

Fallbericht

Obere Extremität 2013 · 8:170–175
 DOI 10.1007/s11678-012-0189-6
 Eingegangen: 29. Februar 2012
 Angenommen: 15. Mai 2012
 Online publiziert: 27. November 2012
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Georg Osterhoff · Guido A. Wanner · Hans-Peter Simmen · Clément M. L. Werner
 Klinik für Unfallchirurgie, Universitätsspital Zürich, Zürich, Schweiz

Mediale Abstützung mit kortikalem intramedullärem Interponat bei winkelstabiler Plattenosteosynthese der proximalen Humerusfraktur

Fallbericht und Literaturübersicht

Einleitung

Die absolute Zahl proximaler Humerusfrakturen wird infolge demografischer Veränderungen – speziell in der weiblichen Population – in den nächsten Jahren weiter ansteigen [1, 13]. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren die prognostizierte Alters- und Geschlechterumverteilung zu einer Zunahme komplexer und dislozierter Frakturen führen wird [2]. Die Versorgung der osteoporotischen, dislozierten proximalen Humerusfraktur stellt aber – auch nach Entwicklung neuer Implantate – weiterhin eine technische und chirurgische Herausforderung dar. Speziell bei Patienten mit osteoporotischem Knochen kann die suffiziente Verankerung von Schrauben im Humeruskopf misslingen. Zur Lösung dieses Problems wurden winkelstabile Fixationssysteme entwickelt, die durch die Vereinigung axialer und angulärer Steifigkeit im Kadavermodell eine bessere Verankerung gerade im osteopenen Knochen versprechen [35] und sich in der klinischen Behandlung komplexer, osteoporotischer Frakturen bewährt haben.

Dennoch zeigen klinische Studien, trotz in der Regel guter funktioneller Ergebnisse, immer noch hohe Komplikationsraten [3, 14, 27, 28, 30, 31, 33].

Mediale Abstützung

In letzter Zeit wird in der Literatur zunehmend die Wiederherstellung der media-

len Abstützung als essenzielle Voraussetzung für das klinische Ergebnis beschrieben. Ein unzureichender medialer Support infolge mangelnden ossären Aligments oder Fehlen eines medial abstützenden Implantats ist häufigste Ursache der sekundären Dislokation mit Abkipfung in den Varus [3, 9]. Bereits eine Varisierung des Kopffragments um 20° führt dabei zu einer signifikanten Erhöhung der durch die Rotatorenmanschette zu leistenden Elevationskräfte [34] und das funktionelle Ergebnis ist deutlich beeinträchtigt [3]. Begünstigt durch die hohe Steifigkeit winkelstabiler Plattensysteme [19] kann es gerade bei diesen in Folge der Varusdislokation zu einem Penetrieren oder gar Ausreißen der proximalen Verankerungsschrauben („cut-out“) mit ausgeprägtem Integritätsschaden des glenohumeralen Gelenks kommen. Die daraus resultierenden Einbußen der Schulterfunktion und Bewegungsschmerzen machen häufig einen Revisionseingriff notwendig. Vor allem Knorpelschäden und ossäre Erosionen am Glenoid können dabei unter Umständen eine spätere endoprothetische Versorgung erschweren. In einer Studie von Gardner et al. [9] war das Fehlen einer medialen Abstützung von einer 5-fach erhöhten Cut-out-Rate begleitet.

Intramedulläre kortikale Interponate

Gelingt aufgrund einer medialen Trümmerzone im Kalkarbereich die Reposition der medialen Kortizes nicht, kann die winkelstabile Osteosynthese mit zusätzlichem Einbringen intramedullärer ossärer Interponate erwogen werden. In einer ersten Fallserie wurden hierfür allogene Fibulatransplantate verwendet, nach einem Zeitraum von sechs Monaten zeigte sich bei diesen kein Repositionsverlust [8].

In einer eigenen Studie konnten die biomechanischen Vorteile dieser Technik bei Frakturen mit medialer Trümmerzone gezeigt werden [24]. Dafür wurden an osteoporotischen Humerusmodellen standardisierte proximale Humerusfrakturen kreiert und diese entweder ausschließlich mit einer winkelstabilen Formplatte oder zusätzlich zur Platte mit einem intramedullär eingebrachten Fibulainterponat von 6 cm Länge stabilisiert. In einem Testaufbau, welcher die Biomechanik der Rotatorenmanschette simulierte, wurde zyklisch die aktive Abduktion durchgeführt und die Fragmentdistanz vor, nach sowie während der Belastung gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass das zusätzliche Einbringen eines Fibulainterponats zu einer 5-fach verminderten interzyklischen Motilität (Amplitude der Fragmentdistanz innerhalb eines Zyklus), einer um die Hälfte niedrigeren Fragmentmigration (Veränderung der Fragmentdistanz unter Belastung) und einer nur halb so großen

