

Redaktion

P. Biberthaler, München
T. Gössling, Braunschweig
T. Mittlmeier, Rostock



CrossMark



Online teilnehmen

3 Punkte sammeln auf CME.SpringerMedizin.de

Teilnahmemöglichkeiten

Die Teilnahme an diesem zertifizierten Kurs ist für 12 Monate auf CME.SpringerMedizin.de möglich. Den genauen Teilnahmeschluss erfahren Sie dort.

Teilnehmen können Sie:

- als Abonnent dieser Fachzeitschrift,
- als e.Med-Abonnent.

Als Abonnent von *Der Unfallchirurg* oder *Der Orthopäde* können Sie kostenlos an CME-Kursen beider Zeitschriften teilnehmen.

Zertifizierung

Diese Fortbildungseinheit ist zertifiziert von der Ärztekammer Nordrhein gemäß Kategorie D und damit auch für andere Ärztekammern anerkennungsfähig. Es werden 3 Punkte vergeben.

Anerkennung in Österreich

Gemäß Diplom-Fortbildungs-Programm (DFP) werden die auf CME.SpringerMedizin.de erworbenen Fortbildungspunkte von der Österreichischen Ärztekammer 1:1 als fachspezifische Fortbildung angerechnet (§26(3) DFP Richtlinie).

Kontakt

Springer Medizin Kundenservice
Tel. 0800 77 80 777
E-Mail: kundenservice@springermedizin.de

CME Zertifizierte Fortbildung

C. Hierholzer^{1,4} · J. Friederichs¹ · P. Augat^{2,3} · A. Woltmann¹ · O. Trapp¹ · V. Bühren¹ · C. von Rüden^{1,2,3}

¹ Abteilung Unfallchirurgie, BG Unfallklinik Murnau, Murnau, Deutschland

² Universitätsinstitut für Biomechanik, Paracelsus Medizinische Privatuniversität, Salzburg, Österreich

³ Institut für Biomechanik, BG Unfallklinik Murnau, Murnau, Deutschland

⁴ Klinik für Traumatologie, Universitätsspital Zürich, Zürich, Schweiz

Entwicklung und Prinzipien der Verriegelungsmarknagelung

Zusammenfassung

Ziele der osteosynthetischen Frakturstabilisierung sind die anatomische Frakturposition, die korrekte Achs- und Rotationsausrichtung sowie die Gewährleistung adäquater biomechanischer und biologischer Bedingungen zur Unterstützung der knöchernen Heilung. In langen Röhrenknochen sind diese durch die intramedulläre Marknagelosteosynthese über eine langstreckige innere Schienung in der anatomischen Achse des Knochens und die Verwendung von Verriegelungsschrauben ideal zu erreichen. Die frakturferne Insertion des Marknagels schon das Gewebe im Frakturareal. Das Indikationsspektrum der Verriegelungsmarknagelung umfasst diaphysäre Frakturen langer Röhrenknochen, metaphysäre Frakturen und Rekonstruktionen einschließlich Pseudarthrosenbehandlung sowie Osteotomien und Arthrodesen der unteren Extremität. Die stetige Verbesserung der Implantate und Instrumentarien und die Einführung anatomischer Rekonstruktionsnägel optimieren Spektrum und Wirksamkeit der Marknagelosteosynthese potenziell noch weiter.

Schlüsselwörter

Frakturfixation, intramedullär · Osteosynthese · Biomechanik · Knochennägel · Knochenschrauben

Die erste dokumentierte Marknagelosteosynthese einer subtrochantären Fraktur datiert vom 09.11.1939

Die Marknagelung entsprach einem geschlossenen minimalinvasiven Behandlungsverfahren

Lernziele

Nach der Lektüre dieses Beitrags ...

- haben Sie Kenntnisse über die Entwicklung und die Prinzipien der Verriegelungsmarknagelung gewonnen.
- sind Ihnen die technischen Aspekte der Verriegelungsmarknagelung geläufig.
- können Sie beschreiben, wie die moderne Verriegelungsmarknagelung eine hohe Primärstabilität des Implantats erzielt und damit eine frühfunktionelle Nachbehandlung ermöglicht.
- sind Sie in der Lage zu erklären, warum die biomechanischen Vorteile bei Verriegelungsmarknagelung in der Möglichkeit der frühzeitigen Vollbelastbarkeit resultieren.
- können Sie aus dem gewonnenen Wissen die Empfehlung zur Anwendung der Verriegelungsmarknagelung als einen Baustein der Therapie von Frakturheilungsstörungen ableiten.

Historische Aspekte

Gerhard Küntscher (geb. 06.12.1900 in Zwickau; † 17.12.1972 in Glücksburg) gilt als der Pionier der Marknagelosteosynthese (▣ Abb. 1). Die erste von ihm dokumentierte Marknagelosteosynthese einer subtrochantären Fraktur datiert vom 09.11.1939. Ein 35-jähriger Ingenieur stürzte an diesem Tag in einer Kieler Werft in ein Trockendock. Der Patient wurde in die *Chirurgische Klinik zu Kiel* eingeliefert, und die folgenden Diagnosen wurden gestellt: linksseitige subtrochantäre Femurfraktur, Beckenfraktur, linksseitige Kalkaneusfraktur. Gerhard Küntscher vermerkte in der *Übersicht der Anamnese* [1], dass der Patient „angeblich 15–20 m“ tief hinuntergefallen, jedoch „nicht bewusstlos“ war, aber „etwas unter Alkohol stand nach dem Genuss von 2–3 Bier“. Küntscher entschloss sich, die instabile subtrochantäre Femurfraktur durch antegrade Marknagelung zu stabilisieren (▣ Abb. 2).

Die von Küntscher postulierte **gedeckte Osteosynthesetechnik** stand der zur damaligen Zeit gültigen Lehrmeinung diametral entgegen. Die Inzision sollte von der Fraktur entfernt sein, und die dynamische Fixation sollte über eine sekundäre Knochenheilung zur Bildung eines stabilen Brückenkallus führen. Die Marknagelung entsprach letztlich einem geschlossenen und somit minimalinvasiven Behandlungsverfahren. Der Operateur war mit seinem Resultat zufrieden und dokumentierte dieses mit „gutes Ergebnis“. Der Patient blieb anschließend bis zum 12.01.1940 in stationärer Behandlung. Die gesamte Krankengeschichte und der stationäre Verlauf sind in handschriftlichen Notizen auf einer DIN-A4-Seite zusammengefasst (▣ Abb. 3). Die weitere Wundheilung wurde ebenfalls dokumentiert und verlief „per primam“.

Evolution and principles of intramedullary locked nailing

Abstract

Key factors for successful osteosynthetic fracture stabilization are anatomical fracture reduction, restoration of axis and torsion alignment as well as tissue-preserving operative techniques. In long bone fractures, the use of intramedullary long bridging nailing offers ideal conditions for bone healing, as axial and rotational stability is provided by canal-filling nails and locking screws. In addition, the tissue in the fracture region is protected as the intramedullary nail insertion is distant from the fracture. The indication spectrum for modern intramedullary locked nailing includes diaphyseal fractures of long bones, metaphyseal fractures and reconstructions, as well as treatment of nonunion, osteotomy and arthrodesis of the lower extremities. Continuous improvements in nail design and instrumentation as well as the introduction of anatomical reconstruction nails will optimize the spectrum and effectiveness of intramedullary osteosynthesis even further.

Keywords

Fracture fixation, intramedullary · Osteosynthesis · Biomechanics · Bone nails · Bone screws



Abb. 1 ▲ Gerhard Küntscher bei der Durchführung einer geschlossenen Marknagelung nach Oberschenkelfraktur mit Handmarkraumböhrung und langstreckiger Verklebung (1950). (Aus [1], mit freundl. Genehmigung von ECV Editio Cantor Verlag für Medizin und Naturwissenschaften GmbH)

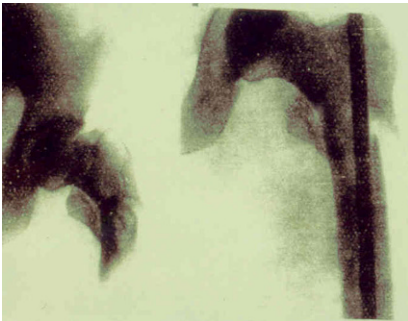


Abb. 2 ▲ Erste von Küntscher dokumentierte antegrade Marknagelung einer instabilen subtrochantären Femurfraktur am 09.11.1939 bei einem 35-jährigen Ingenieur. (Aus [1], mit freundl. Genehmigung von ECV Editio Cantor Verlag für Medizin und Naturwissenschaften GmbH)

verfahren zur operativen Stabilisierung von Frakturen langer Röhrenknochen an der unteren Extremität etabliert [5]. Volker Bühren [21] hat die Entwicklung der Marknagelosteosynthese in verschiedene **Marknagelgenerationen** eingeteilt und die wesentlichen Entwicklungsschritte benannt:

- 1. *Generation*; Küntscher-Nagel [6]: stabilisiert durch Markraumaufbohrung und Verklebung (▣ Abb. 5 und 6);
- 2. *Generation*; Klemm-Schellmann-Verriegelungsnagel [7]: stabilisiert durch Verklebung und Verriegelung (▣ Abb. 7);
- 3. *Generation*; kleinkalibriger („unaufgebohrter“) Marknagel: stabilisiert überwiegend durch Kompletterriegelung (▣ Abb. 8);
- 4. *Generation*; kanülierter anatomischer großkalibriger Rekonstruktionsnagel: stabilisiert durch Markraumstützung und spezialisierte Verriegelung (▣ Abb. 9).

Nach der knöchernen Heilung wurde der Marknagel am 02.03.1940 operativ entfernt.

Küntscher profitierte sehr von der Zusammenarbeit mit dem Orthopädie- und Medizintechniker Dr. med. h. c. Ernst Pohl (geb. 12.12.1876 in Stralsund; † 02.11.1962 in Kiel). Im Jahr 1902 gründete Pohl seine Firma für medizinische und chirurgische Instrumente und setzte die genialen Ideen von Küntscher in praktische Instrumente und medizintechnische Geräte um (▣ Abb. 4). Pohl entwickelte etwa den ersten flexiblen Markraumböhrer, der mit einer elektrischen Universalmaschine angetrieben wurde. In zahlreichen Publikationen dankte Küntscher „dem genialen Entwickler und Hersteller der Werkzeuge für die Marknagelung“. Das von Pohl 1951 entwickelte sog. **Gleitschraubenprinzip** findet noch heute in der operativen Behandlung von Frakturen Anwendung. Die dynamische Hüftschraube (DHS) stellt letztlich eine Weiterentwicklung der Pohl-Laschenschraube dar.

Parallel zu Küntscher entwickelte der Chirurg Richard Maatz 1951 die sog. Federosteosynthese. Die Feder- und Spreiznägeln wurden ebenfalls von der Fa. Ernst Pohl hergestellt. Nach dem Tod von Ernst Pohl wurde seine Firma 1972 in „Howmedica“ umbenannt und schließlich durch die Fa. Stryker übernommen. Noch heute werden am historischen Standort Kiel in der Tradition von Gerhard Küntscher und Ernst Pohl Marknägel entwickelt und produziert.

