

Kompressionsmarknagelung langer Röhrenknochen

Zusammenfassung

Das biomechanische Prinzip der komprimierten intramedullären Osteosynthese beruht auf der Einbringung eines unverklemmten Marknagels, der distal statisch in Rundlöchern und proximal dynamisch in einem Gleitloch verriegelt wird. Durch Distraction des Nagels gegen die proximale Verriegelungsschraube mittels einer Schubschraube kommt es zur Relativbewegung des proximalen Fragmentes mit Distalwanderung über Nagel, die zu einem direkten Kontakt der Hauptfragmente mit zunehmender Kompression führt.

Günstige Indikationen zur Anwendung der Kompressionsmarknagelung stellen im Schaftbereich der langen Röhrenknochen einfache Frakturformen, Pseudarthrosen und Osteotomien dar. Weiterhin können Arthrodesen am Knie und an den Sprunggelenken hochstabil versorgt werden. Wesentliche Positiveffekte bestehen in der kontrollierten Fragmentadaptation und einer gegenüber konventionellen Marknageltechniken deutlich erhöhten Stabilität der Fraktur insbesondere auch im Hinblick auf Rotationskräfte.

Aus den biomechanischen Vorteilen resultiert für die Behandlung von Frakturen eine frühe Vollbelastbarkeit und in der Therapie von Frakturheilungsstörung eine hohe Durchbauungsrate. Unter der Voraussetzung optimierter Implantate und Instrumentationen hat die komprimierbare intramedulläre Osteosynthese durchaus das Potential, Spektrum und Wirksamkeit der Marknagelung weiter zu verbessern.

Schlüsselwörter

Kompressionsmarknagelung · Frakturen langer Röhrenknochen · Femurosteotomien · Tibiapseudarthrose · Sprunggelenkarthrodese

Entwicklung des Kompressionsprinzips

Die aktive, durch das Implantat vermittelte Kompression einer Fraktur oder Osteotomie wurde schon frühzeitig für die Platten- und Schraubenosteosynthese mittels Zugschraubentechnik, Plattenspanner und Einführung der dynamischen Kompressionslöcher verwirklicht. Erste Versuche, diese Prinzipien auch auf die Marknagelung zu übertragen, wurden seit dem Ende der 1950er Jahre so von Olerud [30] und Kaessmann [24] unternommen. Hauptproblem dieser ersten Kompressionsmarknageltechniken war die Übertragung der sehr hohen intrafragmentären Kompressionskräfte auf den Knochen selbst.

Es zeigte sich, dass metaphysär überwiegend spongiös verankerte Implantate nicht geeignet waren, eine definierte Kompression über längere Zeit und schon gar nicht unter funktioneller Belastung zu halten. Entsprechend konnten sich diese spongiös veranker-

ten Implantate trotz erster positiver klinischer Erfahrungsberichte [3, 8, 22, 23, 25] nicht durchsetzen und fanden keine breite Anwendung. Parallel entwickelten Ritter [33] und Mittelmeier [28] Kompressionsmarknägeln, deren Wirkungsweise auf einer kortikalen Abstützung der Verriegelungsbolzen beruhten und somit eine sehr hohe Krafteinbringung erlaubten. Das Grundprinzip wurde zunächst für die anterograde Nagelung des Femur beschrieben und hat sich in dieser Form für alle gängigen Kompressionsmarknagelungen der Röhrenknochen an der oberen und unteren Extremität mit verschiedenen Zugangswegen durchgesetzt.

Das biomechanische Prinzip beruht auf der Anwendung eines intramedullären Implantats, das unverklemmt in die Markhöhle eingebracht wird und nach Verriegelung Relativbewegungen der Fragmente gegeneinander induziert (Abb. 1). Das Implantat wird an der Nagelspitze zunächst mittels herkömmlicher Verriegelungsschrauben mit dem distalen (bei retrograder Technik entsprechend dem proximalen) Hauptfragment fest verbunden. Anschließend wird das andere, dem Nageleintrittspunkt entsprechende Hauptfragment über ei-

Prof. Dr. V. Bühren
BG-Unfallklinik Murnau,
Professor-Küntschers-Straße 8, 82418 Murnau,
E-Mail: buehren@bgu-murnau.de

V. Bühren

Intramedullary compression osteosynthesis

Abstract

The biomechanical principle of intramedullary compression osteosynthesis is based on the implantation of a movable intramedullary nail that is statically interlocked in distal round holes and dynamically interlocked in a proximal slot. Distraction of the nail against the proximal interlocking screw by means of a compression screw leads to a relative movement of the proximal fragment directed distally against the nail. This results in direct contact of the main fragments under increasing compression.

