

**Behandlungsergebnisse
der operativen Therapie von
Humerusschaftfrakturen
mit Cerclage und Nagelosteosynthese**

Kumulative Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Dr. med.

eingereicht an der
Medizinischen Fakultät der Universität Augsburg

von

Franziska Elisabeth von der Helm

Augsburg, 12.12.2022



Eidesstattliche Versicherung und Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass die vorliegende Dissertation von mir selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt wurde. Zudem wurden keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet. Außerdem versichere ich, dass die Dissertation keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt wurde und ich mich nicht anderweitig einer Doktorprüfung ohne Erfolg unterzogen habe.

Augsburg, 12.12.2022

Statutory declaration and statement

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources. As well I declare that I have not submitted a dissertation without success and not passed the oral exam. The present dissertation (neither the entire dissertation nor parts) has not been presented to another examination board.

Augsburg, 12.12.2022

Dissertation eingereicht am: 12.12.2022

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Alexander Hyhlik-Dürr

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. Dr. h. c. Edgar Mayr

Tag der mündlichen Prüfung: 19.09.2023

Zusammenfassung

In der Literatur und in der Praxis existiert zur Behandlung von Humerusschaftfrakturen kein Goldstandard. Lange Zeit war die konservative Therapie eine gerne genutzte Option. Inzwischen wird diese zu Gunsten einer frühfunktionellen Behandlung zunehmend verlassen, im operativen Segment konkurrieren verschiedene Operationsmethoden miteinander. Gängige Operationsmethoden sind die antegrade oder die retrograde Nagelosteosynthese. Aber auch die Verwendung von Plattenosteosynthesen als „open reduction and internal fixation“ oder als „minimally invasive plate osteosynthesis“ werden mit großem Erfolg eingesetzt. Eine Überlegenheit einer der Methoden ist derzeit nicht belegt. Das Ziel dieser retrospektiven Arbeit ist die Analyse der an unserer Klinik operativ versorgten Humerusschaftfrakturen. Die Kombination von Nagelosteosynthese und additiven, limitiert invasiv eingebrachten Cerclagen ist gerade am Humerus ein relativ neues operatives Verfahren. Die Behandlungsergebnisse sowie die perioperativen Komplikationen werden mit den anderen in der Literatur publizierten angewandten Therapieverfahren verglichen. Die Analyse zeigt eine Reduktion der Rate an Pseudarthrosen ohne vermehrte Komplikationen wie eine Läsion des Nervus radialis.

Summary

There is no gold standard for the treatment of humeral shaft fractures in the literature and in the daily clinical routine. The non-operative treatment was the preferred option for a long time. In the meantime, the therapeutic approach has shifted in favor of early functional treatment, and various surgical methods compete with each other for operative therapy. Common surgical methods are antegrade or retrograde nail osteosynthesis. But also the use of angle stable plate osteosynthesis as "open reduction and internal fixation" or as "minimally invasive plate osteosynthesis" are used with good results. None of the mentioned methods have proven to be superior. The aim of this retrospective study is to analyse all humeral shaft fractures treated surgically at our clinic. The combination of nail osteosynthesis and additive, limited invasive cerclage, is a relatively new surgical procedure, especially for the humerus. The treatment results and the perioperative complication rates are compared with the other surgical procedures published in the literature. The analysis shows a reduction of non-union rates without increased complication rates such as lesions to the radial nerve.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Versicherung und Erklärung	2
Statutory declaration and statement	2
Zusammenfassung	3
Summary	4
Einleitung	6
Ätiologie und Inzidenz der Humerusschaftfraktur	6
Definition und Klassifikation der Humerusschaftfraktur	6
Die Therapie der Humerusschaftfraktur	8
Historische Entwicklung der Cerclagen und Marknagelosteosynthese	9
Cerclage	9
Marknagelosteosynthese	9
Operationstechnik der Humerusschaftfraktur am Universitätsklinikum Augsburg	11
Diskussion	13
Literaturverzeichnis	16
Publikationen	18
Kompromittierung durch additive Cerclagen - Ist der N. radialis in der operativen Versorgung der Humerusschaftfraktur in Gefahr?	19
New ways of treatment of fractures of the humeral shaft: does the combination of intramedullary nail osteosynthesis and cerclage improve the healing process?	25
Danksagung	32

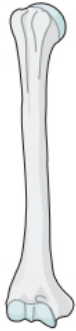










Einleitung

Ätiologie und Inzidenz der Humerusschaftfraktur

Die Humerusschaftfraktur ist eine seltene Fraktur eines großen Röhrenknochens und wird mit einer Häufigkeit von 1-3 % aller Frakturen beziffert. Die Altersverteilung zeigt sich bimodal mit Häufigkeitsgipfeln zwischen dem 20. und 30. sowie jenseits des 60. Lebensjahrs [1-3]. Am häufigsten handelt es sich um Folgen von Verkehrsunfällen, Unfällen im häuslichen oder beruflichen Umfeld sowie Sportunfällen. Die massive direkte Krafteinwirkung durch Anprall- oder Überrollkräfte führen vor allem zu Querfrakturen, kurzen Schrägfrakturen oder Mehrfragmentfrakturen. Lange Torsions- oder Schrägbrüche resultieren meist aus indirekten Traumata wie Sturz auf den Ellenbogen oder die ausgestreckte Hand. Pathologische Frakturen sind die Folge inadäquater Traumata bei Vorschädigung der Knochenstruktur infolge maligner Tumoren oder anderer krankhafter Zustände, wie beispielsweise der Osteoporose [1-4].

Definition und Klassifikation der Humerusschaftfraktur

Nach den Richtlinien der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO) kann jeder Frakturtyp mit einem 5-stelligen alphanumerischen Zeichencode dargestellt werden. Der Oberarm trägt die Nummer 1, die Lokalisation die Ordnungszahl 2. Die Morphologie der diaphysären Fraktur wird in Typ A = einfache Frakturen, Typ B = Keilfrakturen sowie Typ C = multifragmentäre Frakturen eingeteilt. Typ A - Frakturen weisen eine einzelne zirkumferentielle Unterbrechung der Diaphyse auf. Typ B – Frakturen sind durch den Kontakt zwischen den Hauptfragmenten nach Reposition gekennzeichnet. Multifragmentäre Frakturen vom Typ C bestehen aus vielen Bruchlinien. Der letzte Buchstabe beschreibt, in welchem Schaftdrittel (proximal=a, medial=b, distal=c) sich die Frakturlokalisierung befindet (Tab. 1) [5].

Humerusschaft AO 12	Frakturtyp			
				
	Einfache Fraktur	12 A1 Spiralförmig	12 A2 Schrägfraktur	12 A3 Querfraktur
				
	Keilfraktur		12 B2 Intakter Keil	12 B3 Frakturierter Keil
				
	Mehrfragmentäre Fraktur		12 C2 Intaktes Zwischensegment	21 C3 Frakturiertes Zwischensegment

Tab. 1: Graphische Darstellung der Klassifikation der Humerusschaftfraktur, Quelle: Meinberg E et al. Fracture and Dislocation Classification Compendium–2018 [5]

Die Therapie der Humerusschaftfraktur

Aufgrund der anatomischen Nähe zum Nervus radialis und der hohen Wahrscheinlichkeit, eine Pseudarthrose zu entwickeln, ist die Therapie der Humerusschaftfraktur vielfältig und wird in Fachkreisen seit Jahrzehnten kontrovers diskutiert. Am Kongress der deutschen Gesellschaft für Chirurgie 1964 wird Lorenz Böhler für seinen Vortrag mit folgenden Worten vorgestellt:

„...Herr Böhler hat den Titel seines Vortrages schon vor einiger Zeit in das mehr Temperamentvolle geändert. Er heißt: Gegen die operative Behandlung frischer geschlossener Oberarmschaftfrakturen.“ [6]. In seinem Referat stellt der Verfechter der konservativen Therapie mehrere Verfahren dar und postuliert, dass die operative Behandlung die Ausnahme in der Therapie der Humerusfrakturen ist. Er fordert zudem eine Revision der Lehrbücher. „Diejenigen, welche in ihren Büchern die Operation auch bei frischen Oberarmschaftbrüchen empfehlen, wie Küntscher, Rush-Gelbke, Müller, Hackethal, Leimbach usw. sollten dieses Kapitel für frische Oberarmschaftbrüche aus ihren Büchern streichen und darauf hinweisen, daß die operative Behandlung nur für veraltete Fälle und Pseudarthrosen in Frage kommt.“ [6].

Mit Entwicklung einer speziellen Orthese zur Ruhigstellung der Fraktur durch den kolumbianischen Chirurgen Augusto Sarmiento Rosillo 1977 erlangt die konservative Therapie der Humerusschaftfraktur einen hohen Stellenwert. Der Sarmiento Brace schient die Fraktur über einen intakten Weichteilmantel mit aktivem Muskeleinsatz bei erhaltener Gelenkfreiheit und wird für mehrere Wochen belassen [7]. Die langfristige Ruhigstellung ist oftmals sehr schmerzhaft und fordert eine hohe Compliance [8].

Eine zunehmende Operationsfrequenz zeigt die Sammelstudie der „Arbeitsgemeinschaft Osteosynthese“ (AO) 1991. Mögliche Immobilitätsschäden und der höhere Patientenkomfort mit postoperativ frühfunktioneller Nachbehandlung bilden die Grundlage, geeignete operative Verfahren zu etablieren [9]. Allerdings zeigen die verschiedenen operativen Verfahren spezifische Nachteile. Die Anfälligkeit gegen Rotationskräfte, welche am Humerus im besonderen Maße auftreten, haben alle operativen Verfahren gemein, was ein Grund sein kann, warum ein Goldstandard fehlt [8, 10-15]. Wie in einer experimentellen Studie an einem Tibiamodell mit Plattenosteosynthese und additiven Cerclagen gezeigt werden kann, kompensieren bei anatomischer Reposition additive Cerclagen diese Rotationskräfte [16]. Aus biomechanischer Sicht erscheint auch bei Humerusschaftfrakturen deshalb eine additive Cerclagen sinnvoll.

Historische Entwicklung der Cerclagen und Marknagelosteosynthese

Cerclage

Die seit der Antike bekannte Cerclagentechnik (franz., Umschlingung) beruht darauf, frakturdistrahierende Spannungen über eine Drahtkonstruktion aufzunehmen. Laurent Jean Baptiste Bérenger-Féraud beschreibt in seiner Abhandlung über die direkte Immobilisierung von Knochenfragmenten bei Brüchen von 1870, dass die Technik der „Knochennaht“ ein organischer oder metallischer Faden ist, der Fragmente in Kontakt hält, so wie das kreisförmige Band die Enden eines zerbrochenen Stocks zusammenhält [17]. Der belgische Chirurg Albin Lambotte beschreibt in seinem Lehrbuch für Chirurgie von 1913, dass die „Knochenbandage“ eine der wertvollsten Osteosynthesemöglichkeiten und das Verfahren der Wahl in einer ganzen Kategorie ist [18]. Er erwähnt zudem, dass der moderne Chirurg dafür kämpfen muss, dass diese so logische und nützliche Behandlung zugelassen wird [18]. In den Folgejahren kommt die Cerclagetechnik aufgrund lokaler Kompression und damit angeblich verbundene Störung der Knochendurchblutung zunehmend in Verruf und wird von Lorenz Böhler in seinem Vortrag 1940 als alt beschrieben [6, 19]. Während der intensiven Forschung an Platten- und Nagelosteosynthesen wird dieser Technik in den kommenden Jahrzehnten wenig Beachtung gegeben.