In den 1950er- und 1960er-Jahren wurde der von Küntscher inaugurierte Marknagel u. a. von Huckstep, Klemm und Schellmann sowie von Grosse und Kempf parallel weiterentwickelt und modifiziert [4]. Als Alternative wurden intramedullär eingebrachte Drahtsysteme verwendet. Insbesondere die von Leslie Rush entwickelten „**Rush pins**“ wurden häufig als intramedulläre Osteosynthese eingesetzt. Daneben wurden u. a. Drahtsysteme von Ender, Hackethal und Prevot propagiert. Die **Prevot-Nagelung** findet noch heute, insbesondere in der Kindertraumatologie, verbreitete Anwendung. Die Marknagelosteosynthese hat sich als Standardver-

Das von Pohl entwickelte Gleitschraubenprinzip wird heute noch in der Frakturbehandlung angewendet

Parallel zu Küntscher entwickelte der Chirurg Richard Maatz 1951 die sog. Federosteosynthese

Die Marknagelosteosynthese ist heute das Standardverfahren zur Stabilisierung von Frakturen langer Röhrenknochen an der unteren Extremität

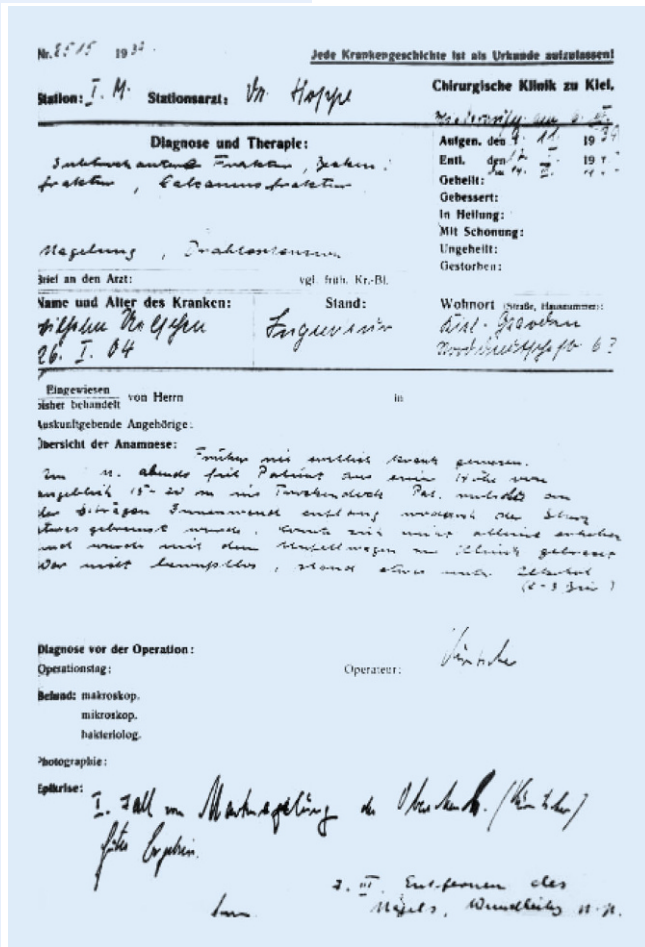


Abb. 3 ▲ Handschriftlich von Küntsch dokumentierte Krankengeschichte des ersten durch ihn mithilfe einer Marknagelosteosynthese behandelten Patienten in der Chirurgischen Klinik zu Kiel. (Aus [1], mit freundl. Genehmigung von ECV Editio Cantor Verlag für Medizin und Naturwissenschaften GmbH)

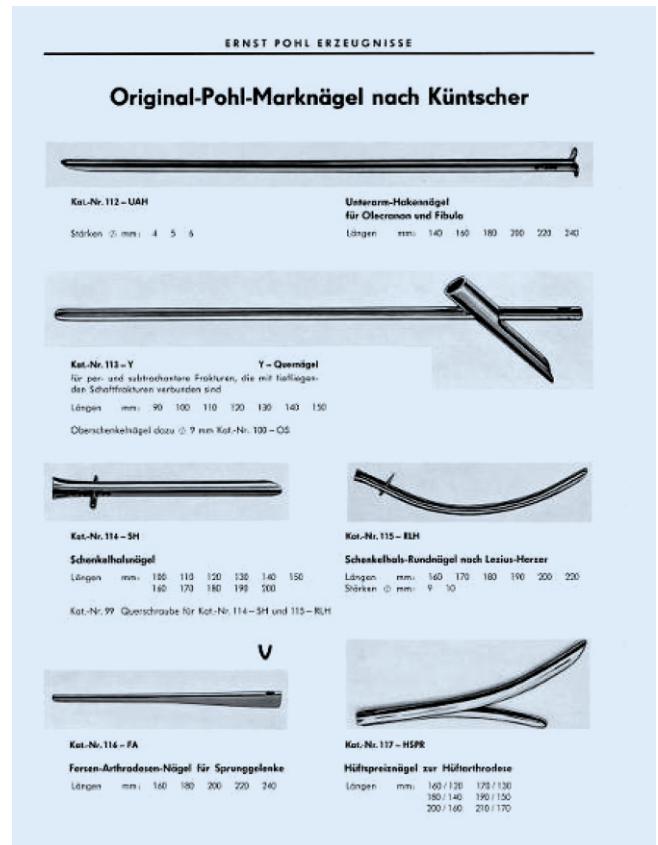


Abb. 4 ▲ Auszug aus einem historischen Produktkatalog der Fa. Ernst Pohl für Marknägel nach Küntsch. (Mit freundl. Genehmigung der Stryker Trauma GmbH)

Kniegelenk- oder Sprunggelenkarthrosen können beim Vorliegen geringer Defekte mithilfe des Verriegelungsmarknagels durchgeführt werden

Die beiden lateralen Verriegelungsschrauben an der Nagelspitze dienen bei der sog. Rendezvous-Technik gleichzeitig als Schaftschrauben der Platte der DHS

Indikationen

Grundsätzlich ist die moderne Verriegelungsmarknagelosteosynthese sowohl ante- als auch retrograd zur Stabilisierung diaphysärer Frakturen langer Röhrenknochen geeignet [10, 11]. Hier stellen einfache Frakturformen und **diaphysäre Knochenheilungsverzögerungen** wie hypertrophe Pseudarthrosen oder fehlverheilte Frakturen infolge von Rotations- oder Achsabweichungen, die eine geplante Osteotomie erforderlich machen, gute Indikationen dar [12, 13]. Auch Kniegelenk- oder Sprunggelenkarthrosen lassen sich über einen Verriegelungsmarknagel durchführen, solange keine deutlichen Defekte vorliegen [14]. Eine besondere Indikation zur Anwendung der Verriegelungsmarknagelosteosynthese stellen Mehretagenfrakturen langer Röhrenknochen dar, da sich über den intramedullären Kraftträger in Form eines sog. „all-in-one device“ die Möglichkeit der gleichzeitigen Stabilisierung beider Frakturen im selben Knochen über ein und dasselbe Implantat ergibt [15].

Im Fall des Femurs steht als weitere Anwendungsoption alternativ im Einzelfall die sog. **Rendezvous-Technik** zur Verfügung, bei der sich ein retrograder Kompressionsmarknagel mit einer DHS kombinieren lässt. Die beiden lateralen Verriegelungsschrauben an der Nagelspitze dienen unter Berücksichtigung des etwas kleinen Kerndurchmessers und unter der Voraussetzung gleicher Lochabstände gleichzeitig als Schaftschrauben der Platte der DHS. Eine weitere spezielle Indikation der Marknagelosteosynthese stellt der **Segmenttransport** im Rahmen der Revisionschirurgie bei Knochendefekten dar [16].

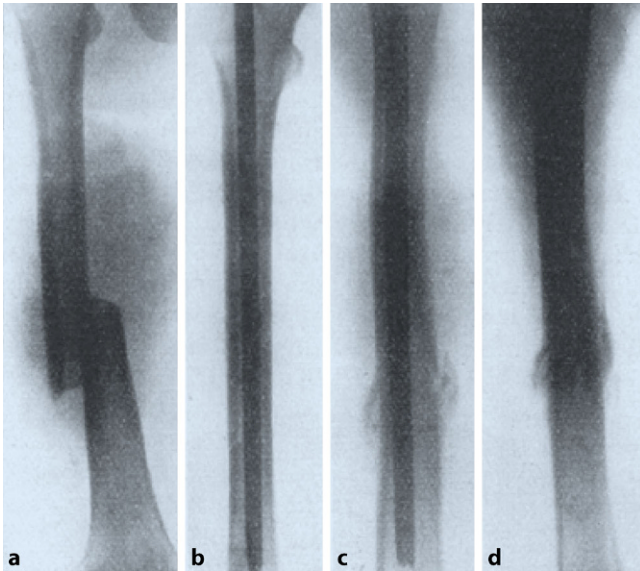


Abb. 5 ▲ Marknagelosteosynthese einer Femurschaftfraktur. **a** Unfallbild, **b** Resultat direkt postoperativ, **c** Kontrolle nach 5 Wochen, **d** Endergebnis nach Metallentfernung. (Aus Küntscher [3])

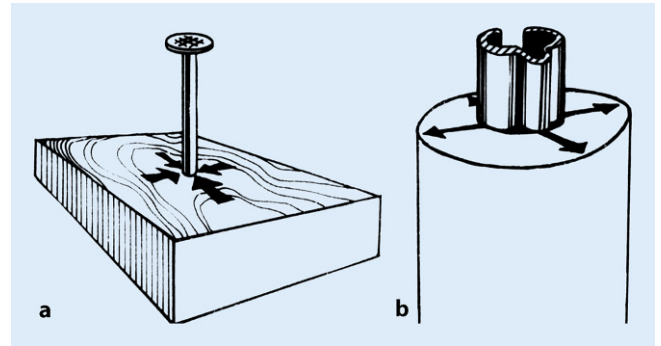


Abb. 6 ▲ Marknagel der 1. Generation: Prinzip der elastischen Verklebung im Markraum. **a** Ein unelastischer, massiver Nagelquerschnitt drängt das elastische Material (im Beispiel Holz) auseinander. **b** Der Querschnitt des Marknagels ist elastisch federnd zusammendrückbar, wodurch die elastische Verklebung im unelastischen Knochenrohr erzielt wird (Küntscher 1962). (Aus Klemm [8], mit freundl. Genehmigung von Karger Publishers)

Biomechanische Prinzipien

Die Entwicklung der Marknagelosteosynthese stellt grundsätzlich eine konsequente Weiterentwicklung der externen Stabilisierungsverfahren dar (**Abb. 10**). Der Fixateur externe nimmt die Last über die einliegenden sog. „Steinmann pins“ auf, überträgt sie exzentrisch via Rohrstrangen über die Frakturzone hinweg und leitet die Kraft über die distalen Pins wieder in den Knochen ein. Auch bei der winkelstabilen Plattenosteosynthese liegt der Lastträger immer noch außerhalb des Knochens, aber die exzentrische Lastübertragung wird viel näher an den Knochen angelagert. Bei der Marknagelosteosynthese wird dieses Prinzip konsequent fortgesetzt mit dem Unterschied, dass hier die Lastübertragung über eine Innenschäftung zentral über den Markkanal stattfindet und damit die geringsten exzentrisch wirkenden Biege- oder Scherkräfte auftreten. Dennoch wird auch bei der modernen Verriegelungsmarknagelung die Krafteinleitung über die proximalen Verriegelungsschrauben in den Knochen und den Marknagel übertragen mit anschließendem Kraftaustritt über die distalen Verriegelungsschrauben. Dieser **zylindrische Kraftträger** ist gegenüber Lasten entlang seiner Achse maximal stabil [17].