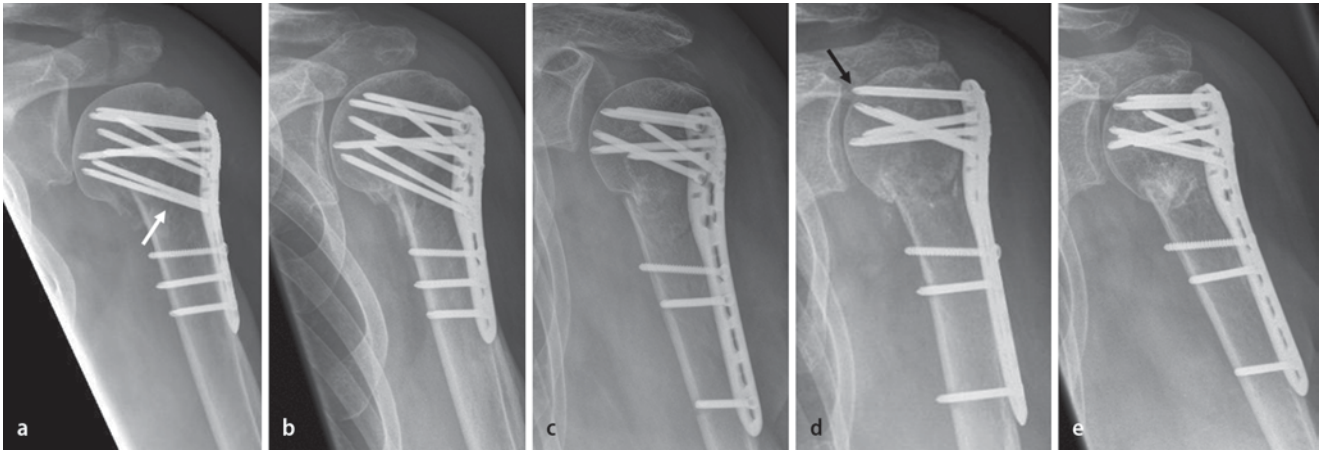


Abb. 1 ▲ Kalkarschrauben. Trotz ungenügender Reposition der medialen Kortizes kommt es im ersten Fall (**a, b**) unter additiver medialer Abstützung mit Kalkarschrauben (**a**, weißer Pfeil) 6 Wochen postoperativ zur Knochenheilung ohne Repositionsverlust (**b**). Im zweiten Fall (**c, d, e**) wird auf Kalkarschrauben verzichtet; 6 Wochen postoperativ zeigt sich ein Repositionsverlust mit Cut-Out der proximalsten Schraubenreihe (**d**, schwarzer Pfeil). Nach Schraubenwechsel proximal verheilt die Fraktur insgesamt 3 Monate nach Primärversorgung in leichter Varusdeformität (**e**)

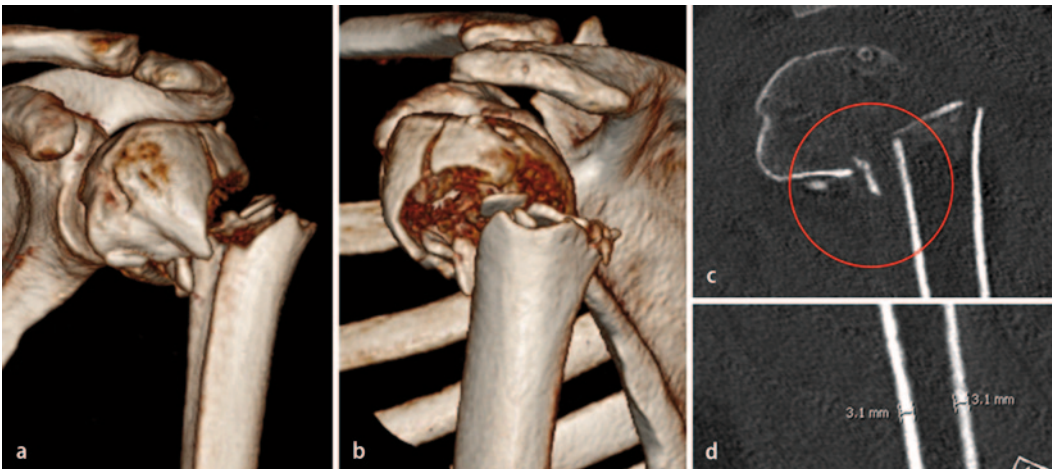


Abb. 2 ◀ Fallbeispiel: Posttraumatische CT-Bildgebung der linken Schulter. In der 3D-Rekonstruktion (**a, b**) zeigt sich die 3-Part-Fraktur mit deutlicher posterolateraler Dislokation des Schafts. In der koronaren Schichtung (**c**) ist die mediale Trümmerzone im Kalkarbereich zu erkennen. Die nach Tingart et al. [32] gemessene kortikale Dicke (**d**) deutet auf eine niedrige Knochenmineraldichte des proximalen Humerus hin

plastischen Deformation führt (Unterschied der Fragmentdistanz vor und nach Testung mit 400 Zyklen).

Die mediale Abstützung mit einem intramedullären Knocheninterponat kann bei der winkelstabilen Osteosynthese des proximalen Humerus also die Gesamtsteifigkeit des Knochen-Implantat-Konstrukts *erhöhen* und die Migration des Kopfsegments vermindern. Dies – sowie eine deutliche höhere Versagenslast mit Fibulaaugmentaion – konnte auch in anderen biomechanischen Studien an Kadaverknochen bestätigt werden [5, 20].