Marknagelosteosynthese

Die Idee der Marknagelung ist seit Anfang des 19. Jahrhunderts bekannt und wird bis Mitte des 20. Jahrhunderts von mehreren Chirurgen etabliert. 1886 berichtet Heinrich Bircher auf dem Jahreskongreß der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie in Berlin als erster über intramedulläre Fixierungen. Elfenbeinzapfen werden dabei von der Fraktur aus in die Markhöhle vorgeschoben um die Frakturstellung zu retinieren [20]. Der britische Chirurg Ernest William Hey Groves legt in seinen experimentellen Studien an Katzen und Kaninchen 1916 den Grundstein für die Marknagelung [21]. Das Prinzip der intramedullärer Schienung wird vom deutschen Chirurgen Gerhard Bruno Gustav Küntscher erstmalig in standardisierter Technik für die Therapie der Schaftfrakturen von langen Röhrenknochen eingesetzt. 1940 werden die Resultate von 12 Behandlungen mit dem Titel „Die Marknagelung von Knochenbrüchen“ vorgestellt. Das Prinzip der Stabilisierung der Bruchstelle durch Abstützung des Nagels an der Innenwand des Knochenrohrs nach Aufbohrung ist zunächst heftig

umstritten. Dem Knochenmark wird für die Vitalität des Knochens und die Heilung nach Knochenbrüchen eine große Bedeutung zugeschrieben. Während des zweiten Weltkrieges werden von Küntscher erfolgreich über 500 Operationen am Oberschenkel durchgeführt und die Technik der intramedullären Stabilisierung auch bekannt als „Küntscher Nagel“ erlangt zunehmend Akzeptanz [22, 23]. Bei der operativen Versorgung der Humerusschaftfraktur erlangt diese Technik aber nicht den gewünschten Erfolg. Neben der anatomischen Besonderheit des Markraumverlaufs (proximal zylindrisch, medial engste Stelle, distal dreisecksförmig) unterscheidet sich der Humerus von anderen langen Röhrenknochen auch durch unterschiedliche Beanspruchung seitens Zug-, Druck-, Biege- und insbesondere Rotationskräfte [24, 25]. Zudem zeigen sich vielfältige Probleme wie Fissuren bei der Nageleintrittsstelle, Überhitzungsschäden beim Aufbohren, Impingement des Schultergelenkes bei Nagelüberstand und fehlende Rotationsstabilität. Weitere operative Verfahren der unverriegelten Markraumschienung wie die Bündelnagelung nach Hackethal oder die intramedulläre Schienung durch einen elastischen Nagel mit Verklebungen von 3 Stellen im Markraum (Rush Pin) werden erprobt und wieder verlassen [26-28].

Der deutsche Chirurg Hartmut Seidel entwickelt Mitte der 80er Jahre ein intramedulläres Stabilisierungssystem, welches auf die besonderen Eigenschaften des Humerus eingeht. Durch die Weiterentwicklung des antegrad eingebrachten Verriegelungsnagel mit distalem Aufspreizmechanismus gewann die intramedulläre Nagelosteosynthese des Humerusschaftes wieder an Bedeutung [29]. Auch der retrograd eingebrachte Russell-Taylor-Nagel mit proximaler und distaler Verriegelung hat die Verbesserung der Rotationsstabilität als Ziel [8]. In den 90er Jahren entwickelt die Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese (AO) den unaufgebohrten Verriegelungsnagel. Solide Titannägel werden im proximalen und distalen Anteil des Nagels gegen Rotation gesichert. Das Prinzip der minimal-invasiven und „biologischen“ Osteosynthese soll die substanzielle Schädigung der Kortikalis durch Beeinträchtigung der enostalen Durchblutung und Hitzeentwicklung während des Aufbohrens minimieren. Die geringere Fett- und Mediatoreneinschwemmung sowie verkürzte Operationszeit und geringerer Blutverlust sind weitere Vorteile dieser Technik [30].

Operationstechnik der Humerusschaftfraktur am Universitätsklinikum Augsburg

Die antegrade, unaufgebohrte Marknagelosteosynthese mit additiver, limitiert invasiver Kabelcerclage hat sich in den letzten 10 Jahren am Universitätsklinikum Augsburg als Standard etabliert. Die Operation wird standardmäßig in Beach-Chair-Position mit Möglichkeit zur intraoperativen Durchleuchtung im anterior-posterioren (a.-p.) und axialen Strahlengang durchgeführt [31]. Unter Durchleuchtungskontrolle wird die Höhe der geplanten Cerclage definiert und es folgt die Hautinzision von 6-8 cm auf der Lateralseite des Oberarms. Nach vorsichtiger Durchtrennung der Faszie wird die Muskulatur mit dem Raspatorium sparsam vom Humerus abgeschoben, bis der Schaft mit dem Finger umfahren werden kann. Anschließend wird ein Cerclage-Umführungsinstrument von dorsal eingesetzt. Eine in das Lumen eingelegte Redondrainage (B.Braun, Redon Saugdrain, U2110800, CH08) wird vorgeschoben, so dass sie mit einer ventral am Humerus vorbeigeführten Overholt-Klemme gefasst und nach lateral aus der Wunde gezogen werden kann. Nun wird das Umführungsinstrument entfernt und eine Drahtcerclage (DePuySynthes, Johnson & Johnson Medical GmbH, Cable System, REF 298.801.01, Ø 1.7mm) in das freie Lumen der Drainage gesteckt. Das Herausziehen der weichen Redondrainage geht im Gegensatz zum starren Draht mit einer minimaler Weichteilkomprimierung einher. Hierüber kann die Cerclage mit Hilfe der Drainage eingezogen werden und umschlingt die Frakturfragmente des Humerus. Dank dieses Manövers über den Umweg der Redondrainage gelingt das Einbringen der Cerclage über den limitiert invasiven Zugang unter minimalem Ablösen der Weichteile vom Humerus. Die Integrität des Nervus radialis wird durch eine digitale Kontrolle geprüft. Durch axialen Zug und Rotation des distalen Fragmentes wird die Fraktur unter simultanem Anziehen der Cerclage anatomisch reponiert. Bevor die Cerclage zunächst manuell und anschließend mit dem Spanngerät angezogen wird, erfolgt eine weitere digitale Kontrolle des Nerven und der weiteren Leitungsbahnen. Bei Notwendigkeit weiterer Cerclagen wird das beschriebene Manöver entsprechend wiederholt. Es folgt nun nach präliminärer Stabilisierung die antegrade Verriegelungsnagelung des Humerus über einen Deltasplit Zugang. Als Implantat findet der „Locking Blade Nail“ (LBN) der Firma Marquardt Medizintechnik GmbH Anwendung. Die Hautinzision über 5 cm beginnt 2 cm medial der Acromionspitze am Vorderrand des Acromions. Der freie Anteil des M. deltoideus wird im Faserverlauf gespalten und die Bursa eröffnet. Die Inzision der Sehne des M. supraspinatus wird zentral im Faserverlauf über dem Humeruskopf angelegt und projiziert sich in der axialen Durchleuchtung auf das Zentrum des Oberarmschaftes. Der korrekte Nageleintritt liegt 1 bis 2 mm lateral des Apex der Kopfkalotte und projiziert sich sowohl in der axialen als auch in der a.-p. Ebene auf die Mitte des Markkanals. Der Tellerspieß wird in Verlängerung der Schaftachse in den Humeruskopf

eingebohrt und mit der Hohlfräse überbohrt. Mit Hilfe des Zielbügels wird nun der Nagel eingeführt. Die Tubercula werden mit Kopfverriegelungsschrauben nach Stichinzision mit dem Nagel verschraubt. Nach Aufbohren und Positionieren der Klinge folgt die bikortikale distale Verriegelung in Freihandverriegelungstechnik.

Publikationen über die Therapie der Humerusschaftfraktur sind selten und die Fallzahlen in der Regel klein. Die Aufarbeitung des Patientengutes der Universitätsklinik für Unfallchirurgie, Orthopädie, Plastische und Handchirurgie Augsburg in einem Zeitraum von 2015-2020 zeigt eine Vielzahl von operativ versorgten Humerusschaftfrakturen mit Marknagelosteosynthesen und additiven, limitiert invasiven Cerclagen. Der Vergleich dieser neuen Operationstechnik mit den in der Literatur vorhandenen Daten bilden die Grundlage der Studie.

Diskussion

Die operative Therapie der Humerusschaftfraktur mit Marknagelosteosynthese und additiven, limitiert invasiv eingebrachten Cablecerclagen kann nach vorliegender Studie durchaus in die Diskussionsrunden über die beste Operationstechnik aufgenommen werden. Bei den wichtigsten Punkten wie Verbesserung der Pseudarthroserate und Minimierung von perioperativen Komplikationen wie eine Läsion des Nervus radialis kann diese Operationstechnik überzeugen [31, 32]. Aufgrund der zu erwartenden demographisch begründeten Fallzahlsteigerung scheint die Entwicklung eines Therapiestandards immer mehr in den Fokus zu treten. Das oberste Therapieziel ist die Wiederherstellung der Funktion. Dafür ist neben der Frakturentität der Allgemeinzustand des Patienten sowie der Therapiewunsch differenziert zu betrachten [25, 33].

Als Standardverfahren der konservativen Therapie ist die immobilisierende Orthese „Sarmiento-Brace“ ein bis heute gültiges Konzept [7, 34, 35]. Die lange Behandlungszeit über 12 (bis 22) Wochen erfordert eine gute Compliance. Voraussetzung ist zudem ist ein intakter Weichteilmantel, die Fähigkeit zur aktiven Muskelarbeit, Schmerzarmut sowie die Fähigkeit zu Stehen, damit die Schwerkraft mögliche Fehlstellungen korrigiert. Sarmiento et al. untersucht in seiner Studie 620 Patienten aus den Jahren 1978 bis 1990. 604 Frakturen sind primär geheilt, bei 16 Frakturen kam es zu einer Non Union, welche sekundär operativ versorgt wurde. Er beschreibt gute funktionelle Ergebnisse sowie eine Varusdeformität von 15° bei 87% der Patienten, welche in den meisten Fällen weder kosmetisch noch funktionell einschränkend ist. Das Patientendurchschnittsalter mit 36 Jahren ist jung und es fehlen Berichte über osteoporotische Frakturen [7, 25]. Pollock et al. untersuchten in seiner Studie 2020 die Nonunion-Rate von konservativ behandelten Humerusschaftfrakturen bei Patienten über 55 Jahren. Bei einer Pseudarthroserate von 32% zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Nonunion und höherem Alter [35]. In einer Studie von Hosseini et al. wurde die konservative Therapie mit der operativen Plattenosteosynthese ORIF (open reduction internal fixation) verglichen. Dabei zeigt sich eine erhöhte Non Union Rate von 6,6% bei der konservativen Therapie [13].

In der operativen Therapie ist das Ziel aller internen Osteosyntheseverfahren eine übungsstabile Versorgung ohne Bewegungsrestriktionen. Die Nachbehandlung sieht direkt postoperativ eine freie Mobilisierung in allen Ebenen vor, verbunden mit einer Limitierung der Gewichtsbelastung für 6 Wochen. Bei beginnend knöchernen Konsolidierung kann mit der Aufbelastung begonnen werden. Sowohl die plattenosteosynthetische Versorgung als auch die Verriegelungsnagelung erbringen gute klinische Ergebnisse, die sich nicht signifikant

unterscheiden. Intraoperativ zeigen sich ebenso keine wesentlichen Unterschiede, wie eine verlängerte Schnitt-Naht-Zeit oder vermehrter intraoperativer Blutverlust.

Unter besonderer Berücksichtigung von perioperativen Komplikationen wie der sekundären Radialisläsion zeigen die verschiedenen Verfahren im Literaturvergleich ebenso keine signifikanten Unterschiede. Unsere Analyse der perioperativen Komplikationen hat gezeigt, dass die additiv, limitiert invasiv eingebrachte Cerclage keine erhöhte Komplikationsrate von Nervenläsionen hat. Die sorgfältige Anwendung der Cerclagen verursacht somit keine Kompromittierung des Nervens. Ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Nervenläsionen ist der spiralförmige Verlauf am Oberarm mit Durchtritt durch das Septum intermusculare laterale als relativer Fixationspunkt am mittleren Oberarmdrittel. Der Nerv ist dadurch sowohl durch das Frakturgeschehen wie auch durch Manipulation wie Druck oder der operativen Lagerung Traktionsschäden ausgesetzt [2, 4, 10, 11, 25, 31, 36].

Aus biomechanischer Sicht führt die Verwendung additiver Cerclagen zu einer signifikanten Steigerung der Stabilität, wie Sandriesser et al. in einer biomechanischen Studie bei einer Überbrückungsplattenosteosynthese mit additiven Cerclagen an der Tibia zeigen konnten [16]. Wie in einer Übersichtsarbeit von Förch et.al beschrieben, wird bei Verwendung von Cerclagen die mögliche Kompromittierung der ossären Durchblutung und die damit verbundene Störung der Frakturheilung oft als Gegenargument vorgebracht [19, 37, 38]. Aber auch die Distraction der Hauptfragmente begünstigt die Bildung von Pseudarthrosen [34, 39]. Insbesondere bei den proximalen Schafffrakturen zeigt sich ein typisches Dislokationsmuster mit Frakturausläufer in den Humeruskopfbereich. Der Frakturverlauf zwischen den Ansätzen des Musculus deltoideus zieht das proximale Fragment in eine Abduktionsfehlstellung. Das Schafffragment wird am Ansatz des Musculus pectoralis nach medial gezogen [33].