Somit erzeugt der Marknagel praktisch eine zentrale Stabilität in der Markraumhöhle: „Der Marknagel kann im Sinne einer **Zuggurtung** wie ein zentral axial einliegender Spanndraht betrachtet werden, der Zugkräfte so auf den Knochen überträgt, dass sie in stabilisierende Druckkräfte umgewandelt werden“ [21]. Dies ist v. a. in der frühen Heilungsphase wichtig, in der der Frakturkallus noch keine Last übertragen kann.

Im Röhrenknochen der unteren Extremität wirken die Lasten während der Mobilisation und der frühen Teilbelastung v. a. in axialer Richtung entlang der anatomischen Achse des Knochens. Mit zunehmender Belastung kommen durch die Wirkung der Muskulatur Biege- und Torsionsmomente hinzu [18]. Diese können bei unzureichender Stabilisierung kritisch für die Frakturheilung sein, da sie **Schermomente** induzieren, die den Heilungsprozess nachweislich verzögern [19, 20]. An der oberen Extremität, v. a. am Humerus, spielen Biege- und Torsionsmomente schon in der Phase der Mobilisation eine wesentliche Rolle. Biegemomente werden auf den Marknagel hauptsächlich durch die Führung des Nagels in der Markhöhle übertragen. Um diese Führung zu optimieren, ist es wichtig, die Kontaktfläche zwischen Knochen und Nagel möglichst groß zu gestalten. Dies geschieht über die Länge des Nagels und über seinen optimalen Sitz in der Markhöhle durch schrittweise **Markraumaufbohrung**. Aufgabe der Verriegelungsmarknagelosteosynthese ist es also, Frakturspaltbewegungen, die durch diese Druck- und Biegemomente entstehen können, effektiv zu minimieren [21].

Bei der Marknagelosteosynthese findet die Lastübertragung über eine Innenschäftung zentral über den Markkanal statt

Der Marknagel erzeugt eine zentrale Stabilität in der Markraumhöhle

Zur Führungsoptimierung ist eine möglichst groß gestaltete Kontaktfläche zwischen Knochen und Marknagel wichtig

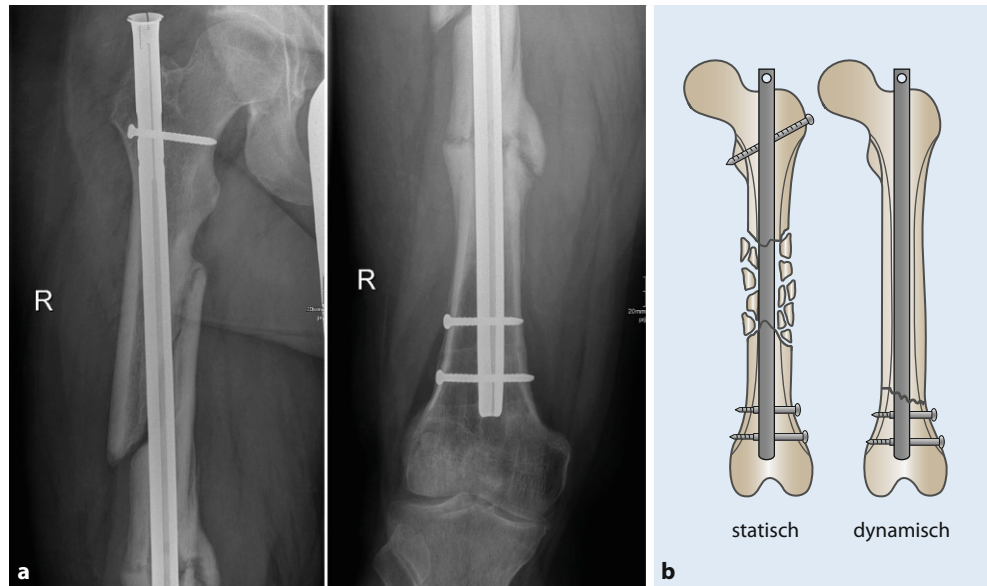


Abb. 7 ▲ Marknagel der 2. Generation: Stabilisierung durch Verklebung und Verriegelung im Markraum. **a** Verriegelungsschraube: Klemm-Schellmann, **b** Verriegelungsschraube: Kempf-Grosse

Die Stabilisierung gelenknaher Frakturen bleibt für die Marknagelung eine Herausforderung

Verriegelungsmechanismen der Schrauben sichern den Nagel gegen Auswandern und Verkippen

Bei der Marknagelung von Schaftfrakturen langer Röhrenknochen muss der Isthmus vollständig überbrückt werden

Neuere Technologien der Verriegelungsmarknagelung zielen darauf ab, die Stabilität der Osteosynthese zu erhöhen und das Indikationsspektrum zu erweitern. Gerade die Stabilisierung gelenknaher Frakturen ist und bleibt für die Marknagelung eine Herausforderung (▣ **Abb. 11**; [22, 23]). Die Erhöhung der Zahl der Verriegelungsmöglichkeiten sowie schräg gebohrte oder winkelstabile Verriegelungsschrauben bieten zunehmend Möglichkeiten zur Stabilisierung von Frakturen im Übergang zwischen Dia- und Metaphyse. Die Maximierung dieser technischen Lösungen hat auch die Chance eröffnet, zumindest einen Teil der Frakturen am proximalen Humerus mithilfe der Verriegelungsmarknagelung effektiv zu behandeln (▣ **Abb. 9**).

Für die Erhöhung der Stabilität der Verriegelungsmarknagelosteosynthese wurde u. a. die sog. **Kompressionstechnologie** entwickelt, um eine Lastumverteilung vom Nagel auf den Knochen zu erreichen (sog. „load sharing“; [24]). Durch die Kompression und das „load sharing“ werden die Biege- und v. a. die Torsionsstabilität der Osteosynthese deutlich erhöht [25].

Eine weitere Möglichkeit der Stabilitätssteigerung stellt die Verwendung **winkelstabiler Verriegelungsschrauben** dar [26]. Durch Klemm- bzw. Verriegelungsmechanismen der Schraube im Nagel wird dieser gegen Auswandern und Verkippen gesichert. Obwohl dadurch die mechanische Stabilität des Nagel-Schrauben-Verbands erhöht wird, ist bisher fraglich, ob dies eine relevante Verbesserung der gesamten Osteosynthese erzeugt [23].

Technische Aspekte

Für die Marknagelosteosynthese müssen der Faktor *Implantat* und der Faktor *Biologie* berücksichtigt und hinsichtlich ihrer Grundvoraussetzungen definiert werden, da sie sich im Gegensatz zum Faktor *Patient* positiv beeinflussen lassen. Ziel der Wahl eines intramedullären Kraftträgers zur Fraktur stabilisierung in Röhrenknochen sollte immer die **axiale Belastbarkeit** sein. Auf jeden Fall muss bei der Marknagelung von Schaftfrakturen der langen Röhrenknochen immer der Isthmus vollständig überbrückt werden, da hier die intramedulläre Abstützung am effektivsten ist [27]. Die aktuell verfügbaren Implantate zur Verriegelungsmarknagelung können in der Markhöhle gleiten und müssen so volumenstark sein, dass sie einwirkende axiale und Torsionsmomente ohne Deformierung des Nagels aufnehmen können. Der Einsatz von **markraumfüllenden Marknägeln** lässt sich durch eine aufgebohrte Nageltechnik erreichen [28] und ist biomechanisch von Vorteil [29]. Als Standardgrößen für den Nageldurchmesser empfehlen sich 11–12 mm am Femur und 10–11 mm an der Tibia. Größere Nageldurchmesser finden vorzugsweise in der Revisionschirurgie ihren Einsatz. Die vorgenannten Nageldurchmesser ermöglichen die Besetzung mit 5-mm-Verriegelungsschrauben, die wegen des geforderten Kerndurchmessers von mehr als



Abb. 8 ▲ Marknagel der 3. Generation: kleinkalibriger, ungebohrter Marknagel. Stabilisierung ganz überwiegend durch Kompletterriegelung. Beispiel: retrograd eingebrachter unaufgebohrter Femurmarknagel (UFN). **a** Unfallbild, **b** postoperativ anatomische Reposition in der anterior-posterioren Projektion, **c** postoperatives anatomisches Resultat auch in der lateralen Projektion

4 mm kräftig genug sind, um die Lastaufnahme über die Kompressionsschraube ohne wesentliche Deformierung aufzunehmen [30]. Daneben werden Torsionsmomente im Prinzip nur über die Verriegelungsschrauben des Nagels aufgenommen. Für eine Steigerung der Torsionsstabilität sollten daher die Zahl der Verriegelungsschrauben und der Abstand zwischen ihnen möglichst groß gewählt werden. Die Torsion zwischen dem proximalen und dem distalen Frakturende erfolgt dann über die Verdrillung des Nagels. Bei Belastungen, wie sie unter Alltagsaktivitäten wie Gehen oder Treppensteigen vorkommen, kann es zu Verdrillungen des Marknagels von 5–10° kommen.

Grundsätzlich kommen folgende Verriegelungsoptionen bei der Marknagelosteosynthese infrage [25]:

- einfache statische oder dynamische Verriegelung ohne intraoperative Vorkompression,
- aktiv vorkomprimierte statische Verriegelung und
- vorkomprimierte dynamische Verriegelung.

Zur **Vorkomprimierung** der dynamischen Verriegelung wird über die Kompressionsschraube nach Gefühl und unter gleichzeitiger Röntgenkontrolle derart Kompression auf den Frakturspalt gebracht, dass sie dem Anziehen einer gut sitzenden Kortikalisschraube entspricht. Bei beginnender sichtbarer Verbiegung der proximalen Querschraube wird der Kompressionsvorgang abgeschlossen. Der verbliebene freie Weg der proximalen Verriegelungsschraube im Längsloch ermöglicht eine prinzipielle Dynamisierung zur weiteren Kompression der Frakturenden unter Belastung während der postoperativen Nachbehandlungsphase [21]. Bei der aktiv vorkomprimierten statischen Verriegelung wird analog zur dynamisch vorkomprimierten Methode der Frakturspalt aktiv komprimiert. Danach wird zusätzlich zur proximalen Verriegelungsschraube im Längsloch eine weitere Verriegelungsschraube im Rundloch appliziert, um letztlich eine **statische Blockierung** des Nagels zu erreichen. Zum Preis der nun fehlenden Sinterungsmöglichkeit zur Fraktur dynamisierung ergibt sich durch diese zusätzliche proximale Verriegelungsschraube im statischen Rundloch eine erhöhte Stabilität bei deutlich verbesserter Fixierung des proximalen Frakturfragments. Dies gilt insbesondere bei kurzen proximalen Fragmenten mit entsprechend kurzstreckiger Führung des Nagels im Markraum. Nicht alle Marknagel bieten allerdings die

Option, eine Kompressionsschraube zu applizieren. Ein Vor- oder Zurückschlagen des Nagels kann durchgeführt werden, um eine **interfragmentäre Kompression** zu erzielen.