Zur Veranschaulichung der Technik der intramedullären Abstützung mit kortikalem Interponat wird im Folgenden der Fall einer Patientin geschildert, deren Fraktur mit diesem Verfahren stabilisiert wurde.

Fallbeispiel

Eine 44-jährige Patientin wurde uns mit proximaler Humerusfraktur nach Sturz auf die linke Schulter zugewiesen. In der CT-Bildgebung zeigte sich eine 3-Part-Fraktur mit ausgeprägter medialer Trümmerzone und deutlich vom Kopf weg nach posterolateral disloziertem Schaft (■ **Abb. 2a–c**) bei jedoch intakter Kopfkalotte. Trotz des relativ jungen Alters der Patientin war die radiologische Bildgebung indikativ für eine verminderte Kochendichte des proximalen Humerus [32] (■ **Abb. 2d**).

Es erfolgte die Versorgung mit winkelstabiler Formplatte (PHILOS, Synthes, Oberdorf, Schweiz) und intramedullärem, kortikalem Knocheninterponat.

Die Patientin wird dafür in Beach-chair-Position gelagert. Über einen deltopektoralen Zugang erfolgt unter Mobilisation des M. deltoideus die Darstellung des frakturierten proximalen Humerus. Das avulsionierte Tuberculum minus sowie die Supra- und Infraspinatussehnen werden mit nicht resorbierbaren Fäden (Fiberwire, Arthrex, Karlsfeld, Deutschland) angeschlossen. Über leichten Zug am Arm erfolgt die Reposition des Schafts in eine Linie mit dem Kopf. Mithilfe eines Raspatoriums wird der Kopf durch die Fraktur hindurch von anterolateral nach dorsomedial gekippt und ein *allogenes* kortikales Transplantat (ALO 103, CTBA, Krems, Österreich) von ca. 6 cm Länge intramedullär in den Schaft eingebracht (■ **Abb. 3b, c**). Beim Aufklappen der Fraktur wird darauf geachtet, die Trans-

lation von Kopf- und Schaftfragment am posteromedialen Übergang möglichst gering zu halten, um einer zusätzlich zu der durch die Fraktur bedingten Schädigung der A. circumflexa humeri posterior sowie des Periostschlauchs vorzubeugen. Nach Einbringen des kortikalen Interponats wird die Fraktur nun über Zug an der angeschlungenen Rotatorenmanschette und mittels Druck mit dem Raspatorium auf das Kopffragment lateral geschlossen. Dabei ist es wichtig, dass das obere Ende des Interponats direkt unter dem kortikalen Dach der Humeruskopfkalotte positioniert wird, damit eine ausreichende strukturelle Abstützung erreicht wird (■ Abb. 3d, e). Bei varisierter Stellung des Kopffragments kann durch Nachschieben des Interponats unter die Kalotte (z. B. mit einer Knochenfasszange) eine achsengerechte Reposition erreicht werden. Nach präliminärer Fixation des Interponats im Schaft mit einem Kirschner-Draht wird die Platte angelegt und das Interponat nun mittels Schraube definitiv distal fixiert. Dies kann mittels konventioneller (■ Abb. 4) oder winkelstabiler Schraube geschehen (■ Abb. 3f). Anschließend können die übrigen Schraubenlöcher winkelstabil besetzt werden. So kann eine zusätzliche Interponatfixation im Kopffragment erreicht werden (■ Abb. 3g). *Um eine gute Fixierung zu erreichen, kann das Interponat entweder zwischen Schaft- und Kopfschrauben „eingekleimt“ oder sogar von einer oder mehreren Schrauben durchbohrt werden, wesentlich ist der Kontakt zum Kalottendach.* Nun werden die Fadenschlingen an der Platte angeknüpft und nach ausgiebiger Spülung erfolgt der schichtweise Wundverschluss. Postoperativ wurde die Patientin für drei Wochen in einem Gilchrist-Verband ruhiggestellt. Nach Entfernen der Redon-drainagen am 2. postoperativen Tag wurde mit passiv-assistierter Physiotherapie begonnen, ab der 3. Woche mit aktiv-assistierten Übungen nach Maßgabe der Beschwerden. Nach klinisch-radiologischer Verlaufskontrolle 8 Wochen postoperativ (■ Abb. 4c, d) wurde bei beschwerdefreier Patientin Vollbelastung erlaubt.

Obere Extremität 2013 · 8:170–175 DOI 10.1007/s11678-012-0189-6
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

G. Osterhoff · G. A. Wanner · H.-P. Simmen · C. M. L. Werner

Mediale Abstützung mit kortikalem intramedullärem Interponat bei winkelstabiler Plattenosteosynthese der proximalen Humerusfraktur. Fallbericht und Literaturübersicht

Zusammenfassung

Die Versorgung der osteoporotischen, dislozierten proximalen Humerusfraktur stellt – auch nach Entwicklung neuer Implantate – weiterhin eine technische und chirurgische Herausforderung dar. Die winkelstabile Plattenosteosynthese hat sich dabei als ein Standardverfahren durchgesetzt. Dennoch sind die Komplikationsraten unbefriedigend, insbesondere hinsichtlich Varusdislokation und Penetration der proximalen Schrauben durch die Kopfkalotte. In der aktuellen Literatur wird die Wiederherstellung der medialen Abstützung als wichtigstes Ziel der operativen Versorgung genannt. Der vorliegende Artikel demonstriert anhand eines Fallbeispiels die Alternative einer intramedullären

Augmentation und erläutert das Konzept der medialen Abstützung bei der winkelstabilen Plattenosteosynthese proximaler Humerusfrakturen. Es werden diesbezüglich Möglichkeiten, Ergebnisse und Empfehlungen unterschiedlicher Verfahren vorgestellt. Diskutiert werden die Bedeutung einer korrekten Reposition der medialen Kortizes, die Verwendung von Kalkarschrauben, die Doppelplattenosteosynthese sowie das vorgestellte Verfahren der intramedullären Augmentation.