Simple fractures, pseudarthroses and osteotomies within the diaphyses of the long bones represent promising indications for the use of compression nailing. Furthermore, this method enables extraordinarily stable knee and ankle arthrodeses. Major positive aspects are controlled adaptation of fragments and a significantly increased stability of the fracture as compared to conventional intramedullary nailing techniques, especially as rotational forces are concerned.

The biomechanical advantages result in earlier full weightbearing and an increased rate of fracture union in delayed healing. Given the use of optimized implants and instruments, compression intramedullary osteosynthesis offers a remarkable potential for further improvement in both the spectrum and success of intramedullary nailing.

Keywords

Compression nailing · Fractures of long bones · Osteotomy of the femur · Pseudarthrosis of the tibia · Arthrodesis of the ankle

ne Verriegelungsschraube durch ein Schlitzloch im Nagel so fixiert, das eine axiale Relativbewegung zwischen Nagel und Schraube noch möglich ist. Über den Nagelkopf wird dann eine Schubschraube axial in den Nagel eingeführt, die über ein entsprechendes Maschinengewinde eine Distraction zwischen dem Nagelkopf und der Verriegelungsschraube im Schlitzloch aufbaut.

Diese Distraction führt zu einer Relativbewegung zwischen Marknagel und proximalem Fragment, wodurch der Marknagel aus dem Eintrittsloch herausgleitet, dabei im Gegenzug das proximale Fragment in Richtung Nagelspitze wandert und somit gegen das fixierte distale Fragment eine Kompression aufbaut.

Das vorstehende Prinzip ist zwischenzeitlich weltweit in mehrere intramedulläre Implantate integriert worden. Im deutschsprachigen Raum liegen größere Erfahrungen nunmehr für den AO-Universalnagel am Femur, den UHN (ungebohrter Humerusnagel, Fa. Synthes) sowie für die IC-Nägel an Femur und Tibia (Interlocking Compression Nail, Fa. Stryker-Howmedica) vor [11].

Biomechanik

Bedeutsamstes Wirkprinzip der Kompressionsmarknagelung ist die signifikante Stabilitätssteigerung der Gesamtmontage durch Pressung im Fraktur- bzw. Osteotomiespalt. In Abhängigkeit von der Knochenqualität können am Femur Kompressionskräfte bis 4000 N (entsprechend ca. 400 kg) und an der Tibia bis zu 1800 N (entsprechend ca. 180 kg) aufgebaut werden [26].

Limitierend ist in erster Linie die Verankerung des proximalen Verriegelungsbolzens im Knochen, die von der Knochenqualität abhängt und z. B. bei der Osteoporose eingeschränkt sein kann [34]. Bei guter Knochenqualität wird die Festigkeit des proximalen Verriegelungsbolzens limitierend, der sich bei hohen Kompressionen zu verformen beginnt (s. Abb. 1b).

Durch die Pressung im Frakturspalt gewinnt der frakturierte Knochen eine hohe Eigenstabilität vorzugsweise gegen Rotationskräfte, aber auch gegenüber Achsdeformitäten im Varus-Valgus-Sinn und gegenüber Ante- und Retroversion zurück. Der Nagel kann im Sinne einer Zuggurtung wie ein zentral axial einlie-