Entscheidend neben der achs- und rotationsgerechten Reposition ist der kortikale Kontakt der beiden Hauptfragmente der Fraktur mit mindestens halber Schaftzirkumferenz. Dieser kann durch Zwischenfragmente wie das typische sog. Schmetterlingsfragment oder unzureichende Reposition ungenügend sein.

Bei Schafffrakturen wird die Frakturposition im Rahmen der aufgebohrten Marknageltechnik über einen **Führungsdraht**, der im distalen Fragment in „Center-center“-Position platziert wird, primär geschlossen durchgeführt. Wenn der Eintrittspunkt exakt in der Schaftachse und der

Die Torsionsstabilität wird durch die Zahl der Verriegelungsschrauben und ihren Abstand zueinander maximiert

Bei der aktiv vorkomprimierten statischen Verriegelung wird der Frakturspalt aktiv komprimiert

Entscheidend ist der kortikale Kontakt der beiden Frakturhauptfragmente mit mindestens halber Schaftzirkumferenz

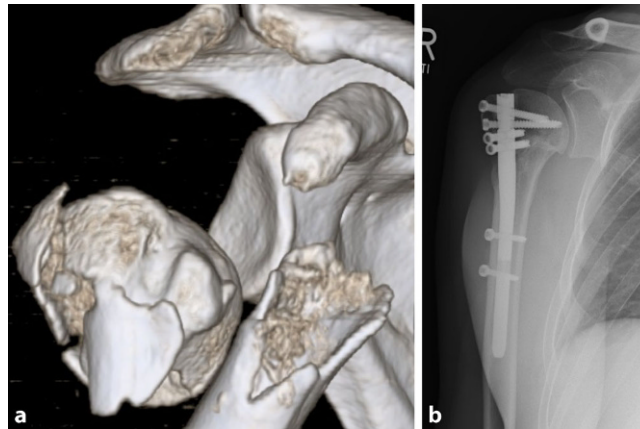


Abb. 9 ◀ Marknagel der 4. Generation: anatomisch konturierter, markraumfüllender Rekonstruktionsnagel. Stabilisierung durch Markraumstützung und spezialisierte Verriegelung bei einem 36-jährigen männlichen Patienten, Stabilisierung der proximalen Humerusluxationsfraktur im Sinne eines Erhaltungsversuchs. Kontrolle ein Jahr postoperativ: knöcherne Frakturkonsolidierung und kein Hinweis auf eine Humeruskopfnekrose. a Unfallbild, b Verlaufskontrolle ein Jahr postoperativ. ([9])

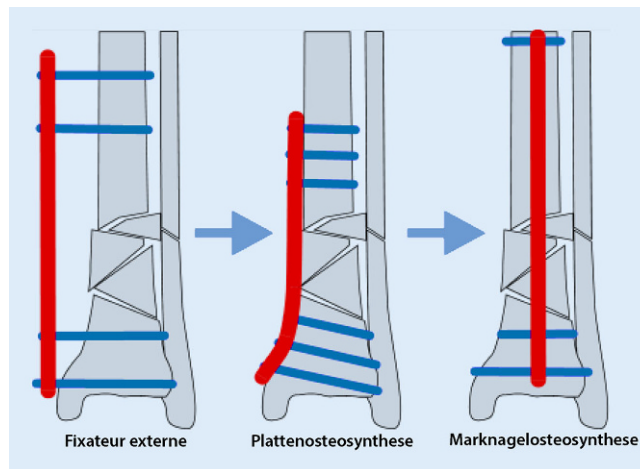


Abb. 10 ◀ Die Marknagelosteosynthese stellt eine konsequente Weiterentwicklung der externen Stabilisierungsverfahren Fixateur externe und Plattenosteosynthese dar

Bei exaktem Eintritts- und zentralem Endpunkt des ausreichend volumenstarken Marknagels ergibt sich automatisch eine korrekte achsgerechte Reposition

Die distalen Verriegelungsschrauben sichern die Rotationsstabilität des Marknagels

Endpunkt des Marknagels zentral gewählt worden sind, ergibt sich bei ausreichender Stärke des Nagels automatisch eine korrekte Reposition der Kortikalisschichten aufeinander. Die Nagelspitze sollte mit mindestens 2, besser jedoch mit 3 gekreuzten Schrauben in lateraler und anterior-posteriorer Position verriegelt werden, insbesondere bei relativ kurzem Hauptfragment wie etwa bei Tibiafrakturen des distalen Drittelpunkts [27, 30].

Eine weitere Option der Kompressionsmarknagelung besteht in der sekundären **aktiven Nachkompression** im Intervall nach beginnender Frakturkonsolidierung nach primär statischer Verriegelung [21]. Dabei wird die proximale statische Verriegelungsschraube entfernt und anschließend über die vorhandene Kompressionsschraube die bereits teilweise konsolidierte Fraktur weiter komprimiert.

Falls die dynamische Kompressionsstrecke im Längsloch vollständig aufgebraucht ist, kann in der dynamischen Position des Längsloches oberhalb der ursprünglichen Bohrung eine **Neupositionierung** der proximalen Verriegelungsschraube durchgeführt und der Prozess der dynamischen Frakturkomprimierung über die gesamte Länge des Längslochs theoretisch vollständig wiederholt werden.

Die distalen Verriegelungsschrauben sichern die Rotationsstabilität und sollten daher in situ verbleiben. Bei Nagelsystemen mit Rundlöchern für die distalen Verriegelungsschrauben ist eine Dynamisierung eines anterograd eingebrachten Marknagels unter Entfernung der distalen Verriegelungsbolzen nicht zu empfehlen, da neben einer axialen auch eine rotatorische Instabilität entsteht. Diese resultiert in vermehrter instabiler Mikrobewegung und wirkt dadurch der Frakturheilung entgegen.

Gerade bei Femurfrakturen stellt die **intraoperative Torsionskontrolle** eine besondere Herausforderung dar. Während die Femurachse durch Wahl des korrekten Eintrittspunktes und der Nagelspitze über den Nagel richtig ausgerichtet wird, ist die Torsionskontrolle durch den Nagel nicht gewährleistet. Um auch hier bereits intraoperativ die richtige Rotation einstellen zu

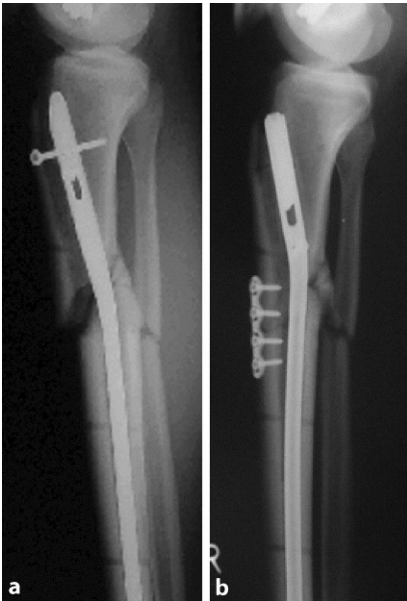


Abb. 11 ▲ Darstellung der Grenzen des Prinzips am Beispiel einer anterograden Marknagelosteosynthese einer Tibiaschaftfraktur im proximalen Drittel. **a** Typische anteriore Dislokation des proximalen Hauptfragments durch die Herzog-Krümmung der Nagelkonfiguration. **b** Revisionseingriff und Austauschmarknagelung mit Sicherung des proximalen Fragments durch eine monokortikal fixierte auxiliäre Plattenosteosynthese

Kortikaliskalibersprung kann als Hinweis für eine Torsionsabweichung angesehen werden [37, 38]. Der radiologische Vergleich mit der Gegenseite in Rückenlage des Patienten, radiologische Orientierung am Trochanter minor oder Torsionsanalysen durch den Nagel und dessen Schenkelhalsschraube sind weitere Methoden, um die korrekte Torsion einzustellen [38, 39]. Von der Arbeitsgruppe um Volker Bühren wurde eine Methode beschrieben, die eine relevante Torsionsabweichung sicher detektiert. Allerdings setzt die Methode eine normal verteilte Antetorsion voraus, da die interindividuelle Abweichung der Antetorsion sehr groß sein kann [40]. In stabiler Seitenlage mit frei abgewaschenem verletztem Bein erfolgt unter besonderer Berücksichtigung des korrekten Eintrittspunktes die exakte distale Positionierung des Führungsdrahtes durch **radiologische Kontrolle** in der exakten anterior-posterioren und seitlichen Ebene. Nach Aufbohren der Markhöhle und Insertion des Marknagels ist so die exakte Achse gesichert. Es wird zunächst distal verriegelt und anschließend die Torsion durch 2 exakte seitliche Einstellungen des Bildwändlers überprüft. Hierzu werden die Femurkondylen streng seitlich eingestellt. Idealerweise werden in dieser Projektion auch die seitlichen Verriegelungsschrauben orthograd getroffen. Nun wird der Bildwandler in dieser Ebene blockiert und ohne jegliche Veränderung dieser Einstellung parallel nach proximal verschoben. Wenn sich der Hüftkopf mit 2 Dritteln seiner Zirkumferenz vor die Verlängerung der Markraumachse projiziert, liegt keine Torsionsabweichung außerhalb der tolerablen Grenzen vor. Nun kann die proximale Verriegelung durchgeführt werden.

Die Erfahrungen mit dieser Methode bei der primären Femurmarknagelosteosynthese sind sehr gut. Im Rahmen einer Nachuntersuchung von Korrekturosteotomien und Pseudarthrosen mit oder ohne Torsionsabweichung wurde keine korrekturbedürftige Torsionsabweichung festgestellt [12, 40].

können, wurden verschiedene radiologische und technische Hilfsmittel und Methoden beschrieben. Mehrheitlich erfolgt die Marknagelosteosynthese des Femurs in Rückenlage des Patienten unter Verwendung des Extensionstischs [31]. Dies hat teilweise historische Gründe, da vor Verwendung des intraoperativen Bildwändlers die korrekte Ausrichtung der Achse und Rotation auf dem Extensionstisch außerhalb des OP eingestellt wurde. Anschließend wurde eine Röntgenaufnahme durchgeführt und erst bei zufriedenstellender Reposition die Marknagelosteosynthese ohne weitere intraoperative radiologische Kontrolle vorgenommen [6].