Schlüsselwörter

Proximale Humerusfraktur · Mediale Abstützung · Winkelstabile Plattenosteosynthese · Fibulainterponat

Medial support with cortical intramedullary graft and locking plate osteosynthesis of proximal humeral fractures. Case report and review of the literature

Abstract

The treatment of complex proximal humeral fractures remains challenging, especially in patients with osteoporosis. Locking plate fixation has become a standard in stabilizing these fractures; however, complication rates are still high. In particular, loss of reduction with varus misalignment and subsequent cut-out of the proximal screws is frequent. Recently the restoration of medial support has been named as the primary aim of operative treatment. This article describes an alternative technique using intramedullary augmentation on the basis of a case report and

explains the concept of medial support in locking plate fixation of proximal humeral fractures. Options, findings and recommendations of different procedures are presented in this respect. The importance of correct reduction of the medial cortices, the use of calcar screws, the double-plate fixation method as well as the presented technique of intramedullary augmentation are discussed.

Keywords

Proximal humeral fracture · Medial support · Locking plate fixation · Fibula graft

Diskussion

Die winkelstabile Plattenosteosynthese dislozierter proximaler Humerusfrakturen bleibt eine Herausforderung für den Chirurgen der oberen Extremität. Trotz neuer Implantate und neuer Erkenntnisse über die anatomischen und biomechanischen Eigenarten dieser Frakturen, bleiben die Komplikationsraten bei der winkelstabilen Plattenosteosynthese hoch. Insbesondere die Varusdislokation mit Penetration der proximalen Schrauben

durch die Kopfkalotte wird häufig beobachtet. [3, 4, 15, 26, 28, 31].

Reposition

Die sicherlich effektivste Methode der medialen Abstützung ist die korrekte Reposition der medialen Kortizes im Bereich des Kalkars. Eine anatomische Reposition und die Wiederherstellung der medialen kortikalen Integrität sind die beiden wichtigsten prognostischen Faktoren für die sekundäre Dislokation [9, 17].

