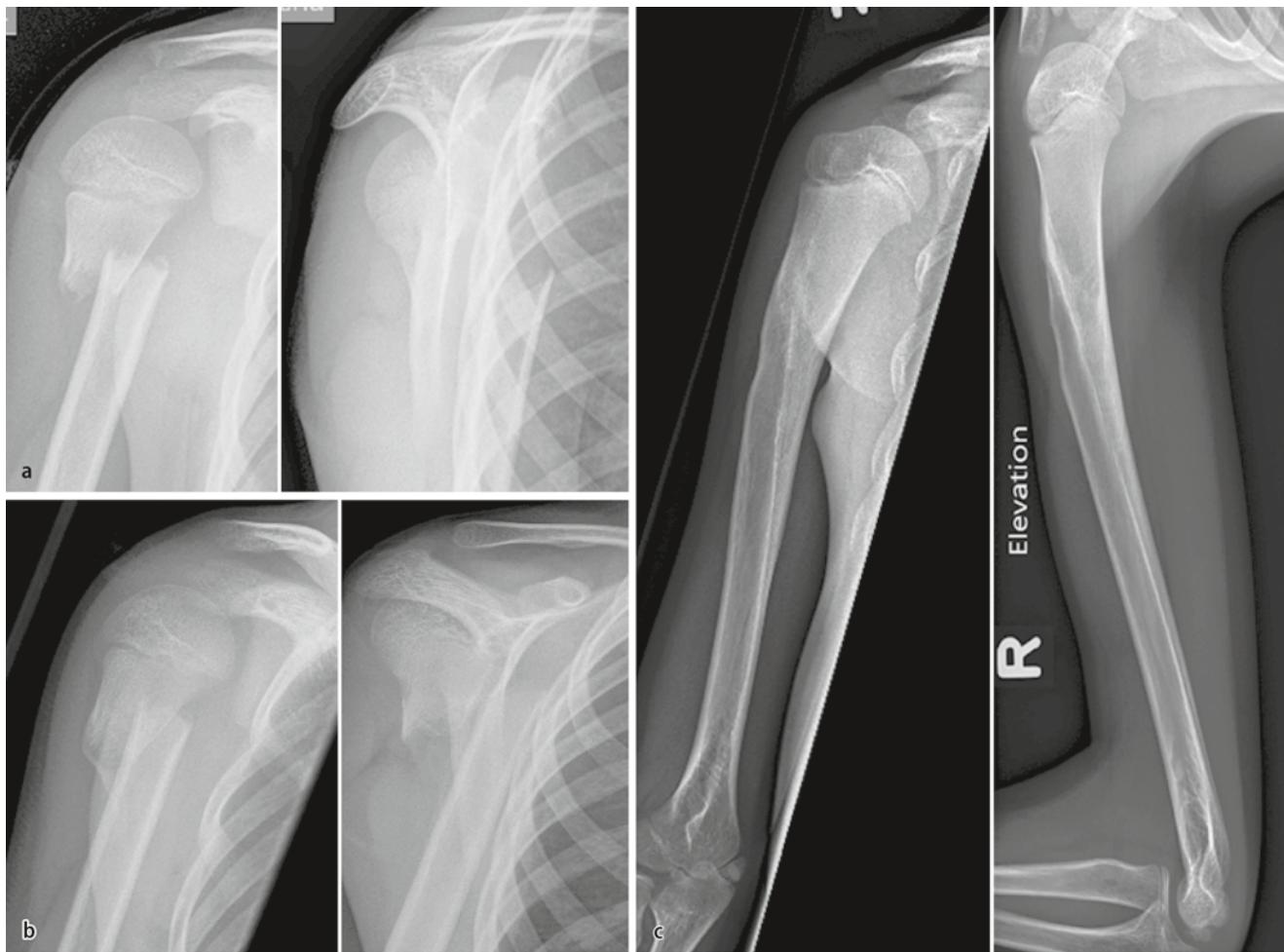


Abb. 2 ▲ **a** Proximale diamentaphysäre Humerusquerfraktur mit 100 % Seitverschiebung (bezogen auf die Schaftbreite) und 2 cm Verkürzung, sowie 25° Valgusstellung. **b** Behandlung mit Analgesie und Gilchrist-Verbandanlage für 3 Wochen, ohne initiale Reposition. **c** Im Röntgenbild nach 1 Jahr zeigt sich die vollständige Konsolidation und Remodellierung der Frakturfehlstellung. Der Schulterbewegungsumfang ist zu diesem Zeitpunkt seitengleich frei

chende Spontankorrektur eintritt. Ist jedoch kein wesentliches Wachstum mehr von der proximalen Humeruswachstumsfuge zu erwarten, so kann auch hier eine offene Reposition mit Kallusmobilisation und anschließender Stabilisation auch bei einer Vorstellung 1 bis 3 Wochen nach dem Trauma erwogen werden, da eine Wachstumsstörung dann nicht mehr zu erwarten ist.

Operative Versorgung

Lagerung für die Operation

Die Operation erfolgt in Rückenlage des Patienten¹, wobei der Arm für die elastisch

stabile Markschiene („elastic stable intramedullary nailing“; ESIN) auf einem Armtisch gelagert wird. Für die perkutane Kirschner-Draht-Fixation wird der Arm hingegen frei beweglich abgedeckt ohne Verwendung eines Armtisches.