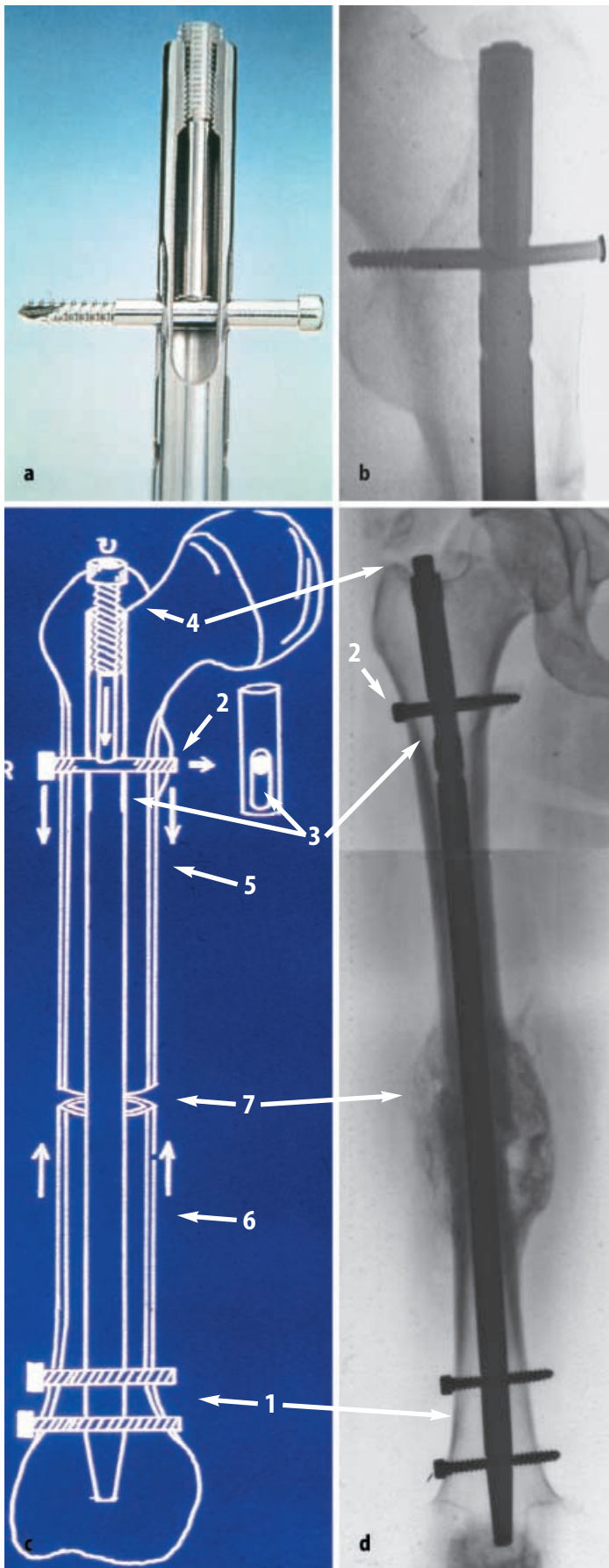
gender Spanndraht betrachtet werden, der Zugkräfte so auf den Knochen überträgt, dass sie in stabilisierende Druckkräfte umgewandelt werden.

Höhe und Dauer des Stabilitätsgewinns sind von der Knochenqualität und -biologie sowie von der Frakturform abhängig. Den Idealfall stellt eine einfache Querfraktur in Schaftmitte dar, wenn durch nahezu anatomische Reposition eine großflächig kortikal verzahnte Kontaktaufnahme der beiden Hauptfragmente gelingt (Abb. 2). Es resultiert eine sehr hohe Rotationsstabilität, die naturgemäß bei Stabilisierung einer iatrogen gesetzten queren Osteotomie mit einer ebenen Kontaktfläche geringer ausfallen wird. Auch für diesen Fall konnte jedoch an Leichenknochen gezeigt werden, dass die erreichbare Primärstabilität gegen Rotationskräfte naturgemäß Konkurrenzverfahren wie die aufgebohrte Marknagelung oder die nicht komprimierte Verriegelungsmarknagelung bei weitem übertrifft und in der Größenordnung die Plattenosteosynthese erreicht [2, 29, 32].

In der Biegestabilität ist die komprimierte Marknagelung der Plattenosteosynthese deutlich überlegen und erlaubt daher vom Prinzip her und der klinischen Erfahrung entsprechend eine sofortige Vollbelastung der unteren Extremität [13].