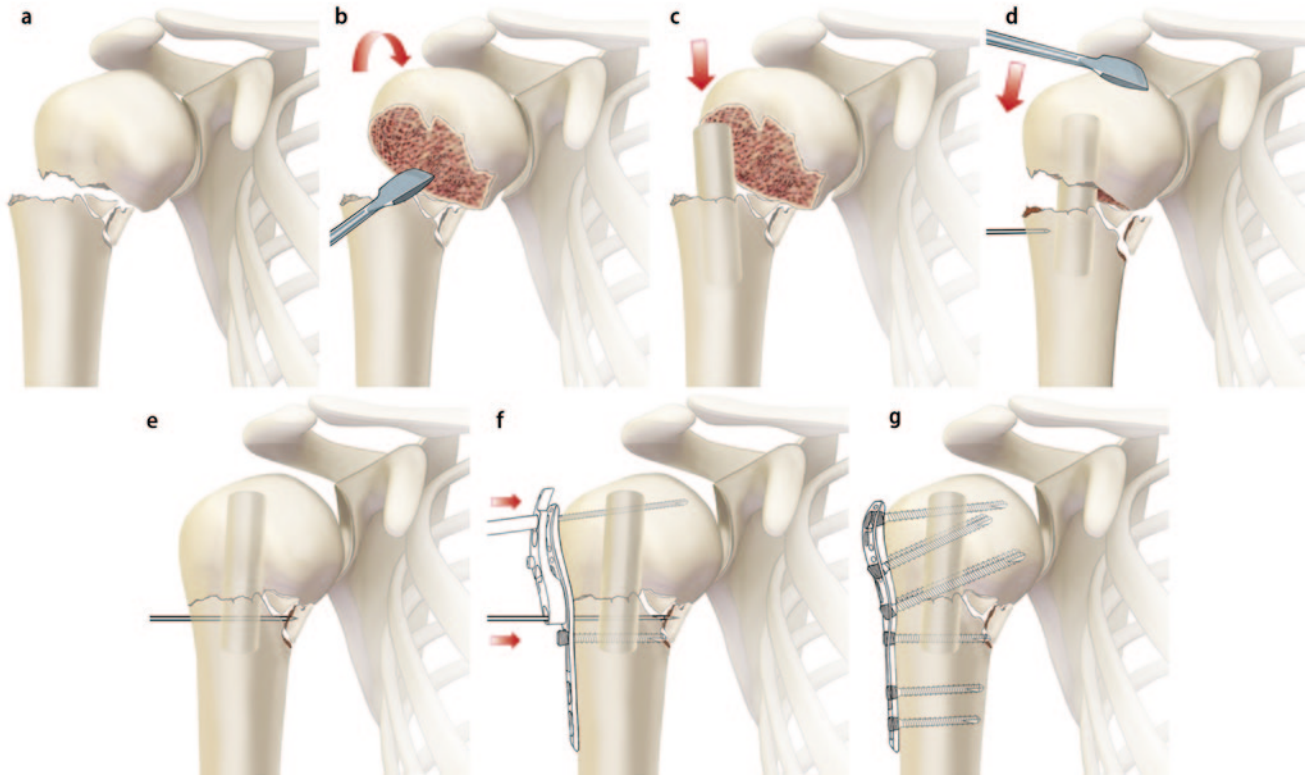


Abb. 3 ▲ Operationstechnik der winkelstabilen Plattenosteosynthese mit intramedullärem kortikalem Interponat. **a** Proximale Humerusfraktur mit medialer Trümmerzone. **b** Aufklappen der Fraktur nach posteromedial. **c** Einbringen des Interponats. **d** Reposition des Kopfes. **e** Positionierung und Fixation des Interponats direkt unter der Kalotte. **f** Anlegen der Platte und **g** Besetzen der Schraubenlöcher

Aufgrund der umliegenden neurovaskulären Strukturen [10, 21] sowie der Ansätze von Rotatorenmanchette und Bizepssehne muss die extramedulläre Fixation proximaler Humerusfrakturen in der Regel von lateral erfolgen. Die Reposition der medialen Kortizes kann daher nur indirekt oder durch die Fraktur hindurch erfolgen. Eine direkte visuelle Kontrolle ist nicht, allenfalls radiologisch möglich. Besonders bei Frakturen mit medialer Trümmerzone kann die anatomische Reposition technisch herausfordernd oder aussichtslos sein. Häufig wird in diesem Fall der Humerusschaft in den Kopf eingestaucht. Biomechanische Studien konnten aber zeigen, dass selbst bei sonst achsengerechter Reposition das Fehlen einer medialen kortikalen Abstützung zur sekundären Dislokation mit Varisierung des Kopfes führt [18].

Doppelplattenosteosynthese

Von der eigenen Arbeitsgruppe wurde früher vorgeschlagen, zwei Drittelrohr-

platten rechtwinklig zueinander zu positionieren, um die Rotations- und mediale Stabilität zu erhöhen [36]. Biomechanisch ist dieses Verfahren der winkelstabilen Plattenosteosynthese jedoch unterlegen [11]. Weiterhin kann die ventrale Platte bei unvorsichtiger Positionierung die aus der A. circumflexa humeri anterior abgehende A. arcuata kompromittieren [21].

In einer kürzlich publizierten Fallserie wurden 4 Patienten mit winkelstabiler lateraler Platte und intramedullär eingebrachter medialer Drittelrohrplatte versorgt [23]. Die Probleme, die sich hier bei einer möglichen Revision oder sekundärem Gelenkersatz stellen können, bleiben abzuwarten.

Kalkarschrauben

Gardner et al. schlugen als additive mediale Abstützung vor, schräge, nach medial-superior gerichtete Schrauben einzubringen (sog. Kalkarschrauben; ■ **Abb. 1**). Dies führte zu einer signifikanten Reduk-

tion des Repositionsverlustes nach 6 und 12 Monaten [9, 25]. In biomechanischen Studien zeigte sich eine signifikant höhere Versagenslast nach Setzen einer Kalkarschraube [7].

Die anatomische Nähe der korrespondierenden Plattenlöcher z. B. bei der PHILOS-Platte (Level E) zum N. axillaris [29] verbietet ein gedecktes Einbringen der Kalkarschraube. Im Rahmen der jüngst vermehrten Anwendung eingeschobener winkelstabiler Plattenfixationen über einen Delta-Split-Zugang im Sinne minimal-invasiver Verfahren ist die Notwendigkeit dieser Schrauben deshalb kritisch diskutiert worden. Werden Kalkarschrauben unter Sicht eingebracht, besteht gemäß eigener Studien kein erhöhtes Risiko für Axillarisläsionen. Auch eine befürchtete Beeinträchtigung der Durchblutung aufgrund der Nähe der Schraubenden zum medialen Periostschlauch bestätigte sich angesichts vergleichbarer Pseudarthrose- und Kopfnekrosen nicht [25]. Selbst bei Verwendung von Kalkarschrauben zeigten sich jedoch proximale