Obwohl zwischenzeitlich die intraoperative radiologische Kontrolle überall möglich ist, gehören Torsionsabweichungen weiterhin zu den häufigsten Komplikationen der Marknagelung, insbesondere am Femur. Beschrieben sind postoperative Torsionsabweichungen mit einer Häufigkeit bis zu 28% [32, 33, 34]. Erwartungsgemäß treten sie häufiger bei Quer-, Trümmer- und mehrfragmentären Frakturen auf. Auch wenn die Risikofaktoren in vielen Studien untersucht wurden, sind die Ergebnisse uneinheitlich. Weder für eine spezielle Lagerung noch für Adipositas oder andere patienteneigenen Faktoren konnte ein erhöhtes Risiko nachgewiesen werden [34, 35, 36]. Während bei Schräg- oder Spiralfrakturen die anatomische Reposition als Garant für die korrekte Rotation angesehen werden kann, ist man bei transversen oder mehrfragmentären Frakturen auf radiologische „Zeichen“ angewiesen. Ein

Torsionsabweichungen gehören zu den häufigsten Komplikationen der Marknagelung

Ein Kortikaliskalibersprung kann auf eine Torsionsabweichung hinweisen

Die sichere Detektion einer Torsionsabweichung setzt eine normal verteilte Antetorsion voraus

Die Torsion wird durch 2 exakte seitliche Einstellungen des Bildwändlers überprüft

Spezifische Anwendungen

Zephalomedulläre Marknagelung

Zur operativen Stabilisierung instabiler per- und subtrochantärer Femurfrakturen empfiehlt sich als intramedullärer Kraftträger ein sog. zephalomedullärer Nagel, also ein Marknagel mit **Gelenkkomponente** (■ **Abb. 12**). Abhängig von der Instabilitätsrichtung (mediolateral, kraniokaudal oder rotatorisch), die von proximal aus im Schaftverlauf zu einer zunehmenden Instabilität führt, müssen diese Instabilitäten durch das Osteosynthesematerial neutralisiert werden, damit die Vollbelastung bei der Nachbehandlung ermöglicht werden kann.

Bei den als stabil eingeschätzten Frakturen (AO¹-Typ 31-A1) stehen extramedulläre Implantate, wie die **Dynamische Hüftschraube**, zur Verfügung [41, 42]. Mit zunehmender mediolateraler und rotatorischer Instabilität der Fraktur (AO Typ 31-A2) empfehlen sich jedoch intramedulläre Kraftträger mit Gelenkkomponente in Standardlänge [43, 44]. Weiter distal gelegene Frakturen des AO-Typs 31-A3 sind durch eine zusätzliche **kraniokaudale Instabilität** gekennzeichnet und erfordern daher die Stabilisierung mit einem zephalomedullären Nagel in Langversion [45].

Entscheidend für eine komplikationslose Frakturheilung ist neben der anatomischen bzw. leicht valgisch impaktierten Frakturposition die korrekte Platzierung der Schenkelhalschraube zentral im Schenkelhals und der Schraubenspitze subkortikal im Femurkopf [46, 47, 48]. Mittlerweile stehen optional **moderne Navigationsmodule** zur Verfügung, die die korrekte Positionierung der Schenkelhalschraube erleichtern [49, 50]. Die anatomische Frakturposition geht der zephalomedullären Marknagelosteosynthese voraus. Vor allem bei jüngeren Patienten dürfen keine Kompromisse bezüglich der anatomisch korrekten Reposition zugelassen werden. Primäres Ziel ist dabei die geschlossene Frakturposition. Eine geschlossen nicht oder nur unzureichend versorgte Fraktur sollte offen reponiert und mit einem sog. **auxiliären Implantat** zusätzlich gesichert werden (Cerclage oder Platte; ■ **Abb. 13**; [51]). Die auxiliären Implantate können passager eingesetzt oder bei optimaler Lage belassen werden. Eigene biomechanische Untersuchungen bei trochantären Frakturen haben bestätigt, dass interfragmentäre Rotations- und Scherkräfte durch den Einsatz einer auxiliären Platte signifikant niedriger waren und dass die Stabilität des gesamten Konstrukts signifikant höher war als in der Vergleichsgruppe [52].

Mehretagenfrakturen der unteren Extremität

Mehretagenfrakturen der unteren Extremität entstehen häufig durch **Hochrasanztraumata**. Dabei können Kettenverletzungen mit Oberschenkel- und Unterschenkelfrakturen auftreten und Mehretagenfrakturen z. B. des Femurs entstehen. Mehretagenfrakturen des Femurs weisen typischerweise eine hüftgelenknahe und eine Schaftfraktur auf. Für die Therapieentscheidung zu ein- oder zweizeitigem Vorgehen bestehen unterschiedliche Indikationen.

Zweizeitiges Vorgehen bei Polytraumapatienten

Die initiale Behandlung beinhaltet die Stabilisierung der Schaftfraktur mit Fixateur externe, gefolgt von interner Fixation der proximalen Fraktur. Die definitive Stabilisierung der Schaftfraktur erfolgt nach intensivmedizinischer Stabilisierung des Patienten. Die verkürzte Operationszeit am Unfalltag entspricht dem sog. „**Damage-control-orthopedics**“-Konzept (DCO-Konzept).

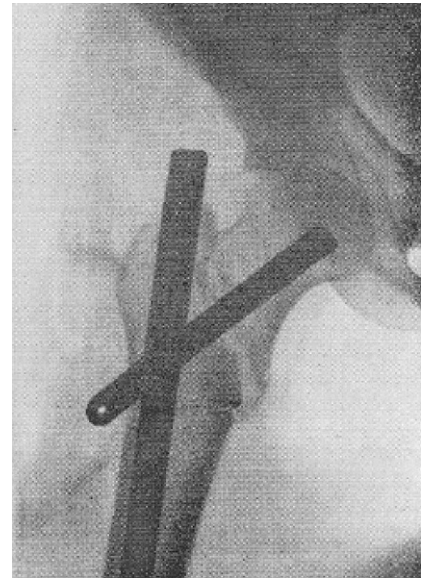


Abb. 12 ▲ Röntgenbild der ersten Verwendung eines zephalomedullären Marknagels durch Küntscher. (Aus Küntscher [2])

Mit zunehmender mediolateraler und rotatorischer Frakturinstabilität empfiehlt sich ein zephalomedullärer Nagel in Standardlänge

Die Schenkelhalschraube ist zentral im Schenkelhals und die Schraubenspitze subkortikal im Femurkopf zu platzieren

Mehretagenfrakturen des Femurs weisen eine hüftgelenknahe und eine Schaftfraktur auf

¹ Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen

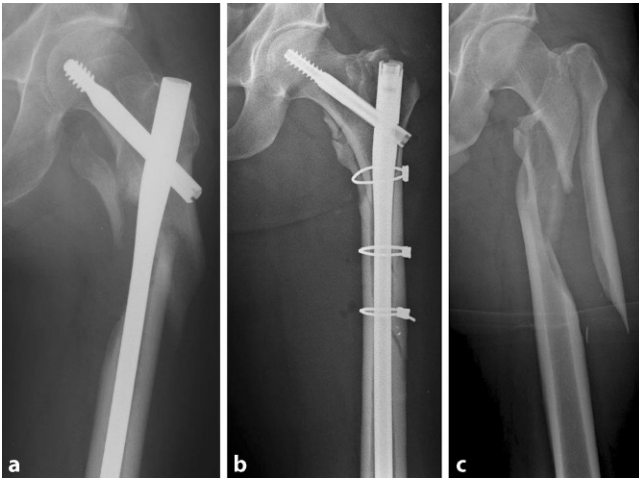


Abb. 13 ◀ Geschlossene vs. offene Reposition: Grundsätzlich ist eine geschlossene der offenen Reposition vorzuziehen. Offensichtliche Achsabweichungen (a) sollten nicht toleriert und durch offene Reposition korrigiert werden. Eine zusätzliche Fixation mit Kabel-Cerclagen ist indiziert, um insbesondere bei Mehrfragment- oder langen Spiralfrakturen (c) die Frakturgeometrie von einer komplexen in eine einfache Fraktursituation zu überführen

Einzeitiges Vorgehen bei Patienten mit Monotrauma

Ein primär definitives Verfahren kann bei Patienten mit Monotrauma angewendet werden. Wenn die proximale Fraktur disloziert ist, wird primär die Stabilisierung der distalen Fraktur empfohlen, gefolgt von der Stabilisierung der proximalen Fraktur.

Stabilisierungsverfahren

Für die operative Stabilisierung von Mehretagenfrakturen des Femurs können die im Folgenden beschriebenen Verfahren angewendet werden.

Individuelle Fixation der Frakturkomponenten: Kombination aus Marknagel- und Schraubenosteosynthese. Bei einer nicht oder wenig dislozierten medialen Schenkelhalsfraktur kann eine Schraubenosteosynthese mit z. B. 3 kanülierten 6,5-mm-Schrauben vorgenommen werden [53]. Die Schraubenfixierung kann mit retrograder oder anterograder Marknagelosteosynthese zur Fixierung der Femurschaftfraktur kombiniert werden [54, 55].

Überbrückende Fixation der Frakturkomponenten mit zephalomedullärem Implantat. Das Behandlungskonzept zählt zu den „All-in-one-device“-Verfahren. Es beruht darauf, dass das eine Implantat beide Frakturen überbrückt. Bei den zephalomedullären Implantaten wird die Schaftfraktur mit dem Marknagelanteil und die proximale Fraktur mit der Schenkelhalskomponente stabilisiert [56]. [57].

Kombination von dynamischer Hüftschraube und retrogradem Marknagel (Rendezvous-Technik). Bei der alternativ verfügbaren Rendezvous-Technik wird die Kombination einer retrograden Marknagelosteosynthese und einer DHS eingesetzt und damit eine stabile, überlappende und geblockte Fixation beider Frakturen erzielt. Die Rendezvous-Technik bietet die Möglichkeit, die **einzeitige Operation**, d. h. als definitives Verfahren am Unfalltag, oder die zweizeitige Operation, d. h. mit einer 2-zeitigen Operationsstrategie im Rahmen einer Polytraumabehandlung, durchzuführen. Bei 2-zeitigem Vorgehen wird die Femurschaftfraktur passager mithilfe eines externen Fixateurs stabilisiert. Die proximale Femurfraktur wird primär definitiv mit einer 4-Loch-DHS und ggf. Antirotationsschraube versorgt.

Kombination von Marknagel und auxiliärer Platte. Das Stabilisierungsverfahren mit Verwendung eines Marknagels und einer auxiliären Platte [58, 59] oder Cerclage [60, 61] kann bei Sonderfällen von Mehretagenfrakturen des Femurs, bei denen eine Femurschaft- und eine distale Fraktur auftreten, eingesetzt werden. Zunächst kann die gelenknahe Fraktur offen reponiert und mithilfe einer Plattenosteosynthese mit **monokortikaler Schraubenlage** stabilisiert werden. Die monokortikal applizierten Schrauben bieten ausreichende Stabilität für die sichere Retention der Fraktur (▣ Abb. 13). Gleichzeitig bleibt der Markraum als Korridor für die Marknagelosteosynthese offen, die entweder antero- oder retrograd eingebracht werden kann.