Von der herkömmlichen dynamischen Verriegelung unterscheidet sich die Kompressionsmarknagelung durch die aktiv eingebrachte hohe Kompression im Frakturspalt. Unter physiologischer Belastung können bei der dynamischen herkömmlichen Marknagelung im Frakturbereich z. B. bei Be- und Entlastung des Beines sog. Nulldurchgänge entstehen. Bei Belastung treten Kompressionskräfte in der Größenordnung des Körpergewichts auf, während bei Entlastung Zugkräfte durch das Eigengewicht der Extremität bis hin zu einer Distraction im Frakturspalt wirksam werden. Unter aktiver Kompression addiert sich unter Belastung die aktiv eingebrachte Vorkompression mit der Körperlast, während unter Entlastung die aktive Kompression der Distraction entgegenwirkt, sodass immer eine Grundkompression als positive Baseline im Frakturspalt erhalten bleibt.

Während die biomechanischen Verhältnisse am Leichen- und Kunstknochen relativ präzise abgeklärt sind, ist



über das Verhalten aktiv vorkomprimierter Marknägel in vivo nach Implantation am Menschen wenig bekannt. Es ist davon auszugehen, dass sich unter funktioneller Belastung die primär eingebrachte Kompression durch Mikroauslockerung der Verriegelungsbolzen und Resorptionsvorgänge im Frakturspalt verringern wird. Da eine Nachsinterungsmöglichkeit des proximalen Verriegelungsbolzens im Schlitzloch prinzipiell erhalten bleibt, ist jedoch auch für den schlechtesten Fall eines Kompletterlustes der aufgebrachten Kompression immer noch die günstige Situation einer konventionellen dynamischen Verriegelung unter verbleibender Rotationsstabilisierung im proximalen Längsloch erhalten.

Prinzipien der Instrumentierung und Operationstechnik

Für die Anwendung einer Kompressionsmarknagelung sind bezüglich Biologie und Implantat Grundvoraussetzungen definierbar. Die knöcherne Situation muss bezüglich der Frakturform oder der Osteotomielokalisation definitiv axial belastbar sein. Prinzipiell bilden somit einfache Frakturformen, Knochenheilungsstörungen ohne Defekt wie z. B. hypertrophe Pseudarthrosen und geplante Osteotomien gute Indikationen. Gleiches gilt für Arthrodesen am Knie und oberen Sprunggelenk, wenn keine wesentlichen Defekte vorhanden sind. Metaphysär gelegene Frakturen und Osteotomien sind bezüglich der Kompressionsmöglichkeit ungünstig zu beurteilen.

Zunächst ist die druckresistente Kortikalis in diesen Bereichen deutlich geringer ausgeprägt, so dass ein redu-

Abb. 1a–d ◀ **Prinzip der Kompressionsmarknagelung.** a Schnittbild des Kopfes eine Kompressionsmarknagels, die axiale Schubschraube wird im Nagelkopf geführt und schiebt die quere Verriegelungsschraube in einem Schlitzloch nach unten. b Klinisches Bild mit auf Kompression gesetzter Schubschraube, zu beachten ist die Wanderung der queren Verriegelungsschraube im Schlitzloch nach distal sowie die Durchbiegung aufgrund der hohen Kompression. c Schemazeichnung einer Kompressionsmarknagelung am Femur. d Klinisches Bild einer unter Kallusbildung verheilten Kompressionsmarknagelung (1 Komplettverriegelung des distalen Fragments, 2 proximale quere Verriegelungsschraube, 3 schlitzförmiges Längsloch des Nagels, 4 Schubschraube im Nagelkopf, 5 Relativbewegung des proximalen Fragments über den Nagel nach distal, 6 Relativbewegung des distalen Fragmentes mit dem Nagel nach proximal, 7 Adaptation und Kompression im Frakturspalt)

zierter kortikaler Flächenkontakt resultiert. Durch den Kalibersprung zwischen den Fragmenten besteht die Gefahr des Eintauchens des im Durchmesser kleineren kortikal starken Schaftfragments in das breite spongiöse metaphysäre Gelenkfragment. Da auf der Nageleinschlagseite nur mit einem Verriegelungsbolzen und zudem in einem Längsloch verriegelt wird, ist für das Einschlagfragment eine längerstreckige medulläre Führung des Nagels zu fordern. Letztendlich ist die Anwendung der Kompression für den Marknagel somit auf den Schaftbereich, in der Fünftelteilung der langen Röhrenknochen auf die mittleren 3/5 beschränkt.