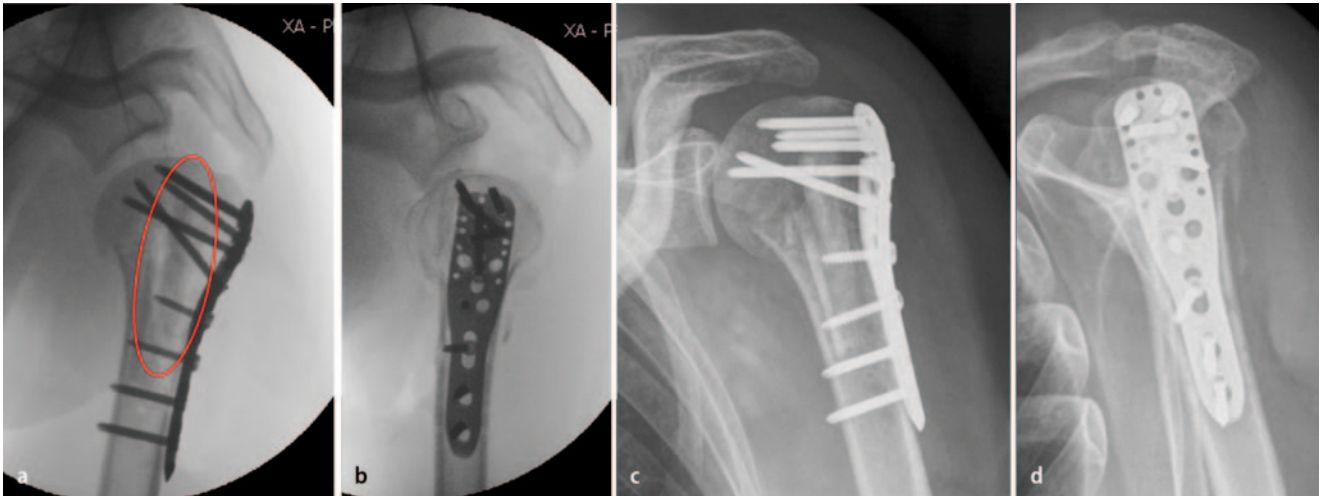


Abb. 4 ▲ Fallbeispiel: Intramedulläres Interponat. Intraoperative Bildgebung der linken Schulter links a.-p. (a) und axial (b) mit intramedullär eingebrachtem Interponat (*eingekreist*). In der radiologischen Bildgebung 8 Wochen postoperativ (c, d) zeigt sich die Fraktur konsolidiert

Schraubenperforationen in 6 bis 8 % der Fälle [9, 25].

Intramedulläre kortikale Interponate

Selbst bei anatomischer Reposition unter Verwendung von Kalkarschrauben zum Erreichen einer medialen Abstützung kommt es in 6 bis 8 % der Fälle zum Cut-Out [9, 25]. Die Komplikation tritt dabei in der Regel innerhalb der ersten drei Wochen auf, [22], wenn die Patienten mit der frühfunktionellen Beübung der Schulter beginnen. Um dies zu verhindern, muss entweder das verwendete Implantat von ausreichender Flexibilität sein, um den Übergang zwischen Schraube und Knochen hinreichend zu entlasten [19], oder es muss ein Implantat-Knochen-Komplex solcher Stabilität gebildet werden, dass eine angreifende Kraft anderweitig abgefangen werden kann. Eine höhere Steifigkeit der Fixation führt zu schnellerer Knochenheilung [37], folglich muss eine zu hohe Flexibilität des Implantats vermieden werden. Die Kombination von winkelstabiler Plattenosteosynthese und kortikalem Interponat scheint diesen Anforderungen gerecht zu werden. Biomechanisch konnte – zumindest in den bisher durchgeführten Ex-vivo-Versuchen – für diese Technik eine erhöhte Steifigkeit und verminderte Versagenslast nachgewiesen werden [5, 20, 24]. Neviasser et al. konnten zudem in einer Fallserie von 30 mit

intramedullärem Fibulainterponat versorgten Patienten die klinische Wertigkeit nachweisen. In dieser Studie zeigte sich ein Repositionsverlust nur in einem Fall. Dieser war nicht revisionsbedürftig. Das Vorkommen nur einer partiellen Humerkopfnekrose in dieser Patientengruppe widerspricht zudem der Befürchtung, dass durch das intramedulläre Einbringen des kortikalen Interponats die Durchblutung zwingend gefährdet sei. Das erfordert jedoch detailliertes Wissen um die Anatomie der vaskulären Strukturen und ein umsichtiges intraoperatives Vorgehen unter Schonung v. a. des posteromedialen Periostschlauchs. Die A. circumflexa humeri posterior leistet 2/3 der Blutversorgung des proximalen Humerus [12]. Beim proximal frakturierten Humerus ist sie meist das einzig verbleibende Blutgefäß. Eine zu starke Translation von Schaft- zu Kopfsegment ist daher zu vermeiden. Die Durchreißung des posteromedialen Periosts beginnt ab einer Dislokation von 3 mm, eine vollständige Durchreißung ist jedoch erst bei > 30 mm Versatz wahrscheinlich [16].

Letztlich sollte die Technik der medialen Abstützung mit intramedullärem, kortikalem Interponat osteoporotischen proximalen Humerusfrakturen mit medialer Trümmerzone und merklicher Kopf-Schaft-Dislokation vorbehalten sein.

Grundsätzlich können – wie im gezeigten Fallbeispiel – auch andere Transplantate als ein Fibulainterponat verwendet

werden, solange sie strukturell vergleichbar sind. Möglich sind trikortikale Transplantate, wie sie z. B. am Beckenkamm gewonnen werden können. Die Kosten allogener Knochentransplantate bzw. die Komorbidität autologer Knochentransplantationen (z. B. vom Beckenkamm) stehen dabei einem unkritischen Einsatz dieser Technik entgegen.