Weitere Faktoren wie hoher Body-Mass-Index, Rauchen Alkoholismus, Osteoporose, Niereninsuffizienz und Multimedikation begünstigen die Bildung von Pseudarthrosen [40, 41]. Die Heilungsrate in unserer Studie zeigt mit 97,4% eine sehr niedrige Pseudarthroserate. Somit wirkt sich die operative Stabilisierung durch additive Cerclagen positiv auf die Heilung aus, ohne durch Strangulation die Fragmentdurchblutung zu gefährden [32].

Die präoperative Analyse der Frakturmorphologie ist der wichtigste Schritt zur Wahl des Osteosyntheseverfahrens. Spiralfrakturen (AO 12 A1/A2) und Keilfrakturen (AO 12 B2/B3) eignen sich für eine Versorgung mit additiven Cerclagen. Diese Frakturart ist bei den Humerusschafffrakturen häufig [10, 13, 25, 31, 42], wie auch in unserer Studie gezeigt werden konnte. Querfrakturen (AO 12 A3) mit einer Frakturlinie < 30° und Trümmerfrakturen (AO 12 C3) sind für additive Cerclagen aufgrund fehlender ossäre Auflagefläche nicht geeignet. Bei Querfrakturen mit osteoporotischer Knochenqualität ist die Marknagelosteosynthese aufgrund hoher Primärstabilität, geringerem Weichteiltrauma, geschlossene Reposition und

intramedulläre Implantatlage zu bevorzugen [4, 8, 33, 43, 44]. Die Plattenosteosynthese sowie die Nagelosteosynthese sind bei Trümmerfrakturen als biologische Überbrückungsosteosynthesen indiziert. Bei distalen Schaftfrakturen mit Frakturausläufer ins Cubitalgelenk ist die plattenosteosynthetische Versorgung auf dem radialen metaphysären Pfeiler mit stetiger Kontrolle des Nervus radialis auf Unversehrtheit zu empfehlen [25, 33].

Die Hauptindikation zur Versorgung der Humerusschaftfraktur durch einen Fixateur externe besteht bei Mehrfachverletzungen sowie bei ausgeprägten Weichteilverletzungen. Aufgrund der vielen Nachteile, wie Pininfekt/-lockerung, verzögerte Heilung oder Pseudarthrosenbildung ist ein frühzeitiger Verfahrenswechsel sinnvoll [25, 33].

Die Indikationsstellung zur operativen Behandlung ist differenziert und das perioperative Management zur Vermeidung komplikativer Verläufe beeinflusst die Therapieentscheidung ebenso wie die Heilungsrate. In Zusammenschau aller Faktoren ist die Therapie der Humerusschaftfraktur mit einer Marknagelosteosynthese und additiven Cerclagen eine wertvolle operative Option, die nach genauer Frakturanalyse im Literaturvergleich deutlich bessere Ergebnisse zeigt.

Literaturverzeichnis

1. Tytherleigh-Strong, G., N. Walls, and M.M. McQueen, *The epidemiology of humeral shaft fractures*. J Bone Joint Surg Br, 1998. **80**(2): p. 249-53.
2. Ekholm, R., et al., *Fractures of the shaft of the humerus. An epidemiological study of 401 fractures*. J Bone Joint Surg Br, 2006. **88**(11): p. 1469-73.
3. Clement, N.D., *Management of Humeral Shaft Fractures; Non-Operative Versus Operative*. Arch Trauma Res, 2015. **4**(2): p. e28013.
4. Goncalves, F.F., et al., *Evaluation of the surgical treatment of humeral shaft fractures and comparison between surgical fixation methods*. Rev Bras Ortop, 2018. **53**(2): p. 136-141.
5. Meinberg, E.G., et al., *Fracture and Dislocation Classification Compendium-2018*. J Orthop Trauma, 2018. **32 Suppl 1**: p. S1-S170.
6. Böhler, L., *Gegen die operative Behandlung von frischen Oberarmschaftbrüchen*. Langenbecks Archiv für klinische Chirurgie, 1964. **308**(1): p. 465-476.
7. Sarmiento, A., et al., *Functional bracing of fractures of the shaft of the humerus*. J Bone Joint Surg Am, 1977. **59**(5): p. 596-601.
8. Südkamp, N., et al., *Humerusschaftfrakturen und intramedulläre Stabilisierungsverfahren*. Op-journal, 2000. **16**: p. 182-186.
9. Nast-Kolb, D., W.T. Knoefel, and L. Schweiberer, *[The treatment of humeral shaft fractures. Results of a prospective AO multicenter study]*. Unfallchirurg, 1991. **94**(9): p. 447-54.
10. Esmailiejah, A.A., et al., *Treatment of Humeral Shaft Fractures: Minimally Invasive Plate Osteosynthesis Versus Open Reduction and Internal Fixation*. Trauma Mon, 2015. **20**(3): p. e26271.
11. Fan, Y., et al., *Management of Humeral Shaft Fractures With Intramedullary Interlocking Nail Versus Locking Compression Plate*. Orthopedics, 2015. **38**(9): p. e825-9.
12. Ouyang, H., et al., *Plate versus intramedullary nail fixation in the treatment of humeral shaft fractures: an updated meta-analysis*. J Shoulder Elbow Surg, 2013. **22**(3): p. 387-95.
13. Hosseini Khameneh, S.M., et al., *Humeral shaft fracture: a randomized controlled trial of nonoperative versus operative management (plate fixation)*. Orthopedic Research and Reviews, 2019. **Volume 11**: p. 141-147.
14. Wong Wei Kang, N., et al., *Intramedullary nail: the past, present and the future - a review exploring where the future may lead us*. Orthop Rev (Pavia), 2021. **13**(2): p. 25546.
15. Deffner, P. and C. Ulrich. *Die interne Stabilisierung diaphysärer Oberarmfrakturen mit dem Seidel-Nagel*. 1995. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
16. Sandriesser, S., et al., *Supplemental cerclage wiring in angle stable plate fixation of distal tibial spiral fractures enables immediate post-operative full weight-bearing: a biomechanical analysis*. Eur J Trauma Emerg Surg, 2020.
17. Bérenger-Féraud, L.J.B., *Traité de l'immobilisation directe des fragments osseux dans les fractures*. De la ligature osseuse. 1870. 744.
18. Lambotte, A., *Chirurgie opératoire des fractures*. 1913. 1-568.
19. Förch, S., et al., *[Impairment of the blood supply by cerclages: myth or reality? : An overview of the experimental study situation]*. Unfallchirurg, 2020.
20. Bircher, H., *Eine neue Methode unmittelbarer Retention bei Frakturen des Röhrenknochen*, in *Eine neue Methode unmittelbarer Retention bei Frakturen des Röhrenknochen*. 1886, Arch Klin Chir 34. p. 410-425.
21. Ratliff, A.H., *Ernest William Hey Groves and his contributions to orthopaedic surgery*. Ann R Coll Surg Engl, 1983. **65**(3): p. 203-6.
22. Schlich, T., *Osteosynthese: Geschichte einer schwierigen Therapiemethode*, in *Geschichte operativer Verfahren an den Bewegungsorganen*, M.A. Rauschmann, K.-D. Thomann, and L. Zichner, Editors. 2000, Steinkopff: Heidelberg. p. 55-72.

23. Heim, U.F.A., *Geschichte der Entstehung und erste Jahre der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen 1952–1963 (1)*. OP-JOURNAL, 2012. **28**(01): p. 98-106.
24. Blum, J., et al., *Oberarmschaftfrakturen - Marknagelosteosynthese*. Op-journal, 2002. **18**: p. 252-261.
25. Schittko, A., [*Humeral shaft fractures*]. Chirurg, 2004. **75**(8): p. 833-46; quiz 847.
26. Hackethal, K.H., *Grundlagen der Bündel-Nagelung*, in *Die Bündel-Nagelung. Experimentelle und Klinische Studie über eine Neuartige Methode der Markraum-Schienung Langer Röhrenknochen: Leitfaden der Technik*. 1961, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 10-58.
27. Rush, L.V., *Stabilität der Fixation*, in *Atlas der Intramedullären Frakturfixation nach Rush: Ein Behandlungssystem*. 1957, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 40-45.
28. Spängler, H., *Zur Behandlung der Oberarmschaftbrüche mit Rush-Nägeln*. Archiv für orthopädische und Unfall-Chirurgie, mit besonderer Berücksichtigung der Frakturenlehre und der orthopädisch-chirurgischen Technik, 1962. **54**(4): p. 417-424.
29. Seidel, H., *Verriegelungsnagelung des Humerus*. Operative Orthopädie und Traumatologie, 1991. **3**(3): p. 158-168.
30. Attal, R. and M. Blauth, *Unaufgebohrte Marknagelung*. Der Orthopäde, 2010. **39**(2): p. 182-191.
31. von der Helm, F., et al., [*Compromising due to additive cerclages : Can surgical treatment of humeral shaft fractures cause damage to the radial nerve?*]. Unfallchirurg, 2021.
32. von der Helm, F., et al., *New ways of treatment of fractures of the humeral shaft: does the combination of intramedullary nail osteosynthesis and cerclage improve the healing process?* Eur J Trauma Emerg Surg, 2021.
33. Biber, R., H.J. Bail, and M. Geßlein, [*Humeral shaft fractures*]. Unfallchirurg, 2018. **121**(9): p. 747-758.
34. Sarmiento, A. and L.L. Latta, [*Humeral diaphyseal fractures: functional bracing*]. Unfallchirurg, 2007. **110**(10): p. 824-32.
35. Pollock, F.H., et al., *Humeral Shaft Fracture Healing Rates in Older Patients*. Orthopedics, 2020. **43**(3): p. 168-172.
36. Schwab, T.R., et al., *Radial nerve palsy in humeral shaft fractures with internal fixation: analysis of management and outcome*. Eur J Trauma Emerg Surg, 2018. **44**(2): p. 235-243.
37. Karakoyun, O., et al., *Effect of cable cerclage on regional blood circulation in rabbits: a scintigraphic study*. J Orthop Surg (Hong Kong), 2016. **24**(3): p. 367-369.
38. van Steijn, M.J. and J.A. Verhaar, *Osteonecrosis caused by percutaneous cerclage wiring of a tibial fracture: case report*. J Trauma, 1997. **43**(3): p. 521-2.
39. Campochiaro, G., et al., *Humeral shaft non-union after intramedullary nailing*. Musculoskelet Surg, 2017. **101**(2): p. 189-193.
40. Zura, R., et al., *Epidemiology of Fracture Nonunion in 18 Human Bones*. JAMA Surgery, 2016. **151**(11): p. e162775.
41. Maresca, A., et al., *Why a surgically treated humeral shaft fracture became a nonunion: review of 11 years in two trauma centers*. Musculoskelet Surg, 2017. **101**(Suppl 2): p. 105-112.
42. Lotzien, S., et al., *Open reduction and internal fixation of humeral midshaft fractures: anterior versus posterior plate fixation*. BMC Musculoskelet Disord, 2019. **20**(1): p. 527.
43. Hashmi, F.R. and E. Mayr, *A new nail with a locking blade for complex proximal humeral fractures*. European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology, 2016. **26**(8): p. 831-836.
44. Lill, H., et al., [*Osteoporotic fractures of the proximal humerus*]. Chirurg, 2012. **83**(10): p. 858-65.

Publikationen

von der Helm, F., et al., *Kompromittierung durch additive Cerclagen - Ist der N. radialis in der operativen Versorgung der Humerusschaftfraktur in Gefahr?* Unfallchirurg, 2021.

von der Helm, F., et al., *New ways of treatment of fractures of the humeral shaft: does the combination of intramedullary nail osteosynthesis and cerclage improve the healing process?* Eur J Trauma Emerg Surg, 2021.

Unfallchirurg

<https://doi.org/10.1007/s00113-021-00995-8>

Angenommen: 25. Februar 2021

© Der/die Autor(en) 2021

Redaktion

W. Mutschler, München

H. Polzer, München

B. Ockert, München



F. von der Helm · J. Reuter · L. Adolf-Lisitano · E. Mayr · S. Förch

Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie, Plastische und Handchirurgie, Universitätsklinikum Augsburg, Augsburg, Deutschland

Kompromittierung durch additive Cerclagen

Ist der N. radialis in der operativen Versorgung der Humerusschaftfraktur in Gefahr?