Um den Brustkorb des Patienten wird eine Halteschlaufe aus breiten Tüchern gelegt, um bei Längszug am abduzierten, verletzten Arm den mit der Schulter über den Tischrand gelagerten Patienten nicht vom Operationstisch zu ziehen (► Abb. 3a).

Der Bildverstärker wird am Kopfende des Patienten, längs zum Operationstischrand frei schwenkbar platziert (► Abb. 3b). Der gesamte verletzte Arm wird einschließlich der Schulter steril abgewaschen und gut beweglich abgedeckt. Die freie Schwenkbarkeit des Bildverstär-

kers um mindestens 90° wird vor dem sterilen Beziehen geprüft. Aus strahlenhygienischen Gründen wird ein Laserzielstrahl zur Positionierung des Bildverstärkers verwendet, dieser wird auf den Frakturbereich in zwei Ebenen ausgerichtet (► Abb. 3b).

Gedeckte Reposition

Die operative Versorgung erfolgt in Allgemeinnarkose, wobei eine zusätzliche Muskelrelaxation den Repositionsvorgang erleichtert [12].

Nach vorsichtigem Längszug am Oberarm und Gegenzug durch den Anästhesisten mittels Thorax-Haltetuch (► Abb. 3a) wird der Ellbogen des Patienten 90° flektiert und im Schultergelenk eine leichte Außenrotation durchgeführt, während der Operateur mit seiner zweiten Hand

¹ Für die leichtere Lesbarkeit wird an Stelle von weiblichen und männlichen Schreibformen die männliche Form verwendet.



Abb. 3 ▲ **a** Lagerung des Patienten mit der verletzten Schulter über dem Operationstischrand. Ein Haltetuch liegt um den Brustkorb geschlungen. **b** Der Bildverstärker wird seitlich vom Operationstisch frei schwenkbar positioniert



Abb. 4 ▲ Der im Ellbogen 90° flektierte Arm wird etwas Außenrotiert gehalten, dann wird die Fraktur reponiert

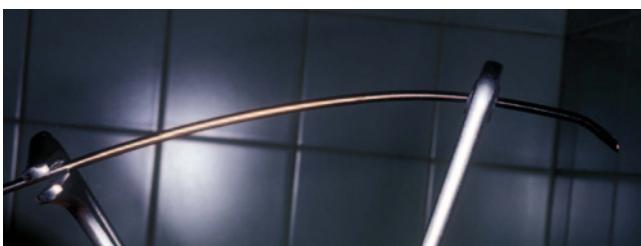


Abb. 5 ▲ Vorbiegen einer Markschiene für die elastisch stabile Markschiene (ESIN)

die Fraktur durch direkten ventrodorsalen Druck auf das distale Fragment weiter reponiert (► Abb. 4). Das erzielte Repositionsergebnis wird mit dem Bildverstärker in zwei Ebenen kontrolliert. Die Rotationsstellung des proximalen Fragments kann am Röntgenbild anhand der Wachstumsfugenform abgeschätzt werden: Diese erscheint im a.-p.-Bild zeltartig abgewinkelt [22] und zeigt in der Y-Aufnahme die Form eines leichten Bogens [31].

Bestehende Rotationsfehler können bei proximalen metaphysären Humerusfrakturen mitunter auch an der unterschiedlichen Stärke der Kortikalis proximal und distal der Fraktur erkannt werden. Der Humeruskopf zeigt mit seiner Hauptgelenksfläche nach mediobrachial.

Mit etwas Geduld lässt sich in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle eine akzeptable Reposition erzielen, sodass offene Repositionsraten von 50 % und mehr [1] auch im Hinblick auf die deutlich sichtbaren Narbenbildungen des deltoideoperitoralen Zugangs vermieden werden können [11].

Stabilisation mittels elastisch stabiler Markschiene („elastic stable intramedullary nailing“; ESIN) [6, 14, 20]

Der Durchmesser der Markschiene sollte einem Drittel des Humerusmarkraum-durchmessers an der engsten Stelle des Schaftes am Röntgenbild (in Originalgröße) entsprechen. Die Markschiene-Spitze wird 2 cm hinter der Spitze um 15–20° abgewinkelt und in der gleichen Ebene daran anschließend eine zusätzliche