Als weitere Alternative zu den genannten Verfahren kann die Verbundosteosynthese genannt werden, mit allen Nachteilen einer Zemententfernung bei möglicher endoprothetischer Versorgung. Auch die Marknagelosteosynthese soll gerade für die Versorgung von 2-Part-Frakturen unter Berücksichtigung der bekannten Vor- und Nachteile genannt sein. Eine neue Richtung in Hinblick auf das Konzept der medialen Abstützung schlägt dabei z. B. die retrograde Nagelosteosynthese des proximalen Humerus ein [6].

Fazit für die Praxis

Die mediale Abstützung ist einer der bedeutenden prognostischen Faktoren in der Osteosynthese proximaler Humerusfrakturen. Ihre Wiederherstellung unter bestmöglicher Schonung der vaskulären und periostalen Strukturen ist daher primäres Ziel der Versorgung. Die optimale Methode dies zu erreichen ist die korrekte Reposition der medialen Kortizes. Kalkarschrauben können eine zusätzliche

Abstützung herbeiführen. Im Falle einer medialen Trümmerzone ist jedoch häufig eine suffiziente Reposition nicht zu erreichen und Kalkarschrauben sind gerade bei osteoporotischen Frakturen als alleiniger medialer Support nicht ausreichend. Hier bietet das Einbringen eines intramedullären kortikalen Interponats eine nützliche und biomechanisch vorteilhafte Alternative.

Korrespondenzadresse

Dr. med. G. Osterhoff
Klinik für Unfallchirurgie
Universitätsspital Zürich
Rämistrasse 100, 8091 Zürich
Schweiz
georg.osterhoff@balgrist.ch

Interessenkonflikt. Die Autoren geben an, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Literatur