Einleitung

Die Humerusschaftfraktur ist eine seltene Fraktur eines großen Röhrenknochens. Sie wird mit einer Häufigkeit von 1–3% aller Frakturen beziffert [1] und zeigt eine bimodale Altersverteilung mit Häufigkeitsgipfeln zwischen dem 20. und 30. sowie jenseits des 60. Lebensjahrs [2–4]. Verkehrsunfälle und Stürze aus größerer Höhe führen über eine direkte Gewalteinwirkung v. a. zu Querfrakturen, kurzen Schrägfrakturen oder Mehrfragmentfrakturen [3]. Beim Sturz auf die Hand werden v. a. bei älteren Menschen Torsionsfrakturen beobachtet. Aufgrund des demografischen Wandels wird sich die Inzidenz dieser Fraktorentität in Zukunft um ein Vielfaches erhöhen. Somit wird auch die Bedeutung des Managements dieser Frakturen zunehmen [4, 5]. Mancherorts ist die Humerusschaftfraktur nach wie vor die Domäne der konservativen Therapie [6]. In der operativen Versorgung erfüllen neu entwickelte Implantate zunehmend die Ansprüche des modernen Patienten und erlauben eine lastfreie, frühfunktionelle Nachbehandlung [7]. Marknagel- und Plattenosteosynthese konkurrieren miteinander und stellen hohe Anforderungen an Chirurg, Implantat und operatives Vorgehen [8]. Biomechanisch wird die Osteosynthese im Gegensatz zur unteren Extremität weniger durch axiale, sondern v. a. durch Rotationskräfte belastet. Für zusätzliche Stabilität bei Schrägfrakturen könnten additive Cerclagen sorgen, die in einer

experimentellen Studie eine signifikante Steigerung insbesondere der Rotationsstabilität an einem Tibia-Modell gezeigt haben [9]. Bei Oberarmfrakturen wird deren Einsatz aufgrund des Risikos iatrogenen Radialisläsionen in Fachkreisen kontrovers diskutiert. In unserem Haus werden Humerusschaftfrakturen regelmäßig mittels antegrader Marknagelosteosynthese in Kombination mit limitiert invasiven, additiven Cerclagen versorgt. Im Folgenden haben wir untersucht, ob dieses operative Vorgehen zu einer erhöhten Rate von sekundären Radialisläsionen führt.

Methodik

Ein positives Ethikvotum des Universitätsklinikum Augsburg wurde unter dem Zeichen 2019-36 eingeholt. Alle volljährigen Patienten, die im Zeitraum von 5 Jahren (Januar 2015 bis März 2020) durch Marknagelosteosynthese und limitiert invasive, additive Cerclagen bei einer Humerusschaftfraktur versorgt worden waren, wurden in die retrospektive Analyse eingeschlossen. Zu den Ausschlusskriterien zählten Alter unter 18 Jahre, Mehrfachverletzungen an der ipsilateralen Extremität bei Polytrauma, Querfrakturen (<30°) (AO 12-A3), Trümmerfrakturen (AO 12-C3) und Frakturen mit Beteiligung des distalen Oberarms, da sich diese nicht für eine Stabilisierung durch additive Cerclagen eignen.

Über das Krankenhausdokumentationssystem wurden folgende Daten ge-

wonnen: Alter, Geschlecht, Unfallmechanismus, Seite, Ausmaß der Weichteilverletzung, Begleiterkrankungen, Zeitpunkt der Operation, Schnitt-Naht-Zeit, Komplikationen und Liegedauer. Anhand der präoperativen radiologischen Bildgebung wurde die Frakturmorphologie nach AO/OTA (Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen/Orthopaedic Trauma Association) klassifiziert (**Abb. 1; [10]**). Die Anzahl der verwendeten Cerclagen und deren Lokalisation in Bezug auf die Drittelgrenzen der Humeruslänge (absteigend von kranial) wurden dokumentiert. Sämtliche Komplikationen wurden erfasst und ausgewertet, diese Patienten wurden kontaktiert und nachuntersucht. Im Falle einer primären oder sekundären Radialisläsion erfolgte noch während des postoperativen primären stationären Aufenthaltes die Abklärung mittels fachneurologischer Konsiliaruntersuchung mit Neurosonographie und Messung der Nervenleitgeschwindigkeit. Im weiteren Verlauf notwendige Revisionsoperationen wurden ebenso erfasst wie auch Spätresiduen nach stattgehabter Verletzung des Nervus radialis.

Operationstechnik

Die antegrade Marknagelosteosynthese mit additiver limitiert invasiver Draht-Cerclage führen wir standardmäßig in „Beach-chair“-Position mit Möglichkeit zur intraoperativen Durchleuchtung im a.-p. und im axialen Strahlengang durch. Zunächst wird die Frakturhöhe in der



Abb. 1 ▲ Präoperative Röntgenaufnahme in 2 Ebenen einer Humerusschaftfraktur links (AO 12-B2)

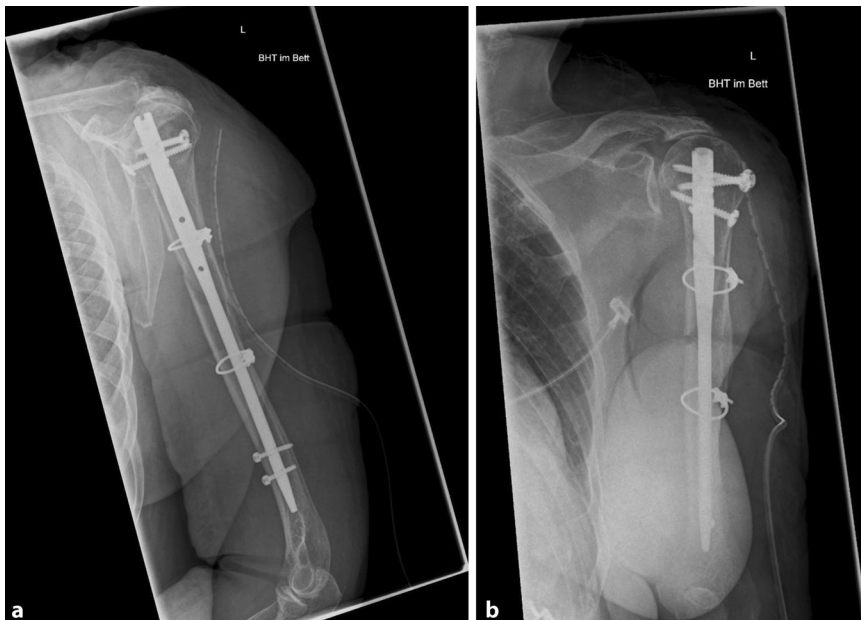


Abb. 3 ▲ Postoperative Röntgenaufnahme in 2 Ebenen einer operativ versorgten Humerusschaftfraktur mit Marknagelosteosynthese und 2 Cerclagen

Durchleuchtung definiert und auf Höhe der geplanten Cerclage eine ca. 5 cm lange Hautinzision auf der Lateralseite des Oberarms angelegt. Nach vorsichtiger Durchtrennung der Faszie wird die Muskulatur mit dem Raspatorium sparsam vom Humerus abgeschoben, bis der Schaft mit dem Finger umfahren werden kann. Anschließend wird ein Umfahrer

von dorsal eingesetzt. Eine in das Umfahrgeschütz eingelegte Redon-Drainage (Größe 8) wird vorgeschoben, sodass sie mit einer ventral am Humerus vorbeiführenden Overholt-Klemme gefasst und nach lateral aus der Wunde gezogen werden kann. Nun wird das Umfahrgeschütz entfernt und eine Draht-Cerclage (1,7 mm) in das freie Lumen



Abb. 2 ▲ Intraoperative Bildwandlerkontrolle der eingebrachten Cerclagen

der Drainage gesteckt. Das Herausziehen der weichen Redon-Drainage geht im Gegensatz zum starren Draht mit einer minimaler Weichteilkomprimierung einher. Hierüber kann die Cerclage mithilfe der Drainage eingezogen werden und umschlingt die Frakturfragmente des Humerus. Dank dieses Manövers über den Umweg der Redon-Drainage gelingt das Einbringen der Cerclage über den limitiert invasiven Zugang unter minimalem Ablösen der Weichteile vom Humerus. Die Integrität des N. radialis wird durch eine digitale Kontrolle geprüft. Durch axialen Zug und Rotation des distalen Fragmentes wird die Fraktur unter simultanem Anziehen der Cerclage anatomisch reponiert. Bevor die Cerclage zunächst manuell und anschließend mit dem Zuggerät angezogen wird, erfolgt eine weitere digitale Kontrolle des Nerven und der weiteren Leitungsbahnen. Bei Notwendigkeit weiterer Cerclagen wird das beschriebene Manöver entsprechend wiederholt (■ **Abb. 2**).

Es folgt nun nach präliminärer Stabilisierung die antegrade Verriegelungsnagelung des Humerus über einen Delataspit-Zugang (■ **Abb. 3**).

Ergebnisse

Es wurden insgesamt 102 Patienten aufgrund einer Humerusschaftfraktur mit einer antegraden Nagelosteosynthese und insgesamt 193 additiven Cerclagen operativ versorgt.

Das Durchschnittsalter lag bei 69 (28 bis 93) Jahren. Es waren 41 männliche

Unfallchirurg <https://doi.org/10.1007/s00113-021-00995-8>
© Der/die Autor(en) 2021

F. von der Helm · J. Reuter · L. Adolf-Lisitano · E. Mayr · S. Förch

Kompromittierung durch additive Cerclagen. Ist der N. radialis in der operativen Versorgung der Humerusschaftfraktur in Gefahr?

Zusammenfassung

Einleitung. Die Therapie der Humerusschaftfraktur ist vielfältig und oft problematisch. Neben der konservativen Therapie konkurrieren Marknagel- und Plattenosteosynthese miteinander; bislang existiert kein Goldstandard. Aus biomechanischen Überlegungen bieten sich für die Versorgung von Spiralfrakturen additive Cerclagen an. Die Argumente gegen deren Verwendung sind zum einen die Gefahr von Radialisläsionen, zum anderen eine mutmaßliche Störung der Fragmentdurchblutung. Ziel dieser Studie ist die Analyse sekundärer Radialisläsionen bei der Anwendung additiver, limitiert invasiver Cerclagen bei der antegraden Nagelosteosynthese von Humerusschaftfrakturen.

Methodik. In dieser retrospektiven Studie erfolgen die klinische und die neurologische Untersuchung von 102 Patienten, welche im Zeitraum von 5 Jahren bei einer Humerusschaftfraktur operativ versorgt wurden. Insgesamt wurden zur Marknagelosteosynthese 193 Cerclagen durch einen limitiert invasiven Zugang eingebracht.

Ergebnisse und Schlussfolgerung. Bei 4 Patienten (3,9%) zeigte sich eine sekundäre Radialisläsion im Rahmen der operativen Stabilisierung. Die neurophysiologische und neurosonographische Untersuchung zeigten in keinem Fall eine Kompromittierung des Nerven durch Einschlingen oder gar Durchtrennung durch die additive Cerclage. Zwei Nervenläsionen erholten sich innerhalb

von 3 bzw. 6 Monaten spontan. In den anderen 2 Fällen konnte der Verlauf aufgrund eines Exitus letalis nicht über 12 Monate dokumentiert werden.

Mit 3,9% der iatrogenen Radialisläsionen liegt die Rate an Nervenläsionen im unteren Bereich dessen, was in der Literatur für die operative Therapie von Humerusschaftfrakturen beschrieben wird (3–12%). Durch die limitiert invasive, additive Cerclage ergibt sich somit kein erhöhtes Risiko für die iatrogene Schädigung des N. radialis.

Schlüsselwörter

Humerusschaft · Cerclagen · Anterograde Nagelosteosynthese des Humerus · Primäre Radialisläsion · Sekundäre Radialisläsion

Compromising due to additive cerclages. Can surgical treatment of humeral shaft fractures cause damage to the radial nerve?

Abstract

Background. In many cases the treatment of humeral shaft fractures is challenging and despite the large diversity of available approaches, no standard treatment exists. In addition to conservative treatment, intramedullary nails and plate osteosynthesis are competing methods for healing humeral shaft fractures. Furthermore, cerclage is considered to be an additive treatment for spiral fractures; however, this also increases the risk of radial nerve neuropathy and is said to compromise the perfusion of bone fragments. The goal of this study was to investigate secondary radial nerve neuropathy using additive and limited invasive cerclages for nail osteosynthesis of humeral shaft fractures.

Methods. In the present study a total of 102 patients with humeral shaft fractures were clinically and neurologically re-examined after having been treated with nail osteosynthesis and additive cerclage via a limited invasive access over the past 5 years. In total 193 cerclages with limited invasive access were inserted during this time period.

Results and conclusion. Of the patients four (3.9%) showed a secondary radial neuropathy during operative stabilization. Neurophysiological and neurosonographic examinations revealed that this had not been caused by compromising, embedding or severance of the radial nerve due to the cerclage. Two out of these nerve lesions recovered spontaneously within 3 and 6

months, respectively. The other two cases could not be documented over a period of 12 months due to death of the patient. With 3.9% of iatrogenic radial nerve lesions the rate of nerve lesions falls into the lower range of that which has previously been described in the literature for nerve lesions due to operative treatment of humeral shaft fractures (3–12%). We thus conclude that there is no increased risk for iatrogenic injury of the radial nerve using additive and limited invasive cerclage.