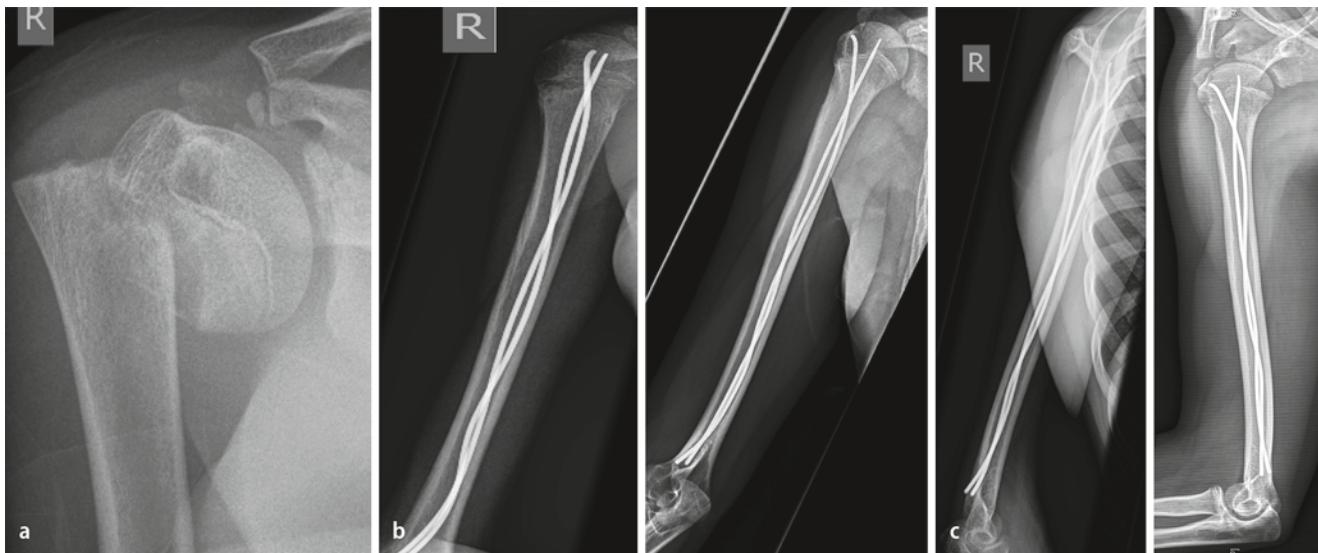


Abb. 6 ▲ Stabilisation einer dislozierten Salter-Harris-Typ-II-Epiphyesenlösung mittels elastisch stabiler Markschiene (ESIN) bei einem 13-jährigen Knaben. **a** Das Unfallröntgenbild zeigt eine ausgeprägte Varusfehlstellung und einen geringen Fragmentkontakt. **b** Stabilisation mit zwei von radial eingebrachten Markschienen. Mehrfache Überkreuzung der Markschienen („Korkenzieheranordnung“). Diese mehrfache Überkreuzung schwächt die Stabilität der ESIN und sollte vermieden werden. **c** Ausheilungsbild 2 Monate nach Osteosynthese und anschließender funktioneller Nachbehandlung

mäßige Krümmung der Schiene gebogen (► Abb. 5). Anstelle einer Titanmarkschiene kann auch ein 30 cm langer Kirschner-Draht gleichen Durchmessers mit der Spitze voran als ESIN-Implantat verwendet werden.

Für die Stabilisation mittels ESIN ist ein gutes Vorrepositionsergebnis in Form eines Repositionsvortests notwendig, weil sonst die Markschienen nicht sicher gedeckt in das proximale Fragment eingebracht werden können. Die retrograde ESIN des Humerus wird vorzugsweise am Armtisch vorgenommen [32]. Dazu wird ein 3 cm langer radialseitiger Hautschnitt über dem radialen Pfeiler am distalen Humerus vorgenommen. Nach Anfertigen eines Bohrloches (ca. 0,5–1 mm größer als der geplante Markschenendurchmesser) mit dem Pfriem oder einem Bohrer wird die 1. Markschiene in den Markraum eingebracht und nach proximal bis an die Fraktur vorgeschnitten. Die 2. Markschiene wird vorzugsweise ebenfalls unmittelbar über der Eintrittsstelle der 1. Schiene von radial eingebracht, um den N. ulnaris zu schonen und eine 2. Hautinzision zu vermeiden.

Für die 2. Markschiene wird unmittelbar neben der ersten Schieneneinbringungsstelle ein weiteres Bohrloch durch die Kortikalis mit dem Pfriem oder Bohrer angefertigt und die gleich wie die ers-

te Schiene gebogene 2. Schiene bis an die Fraktur vorgeschnitten. Eine vollständige Schienendrehung um 360° muss vermieden werden, da es zur Verwicklung beider Schienen und teilweisem Stabilitätsverlust der Osteosynthese kommen kann (► Abb. 6). Dieses Problem ist an der mehr als 2-fachen Überkreuzung der Markschienen unter dem Bildverstärker zu erkennen (► Abb. 6) und sollte durch das Zurückziehen einer Markschiene bis an die erste Überkreuzungsstelle und neuerliches Vorschieben der Schiene bis über die Fraktur ohne starke Rotationsbewegungen behoben werden.

Zuletzt werden beide Markschienspitzen etwas in das proximale Fragment eingehämmert, wobei bei Epiphysenlösungen die Wachstumsfuge von den Schienenspitzen gekreuzt werden muss, bei metaphysären Frakturen können die Markschienen mitunter nicht fugenkreuzend eingebracht werden, wobei durch die Markscheneneinbringung über die Wachstumsfuge keine Wachstumsstörungen zu erwarten sind, wenn diese nicht mehrfach wiederholt wird. Bei Operationsende wird unter Bildverstärkersicht eine Kontrolle von Innen- und Außenrotation vorgenommen, um die Lage der Schienenspitzen zum Schultergelenksspalt und die Stabilität der Osteosynthese zu überprüfen. Proximal ins Schul-

tergelenk ragende Schienenden müssen radiologisch sicher ausgeschlossen, bzw. durch Zurückziehen korrigiert werden. Die Markschienen werden am distalen Ende 2 cm über der Kortikaliseintrittsstelle mit dem Seitenschneider gekürzt, der Knochenkontur etwas angebo gen und dann werden die Schienenden unter die Haut versenkt. Das Tragen eines Gilchrist-Verbands oder einer Armschlinge wird für maximal eine Woche empfohlen, dann wird der Verband abgenommen und mit Pendelübungen begonnen. Bei Kindern bis zum Ende der Pubertät wird keine formale Physiotherapie eingeleitet. Jugendliche ab dem Pubertätsalter profitieren hingegen eher von einer Physiotherapieeinleitung. Die Metallentfernung erfolgt meist nach 3 Monaten in Allgemeinnarkose, nach radiologischer Bestätigung einer ausreichenden Konsolidation der Fraktur.