Das zephalomedulläre Implantat überbrückt beide Frakturen

Bei 2-zeitigem Vorgehen wird die Femurschaftfraktur passager mithilfe eines externen Fixateurs stabilisiert

Der Markraum bleibt bei monokortikaler Schraubenlage als Korridor für die Marknagelosteosynthese offen

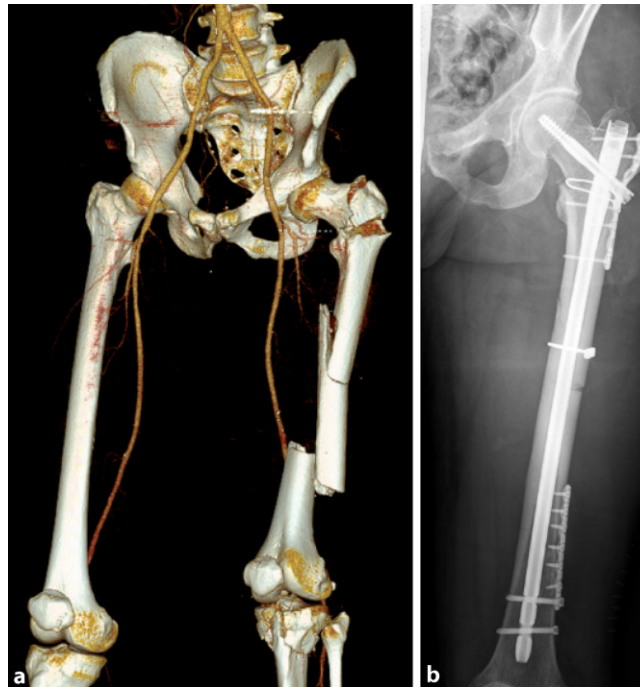


Abb. 14 ◀ Komplexe Mehretagenfraktur des Femurs. **a** Unfallbild, **b** postoperatives Resultat

In **Abb. 14** sind Reposition und Retention einer komplexen Mehretagenfraktur anhand des Prinzips der Versorgung von Kettenverletzungen mit einer von distal nach proximal gerichteten Versorgungsstrategie dargestellt:

1. „Mini-open“-Zugang, Reposition und Retention der distalen Schaftfraktur mit einer auxiliären Platte.
2. „Mini-open“-Zugang, Reposition und Retention der Spiralfaktur der Femurschaftmitte mithilfe einer 1,7-mm-Kabel-Cerclage unter Verwendung eines Kabelapplikators,
3. offene Reposition und Retention der proximalen Fraktur mit monokortikal fixierter Platte und zusätzlicher Kabel-Cerclage und
4. überbrückende Osteosynthese mit langem zephalomedullärem Nagel.

Bei einer Kettenverletzung der unteren Extremität mit ipsilateraler Femur- und Tibiaschaftfraktur kann eine kombinierte Marknagelosteosynthese von Femur und Tibia auch über einen gemeinsamen **kniegelenknahen Zugang** durchgeführt werden. Dabei werden die Femurschaftfraktur mit einem retrograden Marknagel und die Tibiaschaftfraktur mit einem anterograden Marknagel stabilisiert.

Ursachen für Marknagelversagen

Mögliche biomechanische und/oder biologische Ursachen für das Versagen von Marknägeln, speziell von Systemen mit Gelenkkomponente, wurden im eigenen umfangreichen Patientenkollektiv für das proximale Femur untersucht [46]. Eine unzureichende Reposition, insbesondere eine Varusabweichung des proximalen Frakturfragments mit resultierender fehlender intrinsischer Stabilität, kann zu einer Pseudarthrosenbildung und Implantatversagen führen. Ein weiterer Grund kann die Wahl eines zu kurzen und damit **instabilen Implantats** in Form eines Marknagels der Standardausführung bei einer instabilen intertrochantären Fraktur mit Ausläufer in den Schaft, bei einer subtrochantären Fraktur oder bei einer „reversed“ intertrochantären Fraktur sein [46]. Ein langes zephalomedulläres Implantat, das den Isthmus der Diaphyse überschreitet, bietet deutlich mehr Stabilität und sollte bei den instabilen Frakturen verwendet werden. Auch die offene Reposition mit großzügiger Freilegung, Denudierung und dadurch **Devaskularisierung** der Fragmente oder die Ausräumung des als osteoinduktiv wirksam bewerteten Frakturhämatoms kommen als mögliche Ursachen infrage. Ob der Einsatz von Cerclagen eine relevante Störung der Periostdurchblutung verursacht, wird kontrovers diskutiert [62, 63].

Eine unpräzise Technik beim Bohrvorgang zur Platzierung der Schenkelhalsschraube kann eine Materialverletzung des ovalen Rundlochs im Marknagel hervorrufen und damit eine mechanische Schwächung des Nagels induzieren [46]. Die Wahl eines **falschen Nageleintrittspunktes** mit resultierender Varusabweichung führt zu ungünstigen Scher- und Biegekräften. Lassen sich diese nicht neutralisieren, ist eine sekundäre Dislokation der Fraktur unausweichlich. Daher ist die Wahl des korrekten Eintrittspunktes eine weitere entscheidende Voraussetzung, um ein Marknagelversagen zu verhindern. Obwohl die vorgenannten Versagensursachen am proximalen Femur untersucht wurden, lassen sie sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Besonderheiten anderer Röhrenknochen und Frakturlokalisationen allgemeingültig für den Einsatz von Marknägeln formulieren.

Bei der Fehleranalyse nach Marknagelversagen richtete sich der Fokus der Autoren des vorliegenden Beitrags zudem speziell auf die mit zusätzlicher Applikation von **Knochenwachstumsfaktoren**, den *rekombinanten humanidentischen Knochenmorphogeneseproteinen* („bone morphogenetic protein“, BMP), in Kombination mit autologem Knochentransplantat behandelten Patienten. Dazu wurde der additive Einsatz von BMP-2 bzw. BMP-7 zur operativen Behandlung aseptischer Pseudarthrosen in verschiedenen Röhrenknochen im eigenen umfangreichen Kollektiv an Humerus, Klavikula, Ulna, Radius, Femur und Tibia eingehend untersucht [64, 65, 66]. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten, dass die erfolgreiche Therapie aseptischer Pseudarthrosen von der vollständigen Resektion der Pseudarthrosenzone – entweder offen oder geschlossen durch schrittweise Aufbohrung des Markraums –, gefolgt von einer stabilen internen Osteosynthese unter Wiederherstellung korrekter Achs-, Rotations- und Längenverhältnisse abhängig ist. Die Auswertung der untersuchten Revisionskonzepte ermutigte jedoch nicht dazu, die zusätzliche Applikation von BMP-2 oder BMP-7 grundsätzlich zu empfehlen.

Fazit für die Praxis

- Zur operativen Stabilisierung von Schaftfrakturen langer Röhrenknochen stellt die Marknagelosteosynthese den Goldstandard dar. Hierbei bieten möglichst großkalibrige solide Marknägel mit stabilen Verriegelungsschrauben eine hohe Primärstabilität.
- Das kurze Frakturfragment sollte mit mindestens 2, besser jedoch mit 3 Verriegelungsschrauben gesichert werden.
- Der Kompressionsmechanismus des Marknagels kann für Frakturen, die sich mit mindestens 50% der Zirkumferenz abstützen, angewendet werden.
- Der Kompressionsmarknagel eignet sich für die Therapie von Pseudarthrosen und für Arthrosen.
- Die Dynamisierung eines anterograd eingebrachten Kompressionsmarknagels sollte immer durch Entfernung der proximalen Verriegelungsschrauben in den statischen Rundlöchern durchgeführt werden.
- Rekonstruktionsmarknägel der 4. Generation mit anatomisch konturiertem Design erweitern das Indikationsspektrum der Marknagelosteosynthese auf metaphysäre Frakturen.

Korrespondenzadresse



PD Dr. C. von Rüden
Abteilung Unfallchirurgie, BG Unfallklinik Murnau
Professor-Küntschers-Str. 8, 82418 Murnau, Deutschland
christian.vonrueden@bgu-murnau.de

Danksagung. Die Koautoren sind Herrn Prof. Dr. med. Volker Bühren, Ärztlicher Direktor der BG Unfallklinik Murnau und Chefarzt der Abteilung Unfallchirurgie, Sportorthopädie und Kindertraumatologie des Klinikums Garmisch-Partenkirchen, für seine chirurgische Ausbildung, Unterstützung und Anleitung zu tiefem Dank verpflichtet.

Eine unpräzise Bohrung zur Platzierung der Schenkelhalsschraube kann eine mechanische Schwächung des Nagels induzieren

Die erfolgreiche Therapie aseptischer Pseudarthrosen wird durch die vollständige Resektion der Pseudarthrosenzone bestimmt

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. C. Hierholzer, J. Friederichs, P. Augat, A. Woltmann, O. Trapp, V. Bühren und C. von Rüden geben an, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