Keywords

Humeral shaft · Cerclage · Anterograde nail osteosynthesis of the humerus · Primary radial nerve lesion · Secondary radial nerve lesion

und 57 weibliche Patienten. Bei 93 Patienten trat die Verletzung isoliert, bei 8 Patienten im Rahmen eines Polytraumas auf. Bei 22 Patienten war Alkohol die Sturzursache. In 53 Fällen zeigte sich die Frakturlokalisierung rechts und in 49 Fällen links.

Die operative Versorgung erfolgte nach durchschnittlich 1,34 Tagen. Bei 72 Patienten erfolgte die operative Versorgung innerhalb 24 h. Die durch-

schnittliche Schnitt-Naht-Zeit lag bei 114 (65–204) min. Der Aufenthalt im Krankenhaus betrug im Schnitt 10 (2 bis 36) Tage.

Entsprechend der Frakturklassifikation nach AO hatten 46 Patienten eine 12-A-, 51 eine 12-B- und 1 Patient eine 12-C-Fraktur. Eine periimplantäre Fraktur bestand in 4 Fällen (**Abb. 4**). Die Frakturlokalisierung fand sich in 56 Fällen im mittleren und in 32 Fällen im proximalen

Drittel des Humerusschaftes. In 2 Fällen befand sich die Fraktur im distalen Drittel. Zwölf Frakturen lagen genau auf Höhe des Übergangs zwischen dem proximalen und dem mittleren Drittel.

Insgesamt wurden in den 102 Operationen 193 additive Draht-Cerclagen um den Humerus eingebracht. 28 Frakturen wurden mit einer Cerclage und 58 Frakturen mit 2 Cerclagen durch einen limitiert invasiven Zugang versorgt. In 15 Fäl-

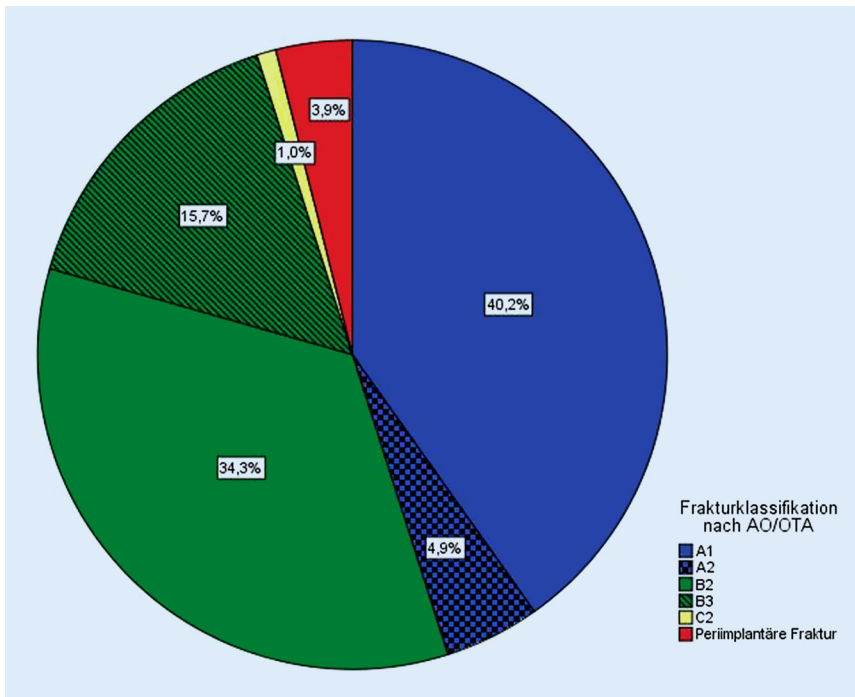


Abb. 4 ▲ Verteilung der Frakturmorphologie nach AO/OTA-Klassifikation in Prozent

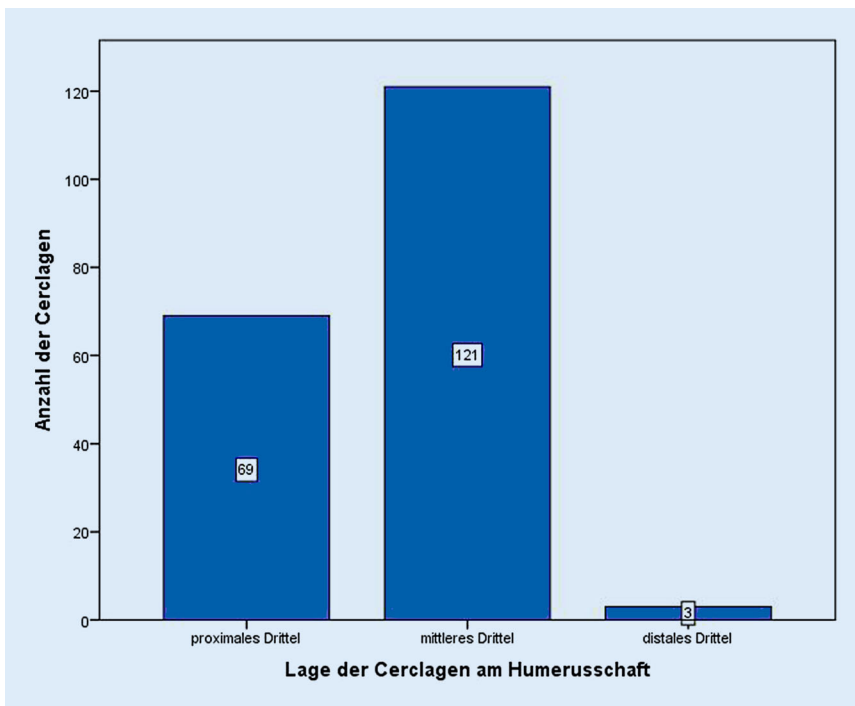


Abb. 5 ▲ Anzahl der Cerclagen in Bezug auf die Lokalisation am Humerusschaft

len wurden 3 und in 1 Fall 4 Cerclagen eingebracht. Somit zeigt sich eine durchschnittliche Versorgung durch 1,89 (1 bis 4) Cerclagen je nach Frakturmorphologie.

Die Lokalisation der Cerclagen bezogen auf die Dritteileinteilung am Humerusschaft zeigt sich am häufigsten mit 121 Cerclagen im mittleren Drittel. Im proximalen Drittel wurden 69 und im

distalen Drittel 3 Cerclagen eingebracht (Abb. 5).

In insgesamt 14 Fällen (13,7 %) wurde eine Radialisläsion diagnostiziert. Diese lagen in 10 Fällen (9,8 %) schon posttraumatisch, also bereits präoperativ vor. In 4 Fällen (3,9 %) zeigte sich die Läsion erst postoperativ (Tab. 1).

In allen Fällen konnte sowohl durch neurophysiologische als auch neurosonographische Untersuchungen eine direkte Schädigung oder ein Einschlingen des Nerven durch die Cerclagen ausgeschlossen werden. Die neurologischen Untersuchungen wiesen in allen Fällen auf einen Traktionssschaden hin. Damit ergibt sich eine Rate von 3,9 % iatrogenen Radialisläsionen, bezogen auf die Anzahl an Operationen, und von 2,1 %, bezogen auf die Anzahl von eingebrachten Cerclagen.

Diskussion

Die Therapie der Humerusschaftfraktur ist vielfältig und umstritten. Auch wenn sie derzeit nicht im Fokus der wissenschaftlichen Diskussion zu stehen scheint, macht es in unseren Augen Sinn, sich aufgrund der zu erwartenden demografisch begründeten Fallzahlsteigerungen mit dem Thema zu beschäftigen und eine Standardisierung zu entwickeln. Eine der häufigsten Komplikation ist eine Läsion des N. radialis [11]. Diese kann zu schweren funktionellen Ausfällen führen und den Patienten dauerhaft invalidisieren. Ein wesentlicher Faktor für die Entstehung ist der anatomische Verlauf des Nerven mit Durchtritt durch das Septum intermusculare laterale als weichteiliger Fixationspunkt am mittleren Oberarmdrittel.

In der aktuellen Literatur gibt es über die beste Operationstechnik keinen Konsens [3, 11]. Derzeit läuft die Diskussion hauptsächlich zwischen zwei Antipoden, einerseits der offenen Reposition und internen Fixation (ORIF) und andererseits der minimal-invasiven Marknagelung (IMN), seltener auch minimal-invasiv eingeschobener Plattenosteosynthese. Die Vorteile der ORIF sind die anatomische Reposition, die Darstellung des Nerven und die direkte interfragmentäre Kompression. Nachteilig ist die

Tab. 1 Frakturmorphologie, Anzahl und Lage der Cerclagen bei primären und sekundären Radialisläsionen

		Primäre Radialisläsion	Sekundäre Radialisläsion
AO/OTA Klassifikation	A1	3	2
	A2	2	–
	B2	4	1
	B3	1	1
Anzahl der Cerclagen	1	2	–
	2	6	2
	3	2	1
	4	–	1
Lage der Cerclagen am Humerusschaft	Mittleres Drittel	9	3
	Mehrere Drittel	1	1

AO/OTA Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen/Orthopaedic Trauma Association

aufwendige chirurgische Präparation mit konsekutivem Weichteiltrauma und der Operationsdauer [7]. Die IMN beschreibt eine geringere Weichteilverletzung und bessere ästhetische Narben [3, 12]. Als Nachteile werden beim antegraden Nagel das Schulter-Impingement bei Materialüberstand und, daraus resultierend, die frühzeitig erforderliche Metallentfernung beschrieben [13]. In früheren Studien wird über eine postoperative Bursitis und Verletzungen der Rotatorenmanschette berichtet. Aufgrund der inzwischen verbesserten Operationstechnik zeigen sich alle diese Komplikationen deutlich seltener [7, 14]. Bezüglich eines komplikativen Verlaufs mit iatrogenen Nervenläsionen gibt es keine signifikanten Unterschiede [3, 7, 11, 13, 15, 16].

Die zumeist vorgebrachten Argumente gegen die Verwendung von Cerclagen sind die mögliche nachhaltige Kompromittierung der ossären Durchblutung und, damit verbunden, die Störung der Frakturheilung [17, 18]. Experimentelle Studien zur Kompromittierung der ossären Blutversorgung in der Fraktursituation existieren nicht. Am unverletzten Knochen konnte nur in einer Studie eine direkt postoperative Reduktion der Durchblutung nachgewiesen werden. Alle anderen Studien am unverletzten, osteotomierten oder im Wachstum befindlichen Knochen zeigten keine Beeinträchtigung der Blutversorgung, der Knochenheilung oder des Knochenwachstums durch Cerclagen [19].

Ein anderes Argument ist, dass die Cerclagen bereits nach kurzer Zeit aus-

lockern und damit keine absolute Stabilität gewährleisten können. Dieser Effekt ist sicherlich richtig, spricht aber nicht zwingend gegen die Verwendung einer Cerclage als additives Vorgehen in Kombination mit einer relativ stabilen Osteosynthese wie einer Marknagelung oder einer Überbrückungsplatte. Wie Sandrieser und Förch in einer biomechanischen Studie [9] zeigen konnten, führt diese additive Verwendung einer Cerclage bei einer Überbrückungsplattenosteosynthese an der Tibia experimentell zu einer signifikanten Steigerung der Stabilität, sodass diese dem von Claes et al. als für die Frakturheilung optimal angesehenen Bereich nahekommt [20]. Durch diese zusätzliche Stabilität ist auch ein positiver Einfluss der Cerclage auf die Knochenheilung denkbar, und es scheint also durchaus legitim, sich darüber Gedanken zu machen, in welchen Bereichen eine additive Cerclage sinnvoll erscheint. Erste positive Ergebnisse dazu, insbesondere zur Reduzierung der Pseudarthrose rate, liegen aus einer laufenden Studie vor.