Stabilisation mit Kirschner-Drähten

Eine frei bewegliche Armabdeckung ohne Verwendung eines Armtisches erleichtert die Reposition, die Bildverstärkerschwenkbewegungen und die Drahteinbringung [17]. Die Fixation der proximalen Humerusfraktur erfolgt mit 2 (oder selten 3) perkutan eingebrachten Kirschner-Drähten. Die Drahtstärke bei Kin-

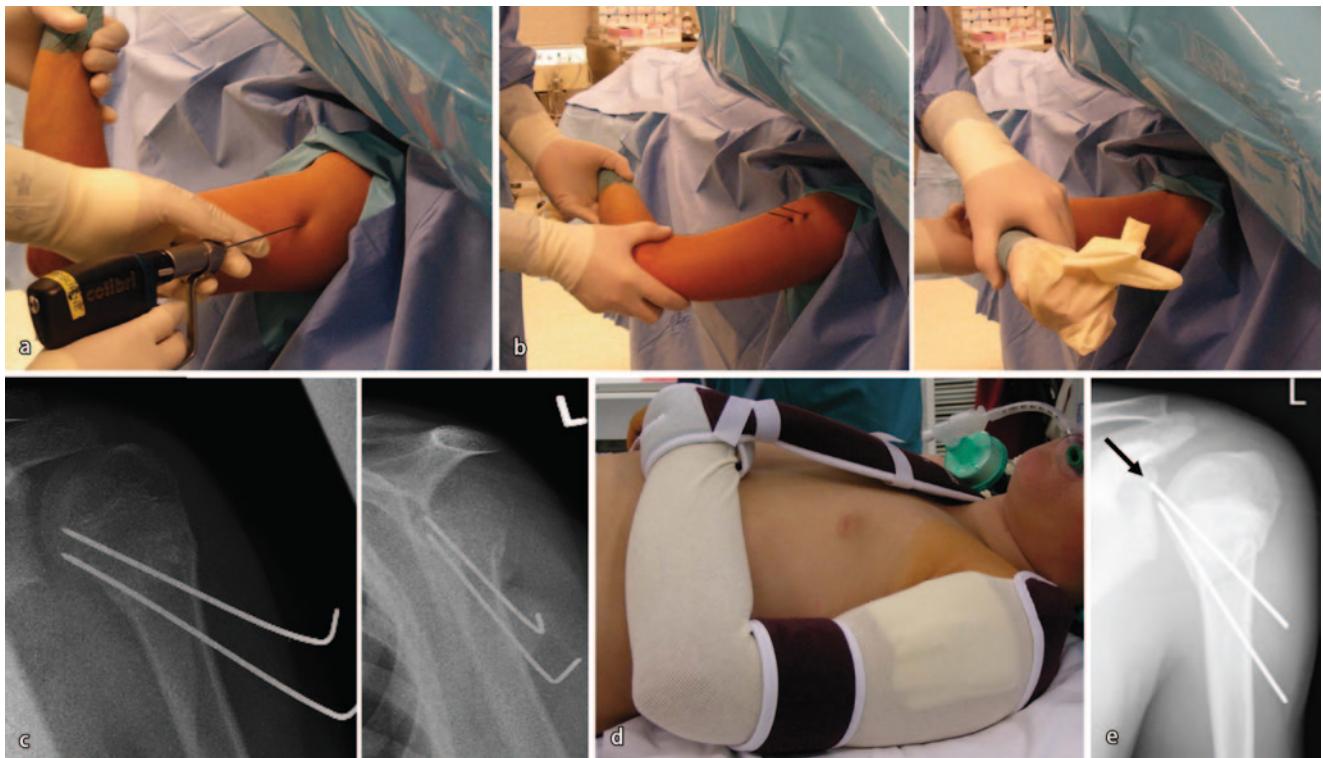


Abb. 7 ▲ **a** Perkutane Drahteinbringung bei Kirschner-Draht-Fixation. **b** Prüfung der freien Schultergelenkbeweglichkeit, Osteosynthesestabilität und der korrekten Drahtlage mittels Bildverstärker. **c** Die Kirschner-Drahtenden ragen über die Hautoberfläche vor und werden ca. 1 cm über der Haut umgebogen. **d** Anlage des Gilchrist-Verbands über die mit Mullkompressen bedeckten Kirschner-Drahtenden. **e** Inkorrekte Lage der Kirschner-Drahtspitzen im Schultergelenkbereich; Neupositionierung der Drähte erforderlich

dern unter 12 Jahren sollte 2 mm betragen und bei Kindern über 12 Jahren 2,5 mm.