Die Implantate zur Kompressionsmarknagelung sollen im Markraum gleiten können und müssen so dimensioniert sein, dass die mittels Schubschraube aufgebrachten Kräfte ohne wesentliche Implantatdeformierungen auf den Knochen übertragen werden können. Die erstgenannte Bedingung beinhaltet, dass eine Schlitzung der Marknägel zur Verklemmung nicht notwendig ist und naturgemäß die Steifigkeit der Implantate unnötig herabsetzen würde. Zur Anwendung kommen daher Vollrohr- oder solide Implantate mit Durchmessern, die eine unaufgebohrte oder nur maginal, vorwiegend metaphysär gebohrte Nageltechnik beinhalten. Gebräuchliche Durchmesser sind 10–13 mm am Femur sowie 9–12 mm an der Tibia, wobei die größeren Durchmesser vorzugsweise in der Revisionschirurgie zum Einsatz kommen.

Die genannten Nageldurchmesser erlauben den Einsatz von 5 mm Verriegelungsbolzen, die als Schaftschrauben oder als Bolzen mit mehr als 4 mm Kerndurchmesser kräftig genug sind, um die Kompression ohne hochgradige Durchbiegung aufzunehmen. Bei Nageldurchmessern unter 9 mm, wie für manche Situationen an der Tibia notwendig und am Humerus gängig, lassen sich nur Verriegelungsbolzen der Stärke 4 mm oder kleiner verwenden. Diese Bolzen sind bezüglich der Lastaufnahme über die Schubschraube deutlich limitiert und müssen mit dosierten Drehmomenten angezogen werden, um wesentliche Deformierungen zu vermeiden.

Prinzipiell kommen 2 Verriegelungskonstellationen in der Kompressionsmarknagelung zum Tragen, zum einen die aktiv vorkomprimierte dynami-

sche Verriegelung und zum anderen die aktiv vorkomprimierte statische Verriegelung. Bei der aktiv vorkomprimierten dynamischen Verriegelung wird über die Schubschraube in der klinischen Praxis nach Gefühl und unter Bildwandlerbeobachtung des Frakturspaltes eine Kompression aufgebracht, die dem Anziehen einer gut sitzenden Kortikalischraube entsprechen soll. Bei hohem Drehmoment und beginnendem Durchbiegen des proximalen Querbolzens wird der Kompressionsvorgang beendet. Der noch verbliebene freie Weg der proximalen Verriegelungsschraube im Längsloch stellt somit eine prinzipielle Dynamisierungsmöglichkeit für die Fraktur im weiteren Verlauf dar.

Bei der aktiv komprimierten statischen Verriegelung wird in Analogie zur vorstehenden Methode zunächst eine aktive Kompression in den Frakturspalt eingebracht. Anschließend wird zusätzlich zum proximalen Verriegelungsbolzen im Längsloch ein 2. Verriegelungsbolzen im Rundloch eingebracht, der die Gesamtsituation statisch blockiert.

Nachteilig ist die fehlende Nachsicherungsmöglichkeit im Sinne der Frakturdynamisierung. Als Vorteil wird durch den Verriegelungsbolzen im statischen Rundloch die Stabilität im Sinne einer deutlich besseren Fixierung des proximalen Fragmentes an den Nagel erhöht. Dies ist z. B. bei einem relativ kurzen proximalen Fragment mit nur kurzstreckiger medullärer Führung des Nagels sinnvoll. Auch in Situationen mit wünschenswerter Vorkompression aber relativer axialer Instabilität und drohender Verkürzung kann eine derartige Verriegelung zur Anwendung kommen.