Für den Einsatz am Humerus ist damit im Speziellen die Frage zu klären, ob mit einer additiven Cerclage das Risiko einer iatrogenen Radialisläsion steigt. In der vorliegenden deskriptiven Studie wird eine iatrogene Läsion des Nerven im Zusammenhang mit additiven Cerclagen in 4 Fällen beschrieben. Eine Vergleichsgruppe existiert nicht. Aufgrund der Fallzahl ist ein Vergleich mit der Literatur jedoch legitim. Schwab et al. berichteten von insgesamt 6% (9 von 151 Fällen) sekundärer, iatrogenen Läsionen

nach Versorgung mit ORIF und IMN ohne Cerclagen [16]. In einer anderen Arbeit beschreiben Esmailiejah et al. nach konventioneller ORIF 4 von 33 (12%) und nach minimal-invasiver Plattenosteosynthese (MIPO) eine von 32 (3%) sekundäre Radialisläsionen [8]. Insgesamt wird in der Literatur, unabhängig von der Art der operativen Therapie (ORIF, MIPO, IMN), eine höhere Anzahl an sekundären Nervenschädigungen als in der vorliegenden Studie berichtet [6, 8, 15, 16, 21, 22]. Die hohe spontane vollständige Wiederherstellung der Nervenfunktion bei unseren Fällen korreliert dabei ebenfalls mit den Literaturdaten [11, 16] und ist ein weiterer Hinweis darauf, dass das hier beschriebene Vorgehen bei sorgfältiger Anwendung nicht den befürchteten Effekt für den Nerven hat. Die Operationsdauer mit einer durchschnittlichen Schnitt-Naht-Zeit von 114 (43–215) min zeigte im Literaturvergleich keine Auffälligkeiten und ist durch die Versorgung mit additiven Cerclagen nicht wesentlich verlängert [8]. Die neurologischen Schäden sind somit mutmaßlich der Traktion im Rahmen der Lagerung zuzuschreiben. Selbst wenn man dies außer Acht lässt und alle Schäden den Cerclagen zuschreibt, ergäbe sich eine Läsionsrate mit 2,1%, welche immer noch niedriger ist, als für andere Operationsverfahren beschrieben.

Schlussfolgerung

Insbesondere vor dem Hintergrund, dass in keinem einzigen Fall der von uns untersuchten Patienten neurophysiologisch oder neurosonographisch eine direkte Schädigung oder ein Einschlingen des Nerven durch die Cerclagen nachgewiesen werden konnte und die Gesamtrate an Radialisläsionen, bezogen auf die Anzahl der Frakturversorgungen, von 3,9% im unteren Bereich der Literaturangaben liegt, scheint der Einsatz einer additiven, limitiert invasiven Cerclage bei der Versorgung von Humerusschaftfrakturen hinsichtlich der gefürchteten neurologischen Komplikationen keinesfalls obsolet zu sein. Bezieht man die nachgewiesenen postoperativen Radialisläsionen der vorliegenden Untersuchung auf die Anzahl der eingebrachten Cerclagen, ergibt sich

eine Rate von 2,1%. Ob sich die von uns erwarteten positiven Auswirkungen auf Frakturheilung, Revisionsrate und Rückführung der Patienten zum prätraumatischen Aktivitätslevel einstellen, ist Ziel einer weiteren in unserem Haus derzeit noch laufenden Untersuchung.

Fazit für die Praxis

- Bei Humerusschaftfrakturen mit Spiral- oder Keilkomponenten sind Marknagelosteosynthesen mit additiven Cerclagen eine sichere Möglichkeit der operativen Versorgung. Komplikationen wie Nervenläsionen treten nicht vermehrt auf.
- Grundlegend für den Erfolg des Verfahrens ist das zielgenaue und gewebsschonende Einbringen der Cerclage vor der Implantation des Marknagels.

Korrespondenzadresse



F. von der Helm
Klinik für Unfallchirurgie,
Orthopädie, Plastische
und Handchirurgie,
Universitätsklinikum
Augsburg
Stenglinstr. 2, 86156 Augsburg,
Deutschland
franziska.vonderhelm@
uk-augsburg.de

Funding. Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. F. v. d. Helm, J. Reuter, L. Adolph-Lisitano, E. Mayr und S. Förch geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Diese retrospektive Studie erfolgte nach Konsultation der zuständigen Ethikkommission und im Einklang mit nationalem Recht.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz

beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Ekholm R et al (2006) Fractures of the shaft of the humerus. An epidemiological study of 401 fractures. *J Bone Joint Surg Br* 88(11):1469–1473
2. Biber R, Bail HJ, Gesslein M (2018) Humeral shaft fractures. *Unfallchirurg* 121(9):747–758
3. Goncalves FF et al (2018) Evaluation of the surgical treatment of humeral shaft fractures and comparison between surgical fixation methods. *Rev Bras Ortop* 53(2):136–141
4. Clement ND (2015) Management of humeral shaft fractures; non-operative versus operative. *Arch Trauma Res* 4(2):e28013
5. Schoch BS et al (2017) Humeral shaft fractures: national trends in management. *J Orthop Traumatol* 18(3):259–263
6. Ricci FP et al (2015) Radial nerve injury associated with humeral shaft fracture: a retrospective study. *Acta ortop bras* 23(1):19–21
7. Bisaccia M et al (2017) Comparison of plate, nail and external fixation in the management of diaphyseal fractures of the humerus. *Med Arch* 71(2):97–102
8. Esmailieh AA et al (2015) Treatment of humeral shaft fractures: minimally invasive plate osteosynthesis versus open reduction and internal fixation. *Trauma Mon* 20(3):e26271
9. Sandriesser S et al (2020) Supplemental cerclage wiring in angle stable plate fixation of distal tibial spiral fractures enables immediate post-operative full weight-bearing: a biomechanical analysis. *Eur J Trauma Emerg Surg*. <https://doi.org/10.1007/s00068-020-01503-0>
10. Meinberg EG et al (2018) Fracture and dislocation classification compendium-2018. *J Orthop Trauma* 32(Suppl 1):S1–S170
11. Ostermann RC et al (2019) Fractures of the humeral shaft with primary radial nerve palsy: do injury mechanism, fracture type, or treatment influence nerve recovery? *J Clin Med* 8(11). <https://doi.org/10.3390/jcm8111969>
12. Watson JT, Sanders RW (2017) Controlled compression nailing for at risk humeral shaft fractures. *J Orthop Trauma* 31(Suppl 6):S25–S28
13. Kurup H, Hossain M, Andrew JG (2011) Dynamic compression plating versus locked intramedullary nailing for humeral shaft fractures in adults. *Cochrane Database Syst Rev*. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005959.pub2>
14. Robinson CM et al (1992) Locked nailing of humeral shaft fractures. Experience in Edinburgh over a two-year period. *J Bone Joint Surg Br* 74(4):558–562
15. Liu GY, Zhang CY, Wu HW (2012) Comparison of initial nonoperative and operative management of radial nerve palsy associated with acute humeral shaft fractures. *Orthopedics* 35(8):702–708
16. Schwab TR et al (2018) Radial nerve palsy in humeral shaft fractures with internal fixation: analysis of management and outcome. *Eur J Trauma Emerg Surg* 44(2):235–243
17. Karakoyun O et al (2016) Effect of cable cerclage on regional blood circulation in rabbits: a scintigraphic study. *J Orthop Surg* 24(3):367–369
18. van Steijn MJ, Verhaar JA (1997) Osteonecrosis caused by percutaneous cerclage wiring of a tibial fracture: case report. *J Trauma* 43(3):521–522
19. Förch S et al (2020) Impairment of the blood supply by cerclages: myth or reality? : An overview of the experimental study situation. *Unfallchirurg*. <https://doi.org/10.1007/s00113-020-00847-x>
20. Claes L (2017) Mechanobiology of fracture healing. *Unfallchirurg* 120(1):13
21. Korompilias AV et al (2013) Approach to radial nerve palsy caused by humerus shaft fracture: is primary exploration necessary? *Injury* 44(3):323–326
22. Bumbasirevic M et al (2010) The management of humeral shaft fractures with associated radial nerve palsy: a review of 117 cases. *Arch Orthop Trauma Surg* 130(4):519–522



New ways of treatment of fractures of the humeral shaft: does the combination of intramedullary nail osteosynthesis and cerclage improve the healing process?

Franziska von der Helm¹ · Annabel Fenwick¹ · Jan Reuter¹ · Leonard Adolf-Lisitano¹ · Edgar Mayr¹ · Stefan Förch¹

Received: 28 April 2021 / Accepted: 25 October 2021
© The Author(s) 2021

Abstract

Introduction The humeral shaft fracture is a rare fracture of the long bones with various treatment options. Dreaded complications such as lesions of the radial nerve or non-unions make the decision for what kind of therapy option more difficult. Biomechanically the upper arm is mostly exposed to rotational forces, which affect intramedullary nail osteosynthesis. Additive cerclage may compensate for these in spiral fractures. The aim of this study is to investigate what effect a combination of intramedullary nail osteosynthesis and limited invasive cerclage has on the rate of healing. In addition, this study addresses the question if complications arise as a result of cerclage.

Methods In this retrospective study, 109 patients were evaluated, who, during a period of 6 years, underwent operative treatment of a humerus shaft fracture with a combination of intramedullary nail osteosynthesis and additive cerclage. The primary end point was to establish the rate of healing. A secondary end point was to evaluate complications such as infections and damage to the nerve. This was followed by an examination of patient files and X-ray images and a statistical analysis with SPSS.

Results and conclusion The healing process shows a non-union rate of 2.6%, and complications such as secondary radial nerve lesions of 4.6%. The antegrade intramedullary nail osteosynthesis with limited invasive, additive cerclage reduces the risk of non-union and does not lead to an increased risk of iatrogenic damage to the radial nerve. Wound healing was not impaired and there were no infections through the cerclage in our patient cohort.

Keywords Humeral shaft fracture · Cerclage · Antegrade intramedullary nail osteosynthesis of the humerus · Lesion of the radial nerve · Non-union

Introduction

The fracture of the humeral shaft is a rare fracture with a frequency of 1–3% of all fractures and nearly 20% of all humeral fractures [1, 2]. Apart from high energy trauma such as falls from great height and traffic accidents also low energy trauma such as falls from stumbling by elderly people is a common accident mechanism [3]. The therapy of the humeral shaft fracture is manifold and controversial as a result of its anatomic relationship to the radial nerve and

because of the high likeliness to develop a non-union [4, 5]. Previously it belonged to the domain of conservative treatment with immobilization in a brace according to Sarmiento et al. [6]. In the operative treatment intramedullary nailing and plate osteosynthesis are increasingly in competition with each other and allow a load free, early functional postoperative treatment [2, 7–9]. Osteoporotic fractures in elderly people often lead to delayed healing of the fracture or even to non-union and implant failure and are linked to a considerable morbidity and a longer convalescence [5]. Biomechanically the osteosynthesis at the upper extremity is above all affected by rotational forces. Intramedullary nail osteosynthesis are particularly affected by this. Additive cerclage compensate rotational forces if anatomically reduced, as could be shown in an experimental study of a tibia model with plate osteosynthesis together with additive cerclage [10]. Therefore, from a biomechanical point of view

✉ Franziska von der Helm
franziska.vonderhelm@uk-augsburg.de

¹ Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie, Plastische und Handchirurgie, University Hospital of Augsburg, Augsburg, Germany

an additive cerclage especially in intramedullary nailing on the humeral shaft seems sensible.

The arguments against their use in upper arm fractures are on one hand the risk of iatrogenic damage to the radial nerve, and on the other hand, a presumed impairment of blood circulation of the fragment [11]. The aim of this retrospective study is the analysis of the healing process and complications such as radial nerve damage when additive, limited invasive cerclage in antegrade nail osteosynthesis of humeral shaft fractures are used.

Methods

Surgical technique

The antegrade intramedullary nail osteosynthesis (Locking Blade Nail (LBN), Marquardt Medizintechnik GmbH) with additive, limited invasive wire cerclage (DePuy Synthes, Johnson & Johnson Medical GmbH) is performed routinely in Beach-Chair-Position [12]. The height of the planned cerclage is defined radiographically and followed by an incision of 6–8 cm on the lateral side of the upper arm. After incising the fascia the muscles are carefully pushed of the humerus with a raspatory. A rider followed by a Redon drain (B.Braun, Redon Suction Drain, U2110800, CH08) are inserted. It is grasped with an overholt clamp and retrieved on the lateral side of the wound. The cerclage (DePuy Synthes, Cable System, REF 298.801.01, \varnothing 1.7 mm) is inserted into the Redon drainage and is pulled through wrapping itself around the fracture fragments of the humerus. The

integrity of the radial nerve is checked manually. Axial traction and rotation of the distal fragment is used to reduce the fracture anatomically with simultaneous tightening of the cerclage. If further cerclages are required, the described procedure is repeated accordingly. Preliminary stabilization is followed by antegrade intramedullary nailing of the humerus via a delta split approach using the standard technique. Figures 1 and 2 show examples of the described surgical treatment.