Die perkutane Kirschner-Draht-Fixation lässt sich auch bei nicht perfekt reponierten Frakturen meist technisch einfacher durchführen als eine ESIN. Die Drahteinbringung erfolgt unter Bildverstärkerkontrolle über dem Deltoidesansatzbereich von vorne/radial, wobei der Bereich des Verlaufs der Sehne des langen Bizepskopfs vorne medial geschont werden sollte (Abb. 7).

Die Schulter wird mittels Gilchrist-Verband, der über dem Wundbereich mit darunterliegenden Drahtenden gepolstert wird, für 3 Wochen immobilisiert. Die weitere Mobilisation erfolgt spontan ohne formale Physiotherapie. Klinische Kontrollen erfolgen alle 3–6 Wochen bis zur Erzielung eines annähernd seitengleichen Bewegungsumfangs. Dann ist auch Sport wieder uneingeschränkt möglich. Lediglich bei postpubertären Jugendlichen mit deutlicher Bewegungseinschränkung der Schulter 3 Wochen nach dem Unfall wird eine Physiotherapie eingeleitet, bis eine

annähernd freie Schultergelenkbeweglichkeit erzielt wird.

Therapie der Abrisse von *Tuberculum majus und minus*

Nach erfolgreicher Reposition einer Schulterluxation mit begleitendem Abriss des *Tuberculum majus* reponiert sich dieses meistens vollständig zusammen mit der Schulterreposition so, dass eine konservative Behandlung durchgeführt werden kann. In diesen Fällen sollte jedoch einige Tage nach dem Unfall und der erfolgreichen Reposition eine radiologische Stellungskontrolle durchgeführt werden. Das abgerissene *Tuberculum minus* muss hingegen meistens offen reponiert und mit resorbierbarem Nahtmaterial fixiert werden, um ein gutes funktionelles Resultat zu erzielen, da dieses unter Zug des *M. subscapularis* steht [19].

Offene Reposition und Plattenosteosynthese von proximalen Humerusfrakturen

Bei Adoleszenten mit bereits geschlossenen Wachstumsfugen (oder kurz davor) kann alternativ auch eine Fixation mithilfe einer Plattenosteosynthese erfolgen (Abb. 8a, b). Wir führen diesen Eingriff in unseren Kliniken aber nur in Ausnahmefällen durch, wenn eine hohe primäre Stabilität erforderlich ist oder eine schlechte Compliance vonseiten des Patienten besteht.

Pathologische proximale Humerusfrakturen

Die Spontan-Ausheilungsprognose ist bei im jungen Kindesalter auftretenden juvenilen Knochenzysten am proximalen Humerus zurückhaltender zu stellen als bei spät manifest werdenden juvenilen Knochenzysten [29].

Juvenile Knochenzysten werden nach gesicherter Diagnose heute mit vielen verschiedenen Therapieverfahren behandelt. In letzter Zeit wird vermehrt die ESIN an-

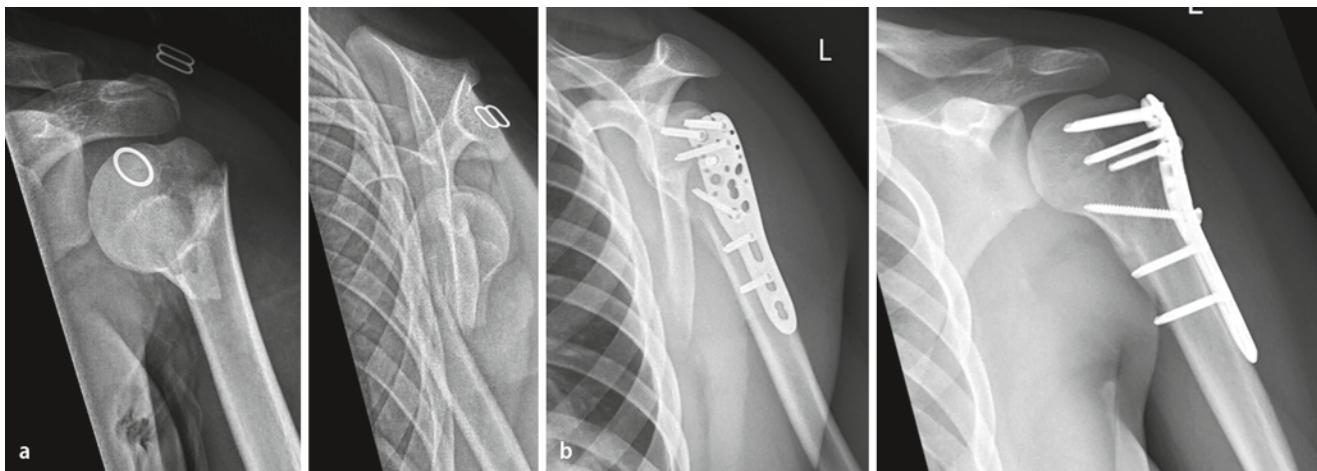


Abb. 8 ▲ **a** Mehrfragmentäre proximale Humerusfraktur (16-jähriges Mädchen, Sturz vom Pferd). **b** Drei Monate nach offener Reposition über einen deltoideopektoralen Zugang und Osteosynthese mithilfe eines winkelstabilen Implantats (PHILOS® Platte, Synthes®, Oberdorf, Schweiz). Die Fraktur ist konsolidiert. Es zeigt sich ein guter klinischer Verlauf. Die Metallentfernung erfolgte ein Jahr nach dem Unfall