Eine weitere Modifikation der Kompressionsanwendung stellt die sekundär aktive Nachkompression im Intervall nach Erstimplantation dar. Diese kommt z. B. nach Frakturkonsolidierung unter zunächst statischer Verriegelung in Betracht. Zunächst wird der statisch verriegelnde proximale Bolzen im Rundloch entfernt und anschließend über die schon eingebrachte Schubschraube die teilkonsolidierte Fraktur komprimiert.

Eine weitere Variante kommt dann zur Anwendung, wenn die dynamische Mobilisierungsstrecke im Längsloch völlig aufgebraucht ist und der proximale Verriegelungsbolzen praktisch in statischer Position steht. Hier kann in der dynamischen Position des Längsloches

oberhalb der ursprünglichen Bohrung eine Neupositionierung des proximalen Verriegelungsbolzens erfolgen, der dann erneut über die volle Länge des Längsloches verschoben werden kann.

Indikationen

Indikatorisch richtungsweisend für die Anwendbarkeit der Kompressionsmarknagelung ist die axiale Stabilität der knöchernen Gesamtsituation. Komplexe Frakturformen würden unter Anwendung der Kompression eine nennenswerte Verkürzung erfahren und fallen daher indikatorisch aus dem Spektrum.

Im eigenen Krankengut mit mehreren 100 Fällen hat sich gezeigt, dass sowohl am Femur wie an der Tibia bei einem gemischten Patientengut von Mono- und Polytraumen recht exakt 40% der Frakturen als kompressionsgeeignet eingestuft werden [11].

In der rekonstruktiven Knochenchirurgie mit Versorgung von Frakturheilungsstörungen, etablierten Pseudarthrosen und Korrektur von Achs-, Rotations- und Längenabweichungen bestehen im eigenen Patientengut für 90% der Fälle die prinzipiellen Voraussetzungen zur Anwendung der Kompression.

Frakturen

Geeignet sind einfache Frakturformen des diaphysären Schaftabschnittes von Femur, Tibia und Humerus. In der eigenen Erfahrung werden für alle 3 Knochen ante- und retrograde Zugänge gewählt, die sich prinzipiell bezüglich der Kompressionsmöglichkeit nicht unterscheiden [20]. Prinzipiell verriegeln wir an der Nagelspitze mindestens mit 2 Bolzen, bei relativ kurzem Hauptfragment, so z. B. bei Tibiafrakturen am distalen Drittelpunkt oder bei retrograder Humerusnagelung mit Fraktur am proximalen Drittelpunkt über gekreuzte Schrauben in lateraler bzw. a.-p.-Position.

Entscheidend für die Komprimierbarkeit der Fraktur ist der kortikale Kontakt der beiden Hauptfragmente. Dieser kann durch Ausbruch kleiner Zwischenfragmente, so z. B. typischerweise durch ein Schmetterlingsfragment, oder bei ungenügender Reposition vermindert sein. Als Faustregel gilt, dass die Hauptfragmente mindestens mit halber Schaftzirkumferenz in Kontakt stehen sollten. Grundsätzlich wird





Abb. 3a–d ◀ **Femurfraktur AO-Klassifikation 32/A1.2. a Einfache spiralförmige Fraktur bei einem paraplegischen Patienten mit deutlicher Markraumerweiterung und Kortikalisverdünnung. b Unter Kompression deutliches Teleskopieren der Fraktur mit Eintauchen der Fragmente. c, d Daher statische Komplettverriegelung. Cave: A 1-Frakturen sind bezüglich ihrer axialen Stabilität kritisch zu beurteilen**

der Kompressionsvorgang in der Frakturlinie mit dem Bildwandler beobachtet. Setzt unter Kompression ein Teleskopieren mit Eintauchen der Fragmente ein, wird die Verriegelung im Zweifelsfall in eine statische Form überführt (Abb. 3).

Grundsätzlich wird die Frakturposition geschlossen durchgeführt. Wir verwenden hierzu eine gering metaphysär aufgebohrte Marknageltechnik ohne kortikales Reaming. Die Frakturposi-

tion wird zunächst über einen Führdraht vorgenommen, der im distalen Fragment sorgfältigst zentral positioniert wird. Unter der Voraussetzung, dass auch der Einschlagpunkt exakt in der Marknagelachse eingebracht worden ist, ergibt sich bei ausreichender Marknagelstärke eine automatische Reposition der Kortikalisanteile aufeinander.