- Küntscher G (1950) Die Marknagelung. Arbeitsgemeinschaft medizinischer Verlage, Verlag Dr. Werner Saenger, Berlin
- Küntscher G (1940) Die Marknagelung von Knochenbrüchen. Langenbecks Arch Klin Chir 200:443–455
- Küntscher G (1940) Klin Wochenschr 19:833. <https://doi.org/10.1007/BF01774565>
- Kempf I, Grosse A, Lafforgue D (1978) Combined Küntscher nailing and screw fixation (author's transl). Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot 64(8):635–651
- Wähner D, Gehweiler D (2017) Complications of intramedullary nailing—evolution of treatment. Injury 48(Suppl 1):S59–S63. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.04.032>
- Küntscher G, Maatz R (1945) Technik der Marknagelung. Thieme, Leipzig
- Klemm K, Schellmann WD, Vittali HP (1974) Die Verriegelungsnagelung des Unterschenkels. Hefte Unfallheilkd 117:112–114
- Klemm H (Hrsg) (1986) Praxis der Marknagelung Reprint. Karger, Basel, S 22–30 <https://doi.org/10.1159/000425919> (Handschriftlich nach 1. Auflage 1962 überarbeitete, bisher unveröffentlichte 2. Ausgabe von 1972)
- von Rüden C, Trapp O, Hierholzer C, Prohaska S, Wurm S, Bühren V (2015) Marknagel- vs. winkelstabile Plattenosteosynthese bei proximalen Humerusfrakturen: Langzeitergebnisse. Unfallchirurg 118:686–692
- Mückley T, Diefenbeck M, Sorkin AT, Beigel C, Goebel M, Bühren V (2008) Results of the T2 humeral nailing system with special focus on compression interlocking. Injury 39(3):299–305. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2007.08.031>
- Hierholzer C, von Rüden C, Pötzel T, Woltmann A, Bühren V (2011) Outcome analysis of retrogradenailing and less invasive stabilization system in distal femoral fractures: a retrospective analysis. Indian J Orthop 45(3):243–250. <https://doi.org/10.4103/0019-5413.80043>
- Hierholzer C, Glowalla C, Herrler M, von Rüden C, Hungerer S, Bühren V, Friederichs J (2014) Reamed intramedullary exchange nailing: treatment of choice of aseptic femoral shaft nonunion. J Orthop Surg Res 9:88
- Hierholzer C, Friederichs J, Glowalla C, Woltmann A, Bühren V, von Rüden C (2017) Reamed intramedullary exchange nailing in the operative treatment of aseptic tibial shaft nonunion. Int Orthop 41(8):1647–1653. <https://doi.org/10.1007/s00264-016-3317-x>
- Mückley T, Hofmann G, Bühren V (2007) Tibiotalar arthrodesis with the tibial compression nail. Eur J Trauma Emerg Surg 33(2):202–213. <https://doi.org/10.1007/s00068-007-1151-y>
- von Rüden C, Tauber M, Woltmann A, Friederichs J, Hackl S, Bühren V, Hierholzer C (2015) Surgical treatment of ipsilateral multi-level femoral fractures. J Orthop Surg Res 10:7. <https://doi.org/10.1186/s13018-014-0149-5>
- Hofmann GO, Gonschorek O, Bühren V (1999) Segment transport employing intramedullary devices in tibial bone defects following trauma and infection. J Orthop Trauma 13(3):170–177
- Henschel J, Eberle S, Augat P (2016) Load distribution between cephalic screws in a dual lag screw trochanteric nail. J Orthop Surg Res 11:41. <https://doi.org/10.1186/s13018-016-0377-y>
- Klöpper-Krämer I, Augat P (2010) Teilbelastung in der Rehabilitation: Vermittlungsstrategien und Grenzen. Unfallchirurg 113:14–20. <https://doi.org/10.1007/s00113-009-1717-8>
- Augat P, Burger J, Schorlemmer S, Henke T, Peraus M, Claes L (2003) Shear movement at the fracture site delays healing in a diaphyseal fracture model. J Orthop Res 21(6):1011–1017
- Wehner T, Penzkofer R, Augat P, Claes L, Simon U (2011) Improvement of the shear fixation stability of intramedullary nailing. Clin Biomech 26(2):147–151. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.09.009>
- Bühren V (2000) Kompressionsmarknagelung langer Röhrenknochen. Unfallchirurg 103(9):708–720
- Augat P, Bühren V (2010) Modernes Implantatdesign für Osteosynthese bei vorbestehender Osteoporose. Orthopäde 39(4):397–406. <https://doi.org/10.1007/s00132-009-1572-x>
- Augat P, Bühren V (2015) Marknagelosteosynthese an der distalen Tibia: Macht die winkelstabile Verriegelung einen Unterschied? Unfallchirurg 118(4):311–317. <https://doi.org/10.1007/s00113-014-2671-7>
- Gonschorek O, Hofmann GO, Bühren V (1998) Interlocking compression nailing: a report on 402 applications. Arch Orthop Trauma Surg 117(8):430–437
- Högel F, Gerber C, Bühren V, Augat P (2013) Reamed intramedullary nailing of diaphyseal tibial fractures: comparison of compression and non-compression nailing. Eur J Trauma Emerg Surg 39(1):73–77. <https://doi.org/10.1007/s00068-012-0237-3>
- Hoffmann S, Gerber C, von Oldenburg G, Kessler M, Stephan D, Augat P (2015) Effect of angular stability and other locking parameters on the mechanical performance of intramedullary nails. Biomed Tech 60(2):157–164. <https://doi.org/10.1515/bmt-2014-0100>
- Augat P, Penzkofer R, Nolte A, Maier M, Panzer S, von Oldenburg G, Püschel K, Simon U, Bühren V (2008) Interfragmentary movement in diaphyseal tibia fractures fixed with locked intramedullary nails. J Orthop Trauma 22(1):30–36. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e31816073cb>
- Bhandari M, Guyatt GH, Tong D, Adili A, Shaughnessy SG (2000) Reamed versus nonreamed intramedullary nailing of lower extremity long bone fractures: a systematic overview and meta-analysis. J Orthop Trauma 14(1):2–9
- Hoegel FW, Hoffmann S, Weninger P, Bühren V, Augat P (2012) Biomechanical comparison of locked plate osteosynthesis, reamed and unreamed nailing in conventional interlocking technique, and unreamed angle stable nailing in distal tibia fractures. J Trauma Acute Care Surg 73(4):933–938. <https://doi.org/10.1097/TA.0b013e318251683f>
- Penzkofer R, Maier M, Nolte A, von Oldenburg G, Püschel K, Bühren V, Augat P (2009) Influence of intramedullary nail diameter and locking mode on the stability of tibial shaft fracture fixation. Arch Orthop Trauma Surg 129(4):525–531. <https://doi.org/10.1007/s00402-008-0700-0>
- Firat A, Tecimel O, Deveci A, Ocguder A, Bozkurt M (2013) Supine patient position with the contralateral leg elevated for femoral intramedullary nailing. Clin Orthop Relat Res 471:640–648
- Braten M, Terjesen T, Rossvoll I (1993) Torsional deformity after intramedullary nailing of femoral shaft fractures: Measurement of anteversion angles in 110 patients. J Bone Joint Surg Br 75:799–803
- Lindsey JD, Krieg JC (2011) Femoral malrotation following Intramedullary nail fixation. J Am Acad Orthop Surg 19:17–26
- Stephen DJ, Kreder HJ, Schemitsch EH, Conlan LB, Wild L, McKee MD (2002) Femoral intramedullary nailing: comparison of fracture-table and manual traction. A prospective randomized study. J Bone Joint Surg Am 84:1514–1521
- Koerner JD, Patel NM, Yoon RS, Gage MJ, Donegan DJ, Liporace FA (2014) Femoral malrotation after intramedullary nailing in obese versus non-obese patients. Injury 45:1095–1098
- Tornetta P III, Ritz G, Kantor A (1995) Femoral torsion after interlocked nailing of unstable femoral fractures. J Trauma 38:213–219
- Jaarsma RL, Verdonchot N, van der Venne R, van Kampen A (2005) Avoiding rotational malalignment after fractures of the femur by using the profile of the lesser trochanter: an in vitro study. Arch Orthop Trauma Surg 125:184–187
- Krettek C, Rudolf J, Schandelmaier P, Guy P, Könemann B, Tschernig H (1996) Unreamed intramedullary nailing of femoral shaft fractures: operative technique and early clinical experience with the standard locking option. Injury 27:233–254
- Hoigne D, Hauck R, Babst R (2011) Technique for intraoperative determination of femoral rotation with a lateral femur nail (LFN, Synthes, Oberdorf, Switzerland). Arch Orthop Trauma Surg 131:1649–1654
- Friederichs J, von Rüden C, Hierholzer C, Bühren V (2015) Technik der antegraden Femurmarknagelung in Seitenlage. Unfallchirurg 118:295–301
- Bhandari M, Schemitsch E, Jönsson A, Zlowodzki M, Haidukewych GJ (2009) Gamma nails revisited:

- gamma nails versus compression hip screw in the management of intertrochanteric fractures of the hip: a meta-analysis. *J Orthop Trauma* 23:460–464. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e318162f67>
42. Saarenpää I, Heikkinen T, Ristiniemi J, Hyvönen P, Leppilähti J, Jalovaara P (2009) Functional comparison of the dynamic hip screw and the Gamma locking nail in trochanteric hip fractures: a matched-pair study of 268 patients. *Int Orthop* 33:255–260
 43. Barton T, Fleeson R, Topliss C, Greenwood R, Harries WJ, Chesser TJ (2010) A comparison of the long gamma nail with the sliding hip screw for the treatment of AO/OTA 31-A2 fractures of the proximal part of the femur. *J Bone Joint Surg Am* 92(4):792–798. <https://doi.org/10.2106/JBJS.I.00508>
 44. Matre K, Vinje T, Havelin LI, Gjertsen JE, Furnes O, Espehaug B, Kjellevoid SH, Fevang JM (2013) TRIGEN INTERTAN intramedullary nail versus sliding hip screw: a prospective, randomized multicenter study on pain, function, and complications in 684 patients with an intertrochanteric or subtrochanteric fracture and one year of follow-up. *J Bone Joint Surg Am* 95(3):200–208. <https://doi.org/10.2106/JBJS.K.01497>
 45. Langer S, Klier T, Lorenz M, Bühren V, von Rüden C (2016) Operatives Management proximaler Femurfrakturen. *OUP* 11:622–626. <https://doi.org/10.3238/oup.2016.0622-0626>
 46. von Rüden C, Hungerer S, Augat P, Trapp O, Bühren V, Hierholzer C (2015) Breakage of cephalomedullary nailing in operative treatment of trochanteric and subtrochanteric femoral fractures. *Arch Orthop Trauma Surg* 135(2):179–185. <https://doi.org/10.1007/s00402-014-2121-6>
 47. Geller JA, Saifi C, Morrison TA, Macaulay W (2010) Tip-apex distance of intramedullary devices as a predictor of cut-out failure in the treatment of peritrochanteric elderly hip fractures. *Int Orthop* 34(5):719–722. <https://doi.org/10.1007/s00264-009-0837-7>
 48. De Bruijn K, den Hartog D, Tuijnbreijer W, Roukema G (2012) Reliability of predictors for screw cutout in intertrochanteric hip fractures. *J Bone Joint Surg Am* 94(14):1266–1672. <https://doi.org/10.2106/JBJS.K.00357>
 49. Elfring R, de la Fuente M, Radermacher K (2010) Assessment of optical localizer accuracy for computer-aided surgery systems. *Comput Aided Surg* 15(1–3):1–12
 50. Regling M, Blau A, Probe RA, Maxey JW, Solberg BD (2014) Improved lag screw positioning in the treatment of proximal femur fractures using a novel computer assisted surgery method: a cadaveric study. *BMC Musculoskelet Disord* 15:189. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-15-189>
 51. Kurylo JC, Templeman D, Mirick GE (2015) The perfect reduction: approaches and techniques. *Injury* 46(3):441–444. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.11.027>
 52. Eberle S, Gabel J, Hungerer S, Hoffmann S, Pätzold R, Augat P, Bühren V (2012) Auxiliary locking plate improves fracture stability and healing in intertrochanteric fractures fixated by intramedullary nail. *Clin Biomech* 27(10):1006–1010. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2012.07.008>
 53. Leung KS, So WS, Lam TP, Leung PC (1993) Treatment of ipsilateral femoral shaft fractures and hip fractures. *Injury* 24(1):41–45
 54. Okcu G, Aktuglu K (2003) Antegrade nailing of femoral shaft fractures combined with neck or distal femur fractures. *Arch Orthop Trauma Surg* 123:544–550
 55. Anup K, Mehra MM (2002) Retrograde femoral interlocking nail in complex fractures. *J Orthop Surg* 10(1):17–21
 56. Hoover GK, Browner BD, Cole JD, Comstock CP, Cotler HB (1991) Initial experience with a second generation locking femoral nail: the Russel-Taylor reconstruction nail. *Contemp Orthop* 23(3):199–208
 57. Lin SH, Lo CW, Cheng SC, Kuo MY, Chin LS (2002) Use of reconstruction nails to manage ipsilateral displaced femoral neck-shaft fractures: assessment of a new approach. *J Orthop Surg* 20:185–193
 58. Gadegone WM, Lokhande V, Salphale Y, Ramteke A (2013) Long proximal femoral nail in ipsilateral fractures of proximal femur and shaft of femur. *Indian J Orthop* 47(3):272–277
 59. Tsai MC, Wu CC, Hsiao CW, Huang JW, Kao HK, Hsu YT (2009) Reconstruction intramedullary nailing for ipsilateral femoral neck and shaft fractures: main factors determining prognosis. *Chang Gung Med J* 32(5):563–573
 60. Bali K, Gahlot N, Aggarwal S, Goni V (2013) Cephalomedullary fixation for femoral neck/intertrochanteric and ipsilateral shaft fractures: surgical tips and pitfalls. *Chin J Traumatol* 16(1):40–45
 61. Tsarouhas A, Hantes ME, Karachalios T, Bargiotas K, Malizos KN (2011) Reconstruction nailing for ipsilateral femoral neck and shaft fractures. *Strategies Trauma Limb Reconstr* 6:69–75
 62. Alvarez D, Aparicio J, Fernandez E, Múgica IG, Batalla DN, Jiménez JP (2004) Implant breakage, a rare complication with the gamma nail. A review of 843 fractures of the proximal femur treated with a gamma nail. *Acta Orthop Belg* 70(5):435–443
 63. Yoshino N, Watanabe Y, Tanekaka N, Watanabe N, Fukuda Y, Fujita N, Maruyama N, Sumiyoshi H, Takai S (2006) Implant failure of long Gamma nail in a patient with intertrochanteric-subtrochanteric fracture. *J Orthop Sci* 11:638–643
 64. von Rüden C, Morgenstern M, Hierholzer C, Hackl S, Gradinger FL, Woltschmann A, Bühren V, Friederichs J (2015) The missing effect of human recombinant Bone Morphogenetic Proteins BMP-2 and BMP-7 in surgical treatment of aseptic forearm nonunion. *Injury* 47:919–924. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.11.038>
 65. von Rüden C, Morgenstern M, Friederichs J, Augat P, Hackl S, Woltschmann A, Bühren V, Hierholzer C (2016) Comparative study suggests that human Bone Morphogenetic Proteins have no influence on the outcome of operative treatment of aseptic clavicle nonunions. *Int Orthop* 40(11):2339–2345. <https://doi.org/10.1007/s00264-016-3262-8>
 66. Hackl S, Hierholzer C, Friederichs J, Woltschmann A, Bühren V, von Rüden C (2017) Long-term outcome following additional rhBMP-7 application in revision surgery of aseptic humeral, femoral, and tibial shaft nonunion. *Bmc Musculoskelet Disord* 18(1):342. <https://doi.org/10.1186/s12891-017-1704-0>