Abb. 9 ▲ **a** Proximale Humerusknochenzyste eines 2-jährigen Mädchens. Die Knochenzyste reicht direkt an die Wachstumsfuge (Bilder wurden freundlicherweise von Prof. Dr. Wolfgang Linhart, Leiter der Abteilung für Kinderorthopädie, Medizinische Universität Graz, Österreich, zur Verfügung gestellt). **b** Deutliche Durchbauungszeichen im Bereich der Knochenzyste ein Jahr nach ESIN. **c** Schönes Ausheilungsergebnis nach 3 Jahren und Zeichen des ungestörten Längenwachstums im Bereich der proximalen Humeruswachstumsfuge

gewandt (► Abb. 9a–c), ggf. unter gleichzeitiger Biopsieentnahme [10, 21]. Die ESIN-Stabilisation kann auch bei zufällig entdeckten, nicht frakturierten juvenilen Knochenzysten als Frakturprophylaxe und Therapie angewandt werden, da sie zu einer internen Drainage von Zystenflüssigkeit innerhalb des Markraums beiträgt und so zu einer Ausheilung der Zyste in 65,9 % der Fälle oder einer Ver-

kleinerung der Zyste im weiteren Verlauf in 34,1 % der Fälle beiträgt [10]. In der Literaturübersicht von De Sanctis und Andreacchio [10] zu Behandlungsergebnissen von juvenilen Knochenzysten mittels ESIN wird über Ausheilungsraten von 67–69 % berichtet, Rezidivraten von bis zu 13 % und ein Nichtansprechen auf die Therapie in bis zu 6 % der Fälle.

Weitere pathologische Frakturen am proximalen Humerus treten besonders bei Kindern mit Myopathien und Zerebralparesen im Rahmen einer Osteopenie oder Osteoporose auf. Ist dabei eine Frakturstabilisation erforderlich, so empfiehlt sich die Stabilisation mit ESIN-Titan-Markschienen. Diese können bei Bedarf auch langfristig im Markraum zur Stabilitätsverbesserung belassen werden.

Diskussion

Die Behandlung dislozierter proximaler Humerusepiphysenlösungen oder proximal metaphysärer Humerusfrakturen im Wachstumsalter ist weiterhin eine Domäne der konservativen Therapie [2–4, 11, 18], da sie eine sehr hohe Rate günstiger funktioneller Ausheilungsergebnisse [3] erzielt. Zu den tolerierbaren Grenzen der konservativen Therapie bei proximalen Humerusfrakturen im Wachstumsalter wurden auch Guidelines der DGU veröffentlicht [27]. Eine Physiotherapie verordnen wir allgemein nur bei verzögerter oder unvollständiger Wiedergewinnung des vollen Bewegungsumfangs in der betroffenen Schulter 4 Wochen nach spontaner Mobilisation. Dobbs [12] hingegen verzichtet auch bei 15- bis 16-jährigen Jugendlichen auf eine formale Physiotherapie.

Von Jugendlichen, besonders ab einem Alter von 15–16 Jahren wird die nichtoperative Behandlung mitunter weniger gut toleriert und die Behandlungsergebnisse sind funktionell weniger günstig, wie die Studie von Dameron et al. [8] belegt. Deshalb kommen bei Jugendlichen, die knapp vor dem Wachstumsfugenschluss am proximalen Humerus stehen, häufig operative Frakturstabilisationsverfahren zur Anwendung.

Die Stabilisation mittels ESIN erlaubt aufgrund ihrer Übungsstabilität die frühzeitige Mobilisation [6, 20], während bei Stabilisation mit Kirschner-Drähten eine zusätzliche Ruhigstellung über 3 Wochen erforderlich ist. Vor der Einbringung der Markschienen für die ESIN ist zu prüfen, ob ein ausreichend gutes Vorrepositionsergebnis zu erreichen ist, um die Markschienen gedeckt aszendierend in das proximale Humerusfragment einbringen zu können.

Bei inkompletter Reposition können vorne eingeschlagene Periostanteile vorliegen, sehr selten verhindert die interponierte lange Bizepssehne die Reposition [1, 12, 22]. Bei radiologischem Hinweis auf ein grösseres Interponat, aber noch akzeptabler unvollständiger Reposition, ist intraoperativ ein Bizepssehneninterponat sonographisch auszuschliessen. Danach ist die Versorgung mithilfe von Kirschner-Drähten vorzuziehen. Bei inkompletter Reposition liegt das proximale Fragment meist dorsal und etwas häufiger

medial als lateral, bedingt durch die Einwirkung der dort ansetzenden Muskeln [11]. Dies sollte beim Versuch, die Fraktur in dieser Restfehlstellung mit Kirschner-Drähten zu fixieren, bedacht werden. Die Drähte sollten somit auf Höhe des Ansatzes des M. deltoideus von einer etwas ventraleren Position eingebbracht werden, um den nach dorsomedial abgekippten Humeruskopf mit den Kirschner-Drähtespitzen fixieren zu können. Dabei sollte aber keineswegs die lange Bizepssehne verletzt werden. Diese lässt sich auch bei einem geschwollenen Arm in der Regel palpieren.