Frakturen im metaphysären Bereich eignen sich prinzipiell nicht für eine primäre Kompression, da es nahezu immer zu einem Eintauchen des Schaftfragmentes in das breitere metaphysäre Fragment kommt. Mit Vorsicht sind auch langstreckige Spiralfrakturen zu komprimieren, da es zu einem Drehgleitvorgang der Fragmente kommen kann, der neben einer Verkürzung auch zu einer Verwindung mit hoher Belastung des Bolzens im Längsloch führt. Auch diese Situation sollte im Zweifelsfall statisch verriegelt werden.

Mehretagenbrüche eines Knochens sind immer entsprechend der bezüglich axialer Stabilität schwächsten Kompo-

nente zu verriegeln, in der klinischen Praxis bedeutet dies nahezu immer den Übergang auf eine statische Verriegelung. Nur in seltenen Fällen kann nach sehr kritischer Analyse ein ausgebrochenes Schaftsegment über den Nagel aufgefädelt und anschließend über die Kompression eingepasst werden. Für die komplexen Fraktursituationen besteht häufiger eine gute Indikation zu einer sekundären Kompression, um bei abgeheilten metaphysären Frakturkomponente die Schaftfraktur rascher zum Ausheilen zu bringen.

Pseudarthrosen

Mit Ausnahme atropher und infektiöser Defektpseudarthrosen stellen ausbleibende Heilungen der Röhrenknochen im Schaftbereich eine Paradeindikation für die Kompressionsmarknagelung dar [1]. Wir führen in diesen Fällen eine mäßiggradige Aufbohrung des Markraumes durch, die im Ausmaß 1–1,5 mm nach erstem Markraumkontakt des Bohrers umfasst. Anschließend wird die Marknagelung mit einem Nageldurchmesser 1 mm unter Bohrergröße durchgeführt und mit bezüglich Knochenqualität und Implantat größtmöglichem Drehmoment komprimiert (Abb. 4, 5).

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich für Tibia und Femur eine prinzipielle Mobilisierungsmöglichkeit unter Vollbelastung, die in der klinischen Praxis mit Abschwellung nach wenigen Tagen von den Patienten auch wahrgenommen wird [12, 14].

Am Unterschenkel gibt es häufiger die Situation, dass eine tibiale Pseudarthrose bei abgeheilten Fibula besteht. In diesen Fällen führen wir regelmäßig eine Dynamisierung der Fibula durch Teilresektion oder bei nur geringgradiger notwendiger Verkürzung als schräge Osteotomie durch. Die Fibula wird zur Stabilitätserhöhung mittels Zuggurtung über 2 Einzelschrauben stabilisiert [15]. Diese Technik erlaubt auch für die Fibula im Verlauf eine Dynamisierungsges-

Abb. 2 ◀ **a Unterschenkelfraktur AO-Klassifikation 42/A3.3 mit kleinem ausgesprengtem Keil. Die Fraktur ist als axial stabil anzusehen. b Nach Auffädeln auf den Nagel unter Kompression anatomische Frakturposition unter Einziehen der Fragmente. Gute Indikation für die Kompressionsmarknagelung. c Oberschenkelfraktur AO-Klassifikation 32/A 3.2. Ideale Indikation für eine Kompressionsmarknagelung. d Nach Auffädeln auf den Nagel unter Kompression anatomische Reposition der Hauptfragmente, postoperativ rasche Aufbelastung möglich**



Abb. 4 ▲ a Pseudarthrose Oberschenkel nach improvisierter Plattenosteosynthese. b Bei durchbaunder Kondylenfraktur Plattenentfernung und mäßig aufgebohrte Kompressionsmarknagelung ohne Spongiosaanlagerung. c Postoperativ rasche Aufbelastung mit komplettem knöchernem Durchbau der Fraktur

möglichkeit, wobei sich der Defekt in nahezu allen Fällen spontan auffüllt (s. Abb. 8c).