- Akhter MP, Lappe JM, Davies KM, Recker RR (2007) Transmenopausal changes in the trabecular bone structure. *Bone* 41:111–116
- Baron J, Barrett J, Karagas MR (1996) The epidemiology of peripheral fractures. *Bone* 18:209–213
- Brunner F, Sommer C, Bahrs C, Heuwinkel R, Hafner C, Rillmann P, Kohut G, Ekelund A, Müller M, Audige L, Babst R (2009) Open reduction and internal fixation of proximal humerus fractures using a proximal humeral locked plate: a prospective multicenter analysis. *J Orthop Trauma* 23:163–172
- Charalambous C, Siddique I, Valluripalli K, Kovacevic M, Panose P, Srinivasan M, Marynissen H (2007) Proximal humeral internal locking system (PHILOS) for the treatment of proximal humeral fractures. *Arch Ortho Trauma Surg* 127:205–210
- Chow RM, Begum F, Beaupre LA, Carey JP, Adeeb S, Bouliane MJ (2011) Proximal humeral fracture fixation: locking plate construct ± intramedullary fibular allograft. *J Shoulder Elbow Surg* 21(7):894–901. [Epub ahead of print]
- Dietz SO, Hartmann F, Schwarz T, Nowak TE, Enders A, Kuhn S, Hofmann A, Rommens PM (2012) Retrograde nailing versus locking plate osteosynthesis of proximal humeral fractures: a biomechanical study. *J Shoulder Elbow Surg* 21(5):618–624
- Erhardt JB, Stoffel K, Kampshoff J, Badur N, Yates P, Kuster MS (2012) The position and number of screws influence screw perforation of the humeral head in modern locking plates: a cadaver study. *J Orthop Trauma* 26(10):e188–192
- Gardner M, Boraiah S, Helfet D, Lorich D (2008) Indirect medial reduction and strut support of proximal humerus fractures using an endosteal implant. *J Orthop Trauma* 22:195–200
- Gardner MJ, Weil Y, Barker JU, Kelly BT, Helfet DL, Lorich DG (2007) The importance of medial support in locked plating of proximal humerus fractures. *J Orthop Trauma* 21:185–191
- Gerber C, Schneeberger A, Vinh T (1990) The arterial vascularization of the humeral head. An anatomical study. *J Bone Joint Surg Am* 72:1486–1494
- Hessmann MH, Korner J, Hofmann A, Sternstein W, Rommens PM (2008) Osteosynthese am proximalen Humerus mittels winkelstabiler Platte oder Doppelplatte: eine vergleichende biomechanische Untersuchung. *Biomed Tech (Berl)* 53:130–137
- Hettrich CM, Boraiah S, Dyke JP, Neviasser A, Helfet DL, Lorich DG (2010) Quantitative assessment of the vascularity of the proximal part of the humerus. *J Bone Joint Surg Am* 92:943–948
- Kannus P, Palvanen M, Niemi S, Sievänen H, Parkkari J (2009) Rate of proximal humeral fractures in older Finnish women between 1970 and 2007. *Bone* 44:656–659
- Kettler M, Biberthaler P, Braunstein V, Zeiler C, Kretz M, Mutschler W (2006) Die winkelstabile Osteosynthese am proximalen Humerus mit der PHILOS-Platte. *Unfallchirurg* 109:1032–1040
- Koukakis A, Apostolou CD, Taneja T, Korres DS, Amini A (2006) Fixation of proximal humerus fractures using the PHILOS plate: early experience. *Clin Orthop Relat Res* 442:115–120
- Kralinger F, Unger S, Wambacher M, Smekal V, Schmoelz W (2009) The medial periosteal hinge, a key structure in fractures of the proximal humerus: a biomechanical cadaver study of its mechanical properties. *J Bone Joint Surg Br* 91:973–976
- Krappinger D, Bizozzo N, Riedmann S, Kammerlander C, Hengg C, Kralinger FS (2011) Predicting failure after surgical fixation of proximal humerus fractures. *Injury* 42:1283–1288
- Lescheid J, Zdero R, Shah S, Kuzyk PR, Schemitsch EH (2010) The biomechanics of locked plating for repairing proximal humerus fractures with or without medial cortical support. *J Trauma* 69:1235–1242
- Lill H, Hepp P, Korner J, Kassi JP, Verheyden AP, Josten C, Duda GN (2003) Proximal humeral fractures: how stiff should an implant be? A comparative mechanical study with new implants in human specimens. *Arch Orthop Trauma Surg* 123:74–81
- Mathison C, Chaudhary R, Beaupre L, Reynolds M, Adeeb S, Bouliane M (2010) Biomechanical analysis of proximal humeral fixation using locking plate fixation with an intramedullary fibular allograft. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 25:642–646
- Meyer C, Alt V, Hassanin H, Heiss C, Stahl JP, Giebel G, Koebke J, Schnettler R (2005) The arteries of the humeral head and their relevance in fracture treatment. *Surg Radiol Anat* 27:232–237
- Micic ID, Kim KC, Shin DJ, Shin SJ, Kim PT, Park IH, Jeon IH (2009) Analysis of early failure of the locking compression plate in osteoporotic proximal humerus fractures. *J Orthop Sci* 14:596–601
- Neviaser AS, Hettrich CM, Dines JS, Lorich DG (2011) Rate of avascular necrosis following proximal humerus fractures treated with a lateral locking plate and endosteal implant. *Arch Orthop Trauma Surg* 131:1617–1622
- Osterhoff G, Baumgartner D, Favre P, Wanner GA, Gerber H, Simmen HP, Werner CM (2011) Medial support by fibula bone graft in angular stable plate fixation of proximal humeral fractures: an in vitro study with synthetic bone. *J Shoulder Elbow Surg* 20:740–746
- Osterhoff G, Ossendorf C, Wanner GA, Simmen H-P, Werner CM (2011) The calcar screw in angular stable plate fixation of proximal humeral fractures – a case study. *J Orthop Surg Res* 6:50
- Papadopoulos P, Karataglis D, Stavridis SI, Petsatodis G, Christodoulou A (2009) Mid-term results of internal fixation of proximal humeral fractures with the Philos plate. *Injury* 40:1292–1296
- Ricchetti ET, Warrander WJ, Abboud JA (2010) Use of locking plates in the treatment of proximal humerus fractures. *J Shoulder Elbow Surg* 19:66–75
- Shahid R, Mushtaq A, Northover J, Maqsood M (2008) Outcome of proximal humerus fractures treated by PHILOS plate internal fixation. Experience of a district general hospital. *Acta Orthop Belg* 74:602–608
- Stecco C, Gagliano G, Lancerotto L, Tiengo C, Macchi V, Porzionato A, De Caro R, Aldegheri R (2010) Surgical anatomy of the axillary nerve and its implication in the transdeltoid approaches to the shoulder. *J Shoulder Elbow Surg* 19:1166–1174
- Sudkamp N, Bayer J, Hepp P, Voigt C, Oestern H, Kaab M, Luo C, Plecko M, Wendt K, Kostler W, Konrad G (2009) Open reduction and internal fixation of proximal humeral fractures with use of the locking proximal humerus plate. Results of a prospective, multicenter, observational study. *J Bone Joint Surg Am* 91:1320–1328
- Thanasas C, Kontakis G, Angoules A, Limb D, Giannoudis P (2009) Treatment of proximal humerus fractures with locking plates: a systematic review. *J Shoulder Elbow Surg* 18:837–844
- Tingart MJ, Apreleva M, von Stechow D, Zurakowski D, Warner JJ (2003) The cortical thickness of the proximal humeral diaphysis predicts bone mineral density of the proximal humerus. *J Bone Joint Surg Br* 85:611–617
- Voigt C, Geisler A, Hepp P, Schulz AP, Lill H (2011) Are polyaxially locked screws advantageous in the plate osteosynthesis of proximal humeral fractures in the elderly? A prospective randomized clinical observational study. *J Orthop Trauma* 25:596–602
- Voigt C, Kreienborg S, Megatli O, Schulz AP, Lill H, Hurschler C (2011) How does a varus deformity of the humeral head affect elevation forces and shoulder function? A biomechanical study with human shoulder specimens. *J Orthop Trauma* 25:399–405
- Walsh S, Reindl R, Harvey E, Berry G, Beckman L, Steffen T (2006) Biomechanical comparison of a unique locking plate versus a standard plate for internal fixation of proximal humerus fractures in a cadaveric model. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 21:1027–1031
- Wanner GA, Wanner-Schmid E, Romero J, Hersche O, von Smekal A, Trentz O, Ertel W (2003) Internal fixation of displaced proximal humeral fractures with two one-third tubular plates. *J Trauma* 54:536–544
- Wehner T, Claes L, Niemeier F, Nolte D, Simon U (2010) Influence of the fixation stability on the healing time – A numerical study of a patient-specific fracture healing process. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 25:606–612