For retrospective analysis, all patients were included who, within a period of 6 years (January 2015–December 2020), were treated operatively for a humeral shaft fracture as described above. Criteria for inclusion were age > 18 years, spiral and wedge fractures, which were treated operatively. Criteria for exclusion were pathological fractures, multiple injuries of the ipsilateral extremity in polytraumatized patients, horizontal fractures ($< 30^\circ$) (AO 12-A3), comminuted fractures (AO 12-C3) and fractures where the distal upper arm was also affected as these are not suitable for stabilization with additive cerclage. Via the hospital data system, the following data were established: age, gender, ASA score, accompanying illnesses and length of hospital stay. The secondary diagnosis of osteoporosis was recorded as part of the geriatric assessment. The accident mechanism was analysed. High-energy traumas are injuries that affect the body surface with high kinetic energy such as traffic accidents and falls from great heights. Low energy trauma was defined as a fall from a standing position or from a low height of less than 1 m. From the operation reports, the intraoperative and postoperative complications as well as blood loss were

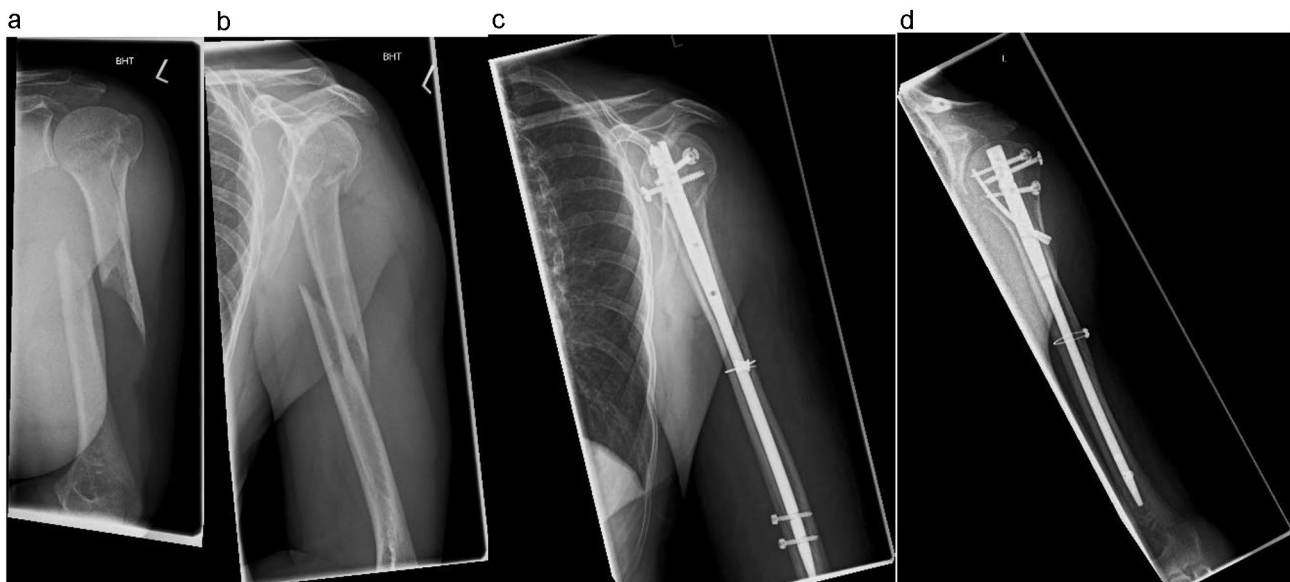


Fig. 1 Pre- and post-operative imaging of a humeral shaft fracture AO 12 A1 left. **a, b** Pre-operative imaging in two planes (ap/lateral). **c, d** Post-operative imaging in two planes (ap/lateral)

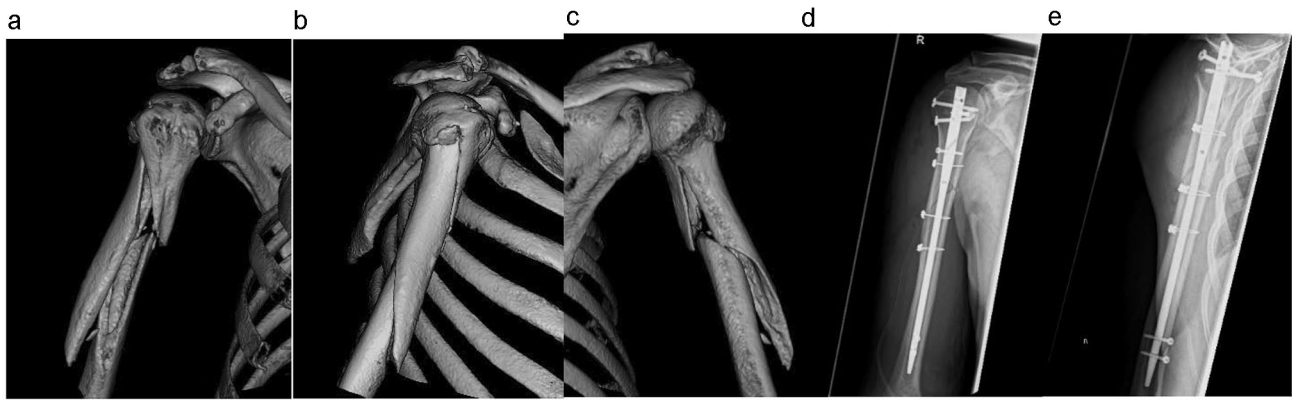


Fig. 2 A humeral shaft fracture AO 12 B2 right. **a–c** Pre-operative imaging (computed tomographic 3D reconstruction) and **d, e** post-operative imaging in two planes (ap/lateral)

recorded in addition to the side, duration of the operation and soft tissue damage.

With the help of the preoperative radiographs the fracture morphology according to AO/OTA was classified [13]. The number of cerclages was determined preoperatively after analysis of the fracture morphology and intraoperatively by the respective surgeon. The aim is to achieve anatomical reduction and sufficient rotational stability with as few cerclages as possible.

All complications were recorded and evaluated. Each patient with a complicative course of treatment was contacted and re-examined. In case of a primary or secondary damage to the radial nerve, whilst still in postoperative primary hospital care, a neurological examination including neuro sonography and measuring of the nerve conduction velocity was performed. Necessary further revision surgeries were recorded as well as late residues after diagnosed injury of the radial nerve.

To document the healing process, each patient was contacted. Correct bony healing was only counted if a radiograph was available and the patient was symptom-free.

The analysis and graphical representation was carried out using IBM SPSS Statistics version 27.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

A positive ethics committee vote (file no. 2019-36) was acquired.

Results

Altogether 109 patients over a period of 6 years (January 2015–December 2020) were included and underwent a follow-up examination in this study. The cohort consisted of 45 male and 64 female patients. The average age of female patients was 74 years (37–95) and thus higher than that of male patients with 64 years (28–89). Similarly, there were

Table 1 Co-morbidities of the investigated patients

Gender	Men (n=45) (%)	Female (n=64) (%)	Total (n=109) (%)
Osteoporosis	28.9	68.8	52.3
Diabetes	13.3	14.1	13.8
Renal dysfunction	37.8	78.1	61.5
Adipositas	20	14.1	16.5
Alcohol abuse	53.3	7.8	26.6
Smoking	48.9	10.9	25.7
Direct oral anticoagulants	37.8	39.1	39.5
Multi medication	28.9	58.8	49.5

Table 2 Patient condition pre-operatively according to ASA (American Society of Anesthesiologists)

ASA 1	Healthy patient	8.3%
ASA 2	Patient with mild diseases	43.1%
ASA 3	Patient with severe diseases	45.9%
ASA 4	Severe disease life threatening	3%

more secondary illnesses such as osteoporosis and renal dysfunction in the female patient group. Alcohol consumption was higher amongst male patients (Tables 1, 2).

In 23 cases (21.1%), a high energy trauma and in 86 cases (78.9%) a low energy trauma was the cause of accident. In 101 patients this was an isolated injury, whereas in 8 patients the injury occurred within a polytrauma (Table 3). In 55 cases the fracture was localized on the left side and in 54 cases on the right hand side.

The evaluation of the pre-operative radiological images shows, in line with the fracture classification according to AO/OTA, fractures of type 12-A in 52 patients, of type 12-B

Table 3 Accident mechanisms

High energy trauma (<i>n</i> = 23)		Low energy trauma (<i>n</i> = 86)	
Traffic accidents (4/23)	17.4%	Domestic falls (53/86)	61.6%
Fall from bicycle/sports (8/23)	34.8%	(Under alcohol 8/53)	
Fall from building scaffolding (5/23)	21.7%	Fall in the street (33/86)	38.4%
Fall on stairs (6/23)	26.1%	(Under alcohol 17/33)	

in 51 patients and of type 12-C in 1 patient. Five patients had a periosteosynthetic fracture (Fig. 3).

The operation took place on average 1.62 days after hospital admission. Seventy-six operations took place within 24 h. The average time of surgical procedure was 115 min (51–204 min) and the intraoperative loss of blood averaged 265 ml (50–700 ml). Here there was no difference between the patients on antiplatelet medication like aspirin (ASS), direct oral anticoagulants (DOACs) or warfarin. The average hospital length of stay was 9 days for mono injuries and 15 days (2–36) for polytraumatized patients. Altogether 195 additive wire cerclage were used around the humerus (Table 4).

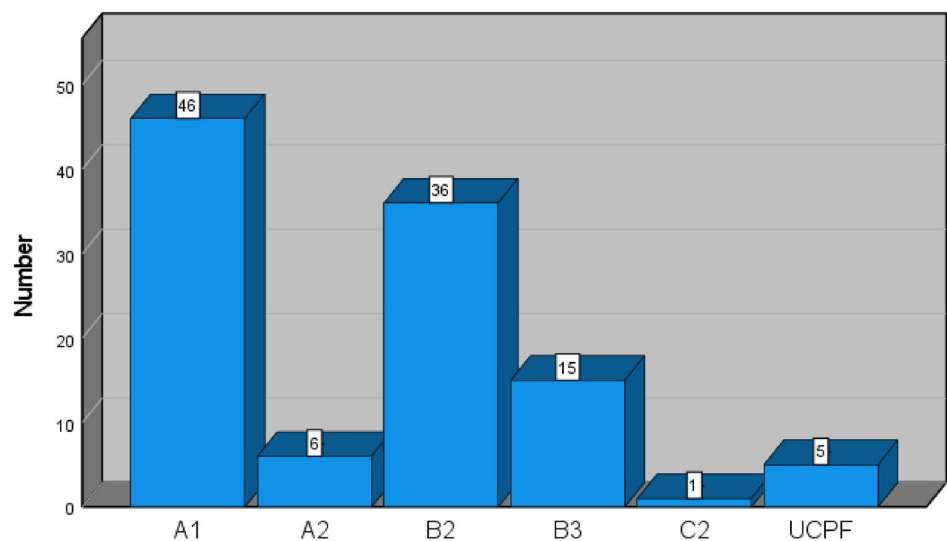
The healing process in 78 patients could be documented with a radiograph (Table 5, Fig. 4). After 3–12 months, 75 patients showed a complete bony consolidation. Two

Table 5 Healing process with radiologically documented bony healing

Bony healing	Total
Total	75
3 months	18
6 months	13
9 months	5
12 months	39

patients developed a non-union. In one case, no revision surgery was carried out on the grounds of age, low expectation and underlying medical pre-conditions. In another case the implant was removed including the cerclage, followed by filling of the defect with spongiosa from the iliac crest and plate osteosynthesis (3.5 LCP).

In one case, revision of a hematoma became necessary. This, however, was not in the region of the cerclage, but was linked to an overdose of warfarin. One patient showed a complicated course. Initially, a secondary damage to the radial nerve manifested itself. Neurophysiological damage from the cerclage could be excluded. Subsequently, the patient suffered a periosteosynthetic fracture distally to the inlying nail after a further fall, which was treated with a double plate osteosynthesis. This led to a postoperative infection, which made several revision surgeries and a Spacer-implantation necessary.