Nach Reposition verbliebene Restfehlstellungen – entsprechend Neer- und Horwitz-I- und -II-Fehlstellungen (► Tab. 1) – korrigieren sich bei noch erhaltenem Wachstumspotenzial der proximalen Humerusepiphysen in der Mehrzahl problemlos. Ein Vorteil der perkutanen Kirschner-Draht-Fixation liegt in der meist kürzeren Durchleuchtungszeit und in der Möglichkeit, die über die Haut vorragenden Kirschner-Drähte in Analgesedation bei übungsstabiler Teilkonsolidation (Kallusbildung zumindest an 2 von 4 Seiten der Fraktur; nachweisbar in der a.-p.- und Y-Aufnahme) nach 3–4 Wochen in der Poliklinik zu entfernen. Die Drahtenden sollten bis zur Metallentfernung unter dem Gilchrist-Verband mit Tupfern und Kompressen gut gepolstert werden.

Geringe Ad-latus- oder Ad-axim-Dislokationen können aber auch in der ESIN-Technik durch Drehen der spitzennah gebogenen Markschienen noch verbessert werden [32].

Gelingt es, nur eine Markschiene korrekt in das proximale Fragment einzubringen, so ist die Fraktur zwar nicht übungsstabil versorgt und nur teilrotationsstabil, aber in Kombination mit einem Gilchrist-Verband für 3 Wochen lässt sich auch damit ein sehr gutes Ausheilungsergebnis erzielen [6, 14]. Die Gesamtdurchleuchtungszeit sollte unter 3 min liegen. Gestaltet sich die Reposition und/oder Draht-einbringung darüber hinaus schwierig, so sollte vor Ablauf dieser Zeitspanne ein erfahrener Kollege beigezogen werden. Gelingt es weiterhin nicht, die Fraktur zu stabilisieren, so empfiehlt es sich, vor Erreichen von 5 min Durchleuchtungszeit die offene Reposition über einen 3–5 cm lan-

gen deltoideopektoralen Zugang vorzunehmen, und eine Kirschner-Draht-Fixation anzuschließen.

Unvollständige Nervenläsionen sollten etwa 3 Wochen nach Trauma mit elektrophysiologischen Untersuchungen abgeklärt werden, weil sich damit die Nervenläsion exakt zuordnen und in ihre Schwere beurteilen lässt [30]. Unvollständige Nervenläsionen haben eine gute Spontanheilungsprognose, erfordern jedoch eine längerfristige Physiotherapie [30]. Wir legen nur im Falle einer primären, kompletten oder zunehmenden Nervenläsion den betroffenen Nerv frei.

Fazit für die Praxis

Indikationen zur Reposition und ggf. Stabilisation stellen kosmetisch störende Valgusfehlstellungen bei Kindern und dislozierte proximale Epiphysenlösungen und proximale Humerusfrakturen von vor dem Wachstumsabschluss stehenden Jugendlichen dar, da hier das Remodellingpotenzial fehlt.

Während die geschlossene Reposition und perkutane Kirschner-Draht-Fixation von dislozierten proximalen Humerusfrakturen und Epiphysenlösungen sich durch einfachere Erlernbarkeit, die Möglichkeit, die Drahtenden über die Hautoberfläche vorstehen zu lassen und dann ambulant zu entfernen, sowie die meist geringere Durchleuchtungszeit auszeichnet, fehlt dieser Methode die Übungsstabilität im Vergleich zur elastisch stabilen intramedullären Schienung (ESIN).

Die ESIN zeichnet sich hingegen durch Übungsstabilität aus, jedoch um den Preis eines zweiten Eingriffs in Narkose für die Metallentfernung. Die Interposition von Weichteilen wie Periost oder selten der Sehne des langen Bizepskopfs vorne im Frakturspalt bedingt einen erheblichen Anteil (bis 50 %) offener Re-positionen bei operativer Frakturstabilisation von proximalen Humerusfrakturen oder Epiphysenlösungen. Die resultierende Narbe aufgrund des deltoideopektoralen Zugangs liegt dabei kosmetisch ungünstig.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. J. Mayr

Abteilung für Kinderchirurgie
Universitätskinderspital beider Basel
Spitalsstrasse 33, 4031 Basel, Schweiz
johannes.mayr@ukbb.ch

Interessenskonflikt. Der korrespondierende Autor gibt für sich und seine Koautoren an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