CME-Fragebogen

Teilnahme am zertifizierten Kurs auf CME.SpringerMedizin.de

- Der Teilnahmezeitraum beträgt 12 Monate, den Teilnahmeschluss finden Sie online beim CME-Kurs.
- Fragen und Antworten werden in zufälliger Reihenfolge zusammengestellt.
- Pro Frage ist jeweils nur eine Antwort zutreffend.
- Für eine erfolgreiche Teilnahme müssen 70 % der Fragen richtig beantwortet werden.

? Neuere Technologien der Marknagelung zielen in der Regel darauf ab, ...

- die verschiedenen Nagelsysteme zu vereinheitlichen.
- das Risiko einer Knocheninfektion nach Osteosynthese zu minimieren.
- die Stabilisierung gelenkbeteiligender Frakturen an der proximalen Tibia minimalinvasiv durchzuführen.
- einen Großteil der proximalen Humerusfrakturen einer intramedullären Osteosynthese zuzuführen.
- die Stabilität der Osteosynthese zu erhöhen und das Indikationsspektrum zu erweitern.

? Bezüglich der Biomechanik von Marknagelosteosynthesen trifft folgende Aussage zu:

- Bei der Marknagelung von Schaftfrakturen sollte der Isthmus nicht überbrückt werden.
- Der Marknageldurchmesser spielt bei der Marknagelosteosynthese eine untergeordnete Rolle.
- Ein Marknagel bietet als zentraler Kraftträger eine relativ niedrige axiale Stabilität.
- Torsionsmomente werden im Wesentlichen über die Verriegelungsschrauben des Nagels aufgenommen.
- Aufgebohrte Nageltechniken bieten biomechanisch keinen Vorteil.

? Welche der folgenden Verriegelungsoptionen ist bei einer Marknagelosteosynthese am ehesten zu empfehlen?

- Eine statische Verriegelung ist bei instabilen Frakturformen im Schaftbereich nicht sinnvoll.

- Die dynamische Verriegelung mit Kompression bietet bei instabilen Frakturformen im Schaftbereich mehr Stabilität.
- Bei der aktiv vorkomprimierten, statischen Verriegelung wird der Frakturspalt aktiv komprimiert. Danach wird zusätzlich zur proximalen Verriegelungsschraube im Längsloch eine weitere Verriegelungsschraube im Rundloch appliziert.
- Bei einem kurzen Frakturfragment bietet eine einzelne Verriegelungsschraube ausreichende Torsionsstabilität.
- Eine 4 mm durchmessende Verriegelungsschraube bietet die gleiche Torsionsstabilität wie eine 5 mm durchmessende Verriegelungsschraube.

? Die Dynamisierung eines Femurmarknagels erfolgt durch Entfernung ...

- der proximalen Verriegelungsschrauben in den (statischen) Rundlöchern.
- aller proximalen Verriegelungsschrauben (statische Rundlöcher und ovales Gleitloch).
- der distalen Verriegelungsschrauben.
- der proximalen und distalen Verriegelungsschrauben.
- des primär eingebrachten Marknagels und Neuinsertion eines kaliberstärkeren Nagels im Sinne einer Marknagelwechsellagerung.

? Welche Aussage zur intraoperativen Reposition von Schaftfrakturen des Femurs trifft zu?

- Für die Korrektur der Schaftachse ist allein der korrekte Eintrittspunkt des Marknagels wichtig.

- Durch die Möglichkeit der intraoperativen radiologischen Kontrolle sind Torsionsabweichungen insbesondere bei mehrfragmentären Frakturen selten beschriebene Komplikationen.
- Unter Beachtung des entsprechenden Nageldurchmessers stellt sich die Länge des Femorrohrs automatisch anatomisch korrekt ein.
- Bei der Marknagelosteosynthese bietet die stabile Seitenlage die Möglichkeit, eine intraoperative radiologische Torsionskontrolle durchzuführen.
- Die Adipositas und das männliche Geschlecht stellen ein erhöhtes Risiko für Fehlrepositionen dar.

? Die offene Oberschenkelchaftfraktur ...

- sollte erst nach Abheilung der Komplikationswunde operativ versorgt werden.
- sollte mit einer Kleinfragment-Plattenosteosynthese stabilisiert werden.
- ist für eine temporäre Stabilisierung mit dem Fixateur externe ungeeignet.
- kann nach durchgeführter Marknagelosteosynthese frühfunktionell nachbehandelt werden.
- bedarf in der Regel einer mindestens sechswöchigen Antibiotikatherapie.

? Welche Aussage trifft am ehesten zu? Bei der Marknagelosteosynthese einer Tibiaschaftfraktur ...

- sollte eine ungebohrte Marknagelosteosynthese durchgeführt werden.
- ist ein Nageldurchmesser von maximal 8 mm ausreichend.
- ist die offene Frakturpositionierung mit Spongiosaanlagerung zu empfehlen.
- sollte der Patient auf einem Extensionstisch positioniert werden.

- bieten drei distale Verriegelungsschrauben bei distal gelegenen Schaftfrakturen eine hohe Torsionsstabilität.
- ? Bei der operativen Stabilisierung der Femurschaftfrakturen ...**
 - sollte der Marknagel bei Trümmerfrakturen antegrad eingebracht werden.
 - sollte der Marknagel bei gleichzeitig vorliegender Schenkelhalsfraktur retrograd eingebracht werden.
 - erfolgt sinnvollerweise im Rahmen einer Kettenverletzung der unteren Extremität die offene Plattenosteosynthese.
 - kann eine offene Reposition auch bei der Marknagelosteosynthese erforderlich sein.
 - darf nach initialer Stabilisierung mit Fixateur externe kein Verfahrenswechsel mit Marknagelosteosynthese durchgeführt werden.
- ? Für die Stabilisierung der Mehretagenfraktur im Rahmen einer Polytraumaverletzung bedeutet das DCO-Konzept:**
 - Die instabile Femurfraktur sollte trotz langer Operationszeit am Unfalltag primär und definitiv versorgt werden.
 - Ein einzeitiges Verfahren ist einem 2-zeitigen Verfahren in der Regel vorzuziehen.
 - Die Implantatkombination DHS für die pertrochantäre Fraktur und Fixateur externe für die Schaftfraktur bietet nur eine geringe Lagerungsstabilität für den Patienten auf der Intensivstation.
 - Am Unfalltag ist eine limitierte Operationszeit günstig für den Polytraumapatienten.
 - Die Osteosynthese mit zephalomedullärem Implantat ist das einzige Verfahren, dass das DCO-Konzept beachtet.
- ? Mittel der Wahl zur Behandlung von hypertrophen Pseudarthrosen des Tibiaschafts nach Marknagelosteosynthese ist:**
 - Pseudarthrosenresektion und Plattenosteosynthese
 - Pseudarthrosenresektion, unaufgebohrte Austauschmarknagelung und Anlagerung von BMP
 - Aufgebohrte Austauschmarknagelung
 - Aufgebohrte Austauschmarknagelung und Anlagerung von BMP
 - Pseudarthrosenresektion, Plattenosteosynthese und Anlagerung von BMP

Doppelt punkten!

Schon gewusst: Als Abonnent von *Der Unfallchirurg* nehmen Sie kostenlos an Fortbildungen von *Der Orthopäde* teil!



Aktuelle Fortbildungen in *Der Orthopäde*

- Therapeutische Anwendung von Stammzellen in der Orthopädie
- Lehre in Orthopädie und Unfallchirurgie
- Aktuelle Trends in der Diagnostik & Behandlung der anteroinferioren Schulterinstabilität
- Spondylodisitis
- Kubitaltunnelsyndrom
- Arthrose des oberen Sprunggelenks



www.SpringerMedizin.de/cme



Gratis teilnehmen!

So nehmen Sie teil:

1. Melden Sie sich auf SpringerMedizin.de/cme mit Ihren Zugangsdaten an.
2. Es werden Ihnen automatisch die Fortbildungen beider Zeitschriften angezeigt. Um den Service nutzen zu können, muss Ihre Abonummer unter „Meine Daten“ hinterlegt sein.
3. Gewünschte Fortbildung auswählen, „Kurs starten“ und CME-Punkte sammeln.