Fig. 3 Distribution of fractures by AO classification; periosteosynthetic fracture [unified classification system for periprosthetic fractures (UCPF)]**Table 4** Number of used cerclage

	Number of cerclages per patient	Number of operations
Cerclages (DePuy Synthes, Johnson & Johnson Medical GmbH)	1	32
	2	59
	3	17
	4	1

Fig. 4 Healing process of the B2 fracture from Fig. 2. **a** The fracture gap is still clearly visible in the radiological X-ray check 6 weeks after surgical treatment. **b** Callus formation begins 12 weeks after operation. **c** Healing 6 months after the operation

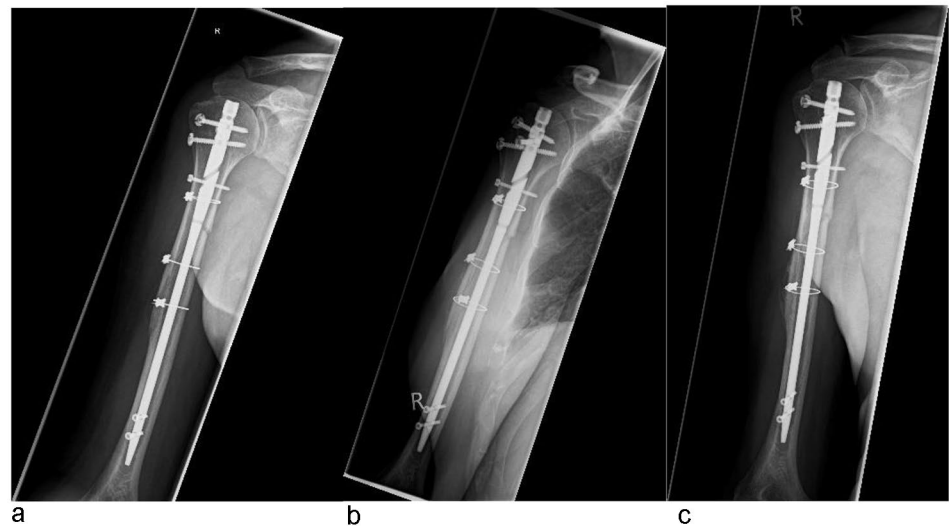


Table 6 Overview of post-operative complications

Complication	Total
Non-union	2
Infection	1
Haematoma	1
Primary radial nerve damage	11
Secondary radial nerve damage	5

There were 16 cases of a radial nerve damage, of which 11 lesions already existed preoperatively, that is, due to trauma. Intraoperatively, the nerve was visualised and found to be intact. In five cases (4.6%), the damage only developed postoperatively.

Neurophysiological and neuro ultrasound examination could exclude in all cases direct damage through the cerclage and indicated traction damage. Further four revision surgeries were carried out if symptoms persisted to display the nerve. Here, it became evident that there was no macroscopic damage to the nerve intraoperatively in any case. In one case, severe tissue scarring had compressed the nerve, the intraoperative neuro stimulation carried out achieved a good motor response (Table 6).

Discussion

In the current literature, there is no specific algorithm for a decision on treatment of humeral shaft fractures, as there are many factors that must be considered for deciding. This is made even more difficult by the comparatively low case number. It is nevertheless important to consider of a standard approach.

One of the important points for discussion about an optimal decision for treatment is the improvement of non-union rates and the minimization of complications like damage to the radial nerve, as these situations lead to functional failures after a long course of treatment. As already mentioned in the introduction, the treatment of humeral shaft fractures was for a long time the domain of conservative therapy. With the development of modern implants and surgical procedures, but also due to changing patient demands, surgical treatment is becoming increasingly important. To enable early functional treatment, we also perform osteosynthesis for simple shaft fractures that are in principle also suitable for conservative therapy, if this corresponds to the patient's wishes and requirements.

In our study, we could document the progress of healing in 78 patients (71.6%). Here we saw two cases of non-union (2.6%). Literature generally reports a non-union rate between 8 and 20% of the humeral shaft [14–17]. Blum et al. in their study of follow-up-examinations of humeral shaft fractures report with a similar number of cases ($n = 75$) show 12 cases of non-union after operative treatment with retrograde nail osteosynthesis (UHN) [18]. In a comparative study of antegrade nailing ($n = 25$) and plate osteosynthesis ($n = 25$) Wali et al. described two cases of non-union in each group [19].

Factors which favor non-union are, besides a high body-mass-index, smoking, alcoholism, osteoporosis, renal dysfunction and multiple medication, also fracture morphology and operative treatment [20, 21]. An experimental study by rats was able to show that episodic consumption of alcohol negatively influences the bio mechanical properties of callus [22]. The patient cohort, as summarized in Tables 1 and 2, shows many of the mentioned risk factors, which can favor non-union, but the rate of non-union is nevertheless in the lower margin of the data provided by the literature. The

operative stabilization through additive cerclage has thus a positive effect on the healing process without risking the strangulation of the fragment blood circulation [11].

The perioperative management to avoid complicative courses therefore influences the therapy decision-making and the rate of the healing process. The average time of surgical procedure of 115 min for nail osteosynthesis with additive cerclage is no longer in comparison to the average time of surgery for plate osteosynthesis or singular nail osteosynthesis [23, 24]. Also the intraoperative blood loss irrespective of anticoagulants is no higher [8, 19].

An operative hematoma revision resulted from Warfarin medication, but it was not found in the access area to the cerclage. An iatrogenic lesion of the radial nerve was observed in five cases (4.6%) in this study and is therefore lower than the secondary damage to nerves described in the literature [7, 25]. The high spontaneous complete restoration of the nerve function correlates here with the data provided by the literature [25] and is a further indication that a careful use of limited invasive additive cerclage does not compromise the nerve.

In the literature, there is no consensus of the best surgical technique. The advantages of plate osteosynthesis with anatomic reposition, exposure of the nerve and direct interfragmentary compression are offset by the advantages of nail osteosyntheses, such as minor damage to the soft tissue and better aesthetical scarring as well as a shorter time of surgery. The comparison of postoperative infections, secondary paresis of the radial nerve, implant failure, delayed union and non-union have shown no significant differences in studies so far [3, 8, 9, 19]. Against this, one can presume that the surgical procedure described here, with a rate of 2.6% of fracture healing impairment without an increased rate of radial nerve damage, is superior compared to the surgical procedures without additive cerclage. But at the same time in no case could a connection be found between radial nerve damage and cerclage.

There are limitations to this study. As the data were collected retrospectively, there is no standardized radiological protocol. Therefore, only the observation on bony healing can be made, but none on the time frame until bony healing was achieved. In 96% of patients, a bony consolidation could be radiologically documented in the follow-ups.

A comparative group treated by different methods would be desirable. In our clinic, however, all humerus shaft fractures suitable for treatment with cerclage, were treated this way. The only exceptions are fractures classified by AO as 12-A3 and C3. For this reason, no comparative group could be formed from the clinic's internal data. On the basis of similar case numbers in other studies, a comparison with the literature seems legitimate. These demonstrate that treatment with additive cerclage has lower complication rates than other surgical procedures.

In the primary end point, 21 patients (19.3%) were lost to follow-ups. But even so there is no reason to assume a complicative course. The operative treatment with LBN is not widespread regionally, and as the only trauma center Level I within a wide area, revisions would presumably take place here. The secondary final point also shows a comparatively low number of infections and damage to the nerve. In an earlier study, we could already prove that fracture treatment with cerclage does not lead to direct damage of the radial nerve. There is far more indication of damage to the nerve by intraoperative traction.

When considering all factors, the treatment of humerus shaft fractures with intramedullary nail osteosynthesis and additive cerclage is a valuable surgical method, which, after careful analysis of fracture morphology, is highly successful.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Declarations

Conflict of interest Franziska von der Helm, Annabel Fenwick, Jan Reuter, Leonard Adolf-Lisitano, Edgar Mayr, and Stefan Förch declare that they have no conflict of interest.

Ethical approval All human studies have been approved by the appropriate ethics committee and have therefore been performed in accordance with the ethical standards laid down in the 1964 Declaration of Helsinki and its later amendments.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

1. Ekholm R, et al. Fractures of the shaft of the humerus. An epidemiological study of 401 fractures. *J Bone Jt Surg Br.* 2006;88(11):1469–73.
2. Hosseini Khameneh SM, et al. Humeral shaft fracture: a randomized controlled trial of nonoperative versus operative management (plate fixation). *Orthop Res Rev.* 2019;11:141–7.
3. Goncalves FF, et al. Evaluation of the surgical treatment of humeral shaft fractures and comparison between surgical fixation methods. *Rev Bras Ortop.* 2018;53(2):136–41.
4. Campochiaro G, et al. Humeral shaft non-union after intramedullary nailing. *Musculoskelet Surg.* 2017;101(2):189–93.
5. Toro G, et al. Humeral shaft non-union in the elderly: results with cortical graft plus stem cells. *Injury.* 2019;50(Suppl 2):S75–9.

6. Sarmiento A, et al. Functional bracing of fractures of the shaft of the humerus. *J Bone Jt Surg Am.* 1977;59(5):596–601.
7. Esmailieh AA, et al. Treatment of humeral shaft fractures: minimally invasive plate osteosynthesis versus open reduction and internal fixation. *Trauma Mon.* 2015;20(3):e26271.
8. Fan Y, et al. Management of humeral shaft fractures with intramedullary interlocking nail versus locking compression plate. *Orthopedics.* 2015;38(9):e825–9.
9. Ouyang H, et al. Plate versus intramedullary nail fixation in the treatment of humeral shaft fractures: an updated meta-analysis. *J Shoulder Elb Surg.* 2013;22(3):387–95.
10. Sandriesser S, et al. Supplemental cerclage wiring in angle stable plate fixation of distal tibial spiral fractures enables immediate post-operative full weight-bearing: a biomechanical analysis. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00068-020-01503-0>. Epub ahead of print. PMID: 32989509.
11. Förch S, et al. Impairment of the blood supply by cerclages: myth or reality?: an overview of the experimental study situation. *Unfallchirurg.* 2020;124(3):231–240. German. <https://doi.org/10.1007/s00113-020-00847-x>. PMID: 32813053; PMCID: PMC7921058.
12. von der Helm F, et al. Compromising due to additive cerclages: can surgical treatment of humeral shaft fractures cause damage to the radial nerve?. *Unfallchirurg.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s00113-021-00995-8>. Epub ahead of print. PMID: 33763738.
13. Meinberg EG, et al. Fracture and dislocation classification compendium-2018. *J Orthop Trauma.* 2018;32(Suppl 1):S1–170.
14. Ali E, et al. Nonoperative treatment of humeral shaft fractures revisited. *J Shoulder Elb Surg.* 2015;24(2):210–4.
15. Denard Jr A, et al. Outcome of nonoperative vs operative treatment of humeral shaft fractures: a retrospective study of 213 patients. *Orthopedics.* 2010;33(8). <https://doi.org/10.3928/01477447-20100625-16>. PMID: 20704103.
16. Changulani M, Jain UK, Keswani T. Comparison of the use of the humerus intramedullary nail and dynamic compression plate for the management of diaphyseal fractures of the humerus. A randomised controlled study. *Int Orthop.* 2006;31(3):391–5.
17. Bisaccia M, et al. Comparison of plate, nail and external fixation in the management of diaphyseal fractures of the humerus. *Med Arch.* 2017;71(2):97–102.
18. Blum J, et al. Retrograde nailing of humerus shaft fractures with the unreamed humerus nail. An international multicenter study. *Unfallchirurg.* 1998;101(5):342–52.
19. Wali MG, et al. Internal fixation of shaft humerus fractures by dynamic compression plate or interlocking intramedullary nail: a prospective, randomised study. *Strateg Trauma Limb Reconstr.* 2014;9(3):133–40.
20. Zura R, et al. Epidemiology of fracture nonunion in 18 human bones. *JAMA Surg.* 2016;151(11):e162775.
21. Maresca A, et al. Why a surgically treated humeral shaft fracture became a nonunion: review of 11 years in two trauma centers. *Musculoskelet Surg.* 2017;101(Suppl 2):105–12.
22. Natoli RM, et al. Alcohol exposure decreases osteopontin expression during fracture healing and osteopontin-mediated mesenchymal stem cell migration in vitro. *J Orthop Surg Res.* 2018;13(1):101. <https://doi.org/10.1186/s13018-018-0800-7>. PMID:29699560; PMCID: PMC5921778.
23. Putnam JG, et al. Early post-operative outcomes of plate versus nail fixation for humeral shaft fractures. *Injury.* 2019;50(8):1460–3.
24. Yiğit Ş. What should be the timing of surgical treatment of humeral shaft fractures? *Medicine.* 2020;99(17):e19858.
25. Schwab TR, et al. Radial nerve palsy in humeral shaft fractures with internal fixation: analysis of management and outcome. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2018;44(2):235–43.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Ein besonderer Dank richtet sich an Prof. Dr. Dr. h. c. Edgar Mayr für die Überlassung des Promotionsthemas. Seine beratende, kritische und jederzeit aufmunternde Begleitung unterstützen das Voranschreiten der Arbeit sehr.

Als Nächstes möchte ich Dr. Stefan Förch für die ausgezeichnete Betreuung bei der Umsetzung der gesamten Arbeit danken. Seine Anregungen und produktiven Gespräche haben die Arbeit entscheidend geprägt.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die Geduld, Ermutigungen und Zusprüche während der Arbeit an dieser Dissertation. Ein besonderer Dank gilt meinem lieben Mann und meiner kleinen Tochter für das Verständnis und die Rücksicht.