1. Bahrs C, Zippiles S, Ochs BG, Rether J, Oehm J, Eingartner C, Rolauffs B, Weise K (2009) Proximal humeral fractures in children and adolescents. *J Pediatr Orthop* 29:238–242
2. Baxter MP, Wiley JJ (1986) Fractures of the proximal humeral epiphysis: their influences on humeral growth. *J Bone Joint Surg Br* 68-B:570–573
3. Beringer D, Weiner D, Noble J, Bell R (1998) Severely displaced proximal humeral fractures: a follow-up study. *J Pediatr Orthop* 18:31–37
4. Blount WP (1954) Fractures in children. Williams & Wilkins, Baltimore
5. Bortel BT, Pritchett JW (1993) Straight-line graphs for the prediction of growth of the upper extremities. *J Bone Joint Surg Br* 75-A:885–892
6. Chee Y, Agorastides I, Garg N, Bass A, Bruce C (2006) Treatment of severely displaced proximal humeral fractures in children with elastic stable intramedullary nailing. *J Pediatr Orthop B* 15:45–50
7. Curtis RJ (1990) Operative management of children's fractures of the shoulder region. *Orthop Clin North Am* 21:315–324
8. Dameron TB Jr, Reibel DB (1969) Fractures involving the proximal humeral epiphyseal plate. *J Bone Joint Surg Br* 51-A:289–297
9. David S, Kuhn C, Ekkernkamp A (2006) Proximale Humerusfraktur des Kindes und Adoleszenten. *Chirurg* 77:827–834
10. De Sanctis N, Andreacchio A (2006) Elastic stable intramedullary nailing is the best treatment of unicameral bone cysts of the long bones in children? Prospective long-term follow-up study. *J Pediatr Orthop* 26:520–525
11. Di Gennaro GL, Spina M, Lampasi M, Libri R, Donzelli O (2008) Fractures of the proximal humerus in children. *Chir Organi Mov* 92:89–95
12. Dobbs MB, Luhmann SL, Gordon JE, Strecker WB, Schoenecker PL (2003) Severely displaced proximal humeral epiphyseal fractures. *J Pediatr Orthop* 23:208–215
13. Eren N, Ozgen G, Gurel A, Ener BK, Furtun K (1990) Vascular injuries and amputation following limb fractures. *Thorac Cardiovasc Surg* 38:48–50
14. Fernandez FF, Eberhardt O, Langendörfer M, Wirth T (2007) Retrograde elastische stabile intramedulläre Nagelung von grob dislozierten proximalen Humerusfrakturen im Kindesalter. *Obere Extremität* 2:2–8
15. Frey C, Klöti J (1989) Spätresultate der subkapillären Humerusfraktur im Kindesalter. *Z Kinderchirurgie* 44:280–282
16. Hasan SA, Cordell CL, Rauls RB, Eidt JF (2009) Brachial artery injury with a proximal humerus fracture in a 10-year-old girl. *Am J Orthop* 38:462–466
17. Jaberg H, Warner JJP, Jakob RP (1992) Percutaneous stabilization of unstable fractures of the humerus. *J Bone Joint Surg Br* 74-A:508–515
18. Larsen CF, Kiaer T, Lindequist S (1990) Fractures of the proximal humerus in children: nine-year follow-up of 64 unoperated cases. *Acta Orthop Scand* 61:255–257
19. Levine B, Pereira D, Rosen J (2005) Avulsion fractures of the lesser tuberosity of the humerus in adolescents: review of the literature and case report. *J Orthop Trauma* 19:349–352
20. Ligier JN, Metaizeau JP, Prévot J, Lascombes P (1985) Elastic stable intramedullary pinning of long bone shaft fracture in children. *Z Kinderchir* 40:209–212
21. Linhart WE, Helou D (1995) Die Behandlung von Knochencysten durch „elastisch stabile Fixation“ *Zentralbl Kinderchir* 4:134–139
22. Lucas JC, Mehlmann CT, Laor T (2004) The location of the biceps tendon in completely displaced proximal humerus fractures in children: a report of four cases with magnetic resonance imaging and cadaveric correlation. *J Pediatr Orthop* 24:249–253
23. Neer CS II, Horwitz BS (1965) Fractures of the proximal humeral epiphyseal plate. *Clin Orthop* 41:24–31
24. Pandya NK, Baldwin KD, Wolfgruber H, Drummond DS, Hosalkar HS (2010) Humerus fractures in the pediatric population: an algorithm to identify abuse. *J Pediatr Orthop* 19:535–541
25. Peterson CA, Peterson HA (1972) Analysis of incidence of injuries to the epiphyseal growth plate. *J Trauma* 12:275–281
26. Piatek S, Bürger T, Halloul Z, Westphal T, Holmen-schlager F, Winckler S (2001) Arterielle Gefäßverletzungen bei Frakturen und Luxationen. *Zentralblatt Chir* 126:379–384
27. Schmittenthaler PP, Blum J, David S, Knorr P, Marzi I, Schlickwei W, Schönecker G (2004) Treatment of humeral shaft fractures and subcapital fractures in children. Consensus report of the Child Trauma Section of the DGU. *Unfallchirurg* 107:8–14
28. Shaw BA, Murphy KM, Shaw A, Oppenheim WL, Myracle MR (1997) Humerus shaft fractures in young children: accident or abuse? *J Pediatr Orthop* 17:293–297
29. Teoh KH, Watts AC, Chee YH, Reid R, Porter DE (2010) Predictive factors for recurrence of simple bone cysts of the proximal humerus. *J Orthop Surg* 18:215–219
30. Visser CP, Coene LN, Brand R, Tavy DL (2001) Nerve lesions in proximal humeral fractures. *J Shoulder Elbow Surg* 10:421–7
31. Von Laer L (1996) Oberarm subcapital. In: V Laer (Hrsg) L: Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter, 3. Aufl. Thieme, Stuttgart, S 93–105
32. Xie F, Wang S, Jiao Q, Shen Y, Ni XY, Ying H (2011) Minimally invasive treatment for severely displaced humeral fractures in children using titanium elastic nails. *J Pediatr Orthop* 31:839–846