Osteotomien

Küntscher hat Osteotomien unter verschiedenster Indikation zur Achsenkorrektur, Derotation und Verkürzung mit dem Marknagel stabilisiert. Seine bevorzugte Technik war dabei die Anwendung der Markrauminnensäge, die die knochenumgebenden Weichteile in optimaler Weise schont. Die von ihm angegebene aufgebohrte Marknagelungstechnik erreicht durch die Verklemmung des Nagels eine für die klinischen Belange offensichtlich ausreichende Rotationsstabilität.

Für quere Osteotomien ist bei Anwendung moderner, kleinkalibriger Marknägel mit Komplettverriegelung eine Rotationsstabilität in ausreichendem Ausmaß nicht zu erwarten. Die Instabilität resultiert aus dem zwangsläufigen Spiel der Verriegelungsbolzen innerhalb der Nagellöcher, das für einige solide Marknägel einen schon prinzipiell vorhandenen Freiraum von nahezu 20° ergibt. Hieraus folgt, dass derotierende Querosteotomien am Schaft in unaufgebohrter Technik für eine hinreichende Rotationsstabilität zwingend der komprimierten Technik bedürfen (Abb. 6, 7) [29, 32].

Die relativ häufig indizierte derotierende Osteotomie stellt in unserer Erfahrung eine elegante Anwendung für

die gedeckte Kompressionsmarknagelung dar. Das Derotationsausmaß wird vorgehend mit transkutanen Spickdrähten markiert. Die Osteotomie wird schonend mit der Innensäge an biomechanisch günstigster Stelle im mittleren Schaftabschnitt außerhalb des ehemals frakturierten Bereichs mit der stattgehabten Frakturheilung durchgeführt (s. Abb. 6c). Unter liegendem Marknagel werden die Spickdrähte in Flucht gebracht und anschließend wird kompressionsverriegelt [4, 9].

Auch Achsabweichungen vorzugsweise im Schaftbereich lassen sich mit Marknagelosteosynthesen korrigieren, wobei das hochsteife Implantat nach stattgehabter Osteotomie die Achse gewissermaßen eigenständig korrigiert (Abb. 8). Metaphysennahe Fehlstellungen bedürfen der sorgfältigen Planung und müssen hinsichtlich ihrer Eignung für eine Marknagelosteosynthese kritisch analysiert werden.

Verlängerungen nach posttraumatisch in Verkürzung ausgeheilten Schaftfrakturen lassen sich einzeitig mit einem Ausmaß von bis zu 2 cm über den Marknagel durchführen. Wir legen hierzu eine quere Osteotomie an, die wir anschließend mit dem Arthrodesenspreizer auf die gewünschte Länge aufdehnen. Interponiert werden bikortikale Beckenkammspäne. Diese werden zunächst mit einer milden Kompression eingeklemmt, zur Verhinderung von sekundären Dislokationen und Stauchung der Späne erfolgt dann die statische Verriegelung.

Arthrodesen

Die Indikation und Technik der Kniegelenkarthrodese hat mit der Etablierung der Kniegelenkersatzes deutliche Wandlungen und Einschränkungen erfahren. Die Mehrzahl der Arthrodesindikationen resultieren aus Defekt- und Infektsituationen, die eine Marknageltechnik für die Gelenkversteifung weitgehend ausschließen. Für wenige Fälle bleibt bei infektfreiem Befund und komprimierbarem planen Zuschnitt der Resektionsflächen die Durchnagelung des Gelenks mit anschließender Kompressionsverriegelung eine elegante Alternative. Verwendet werden hierzu im Prinzip überlange Femurmarknägel der Stärken 12 und 13, die über eine verstärkte Anteversion zur Vermittlung einer leichten Knieflexion verfügen.



Abb. 5a–d ▲ Oberarmschaftfraktur mit antegrader Marknagelung versorgt. a 7 Monate nach Frakturversorgung manifeste Pseudarthrose. b Zielaufnahme der Pseudarthrose die eine deutliche Dehizens der Hauptfragmente zeigt. c Zustand nach Kompressionsmarknagelung, Annäherung der Hauptfragmente auf nahezu anatomiegerechte Länge. d Ausheilungszustand bei einliegender komprimierter Marknagelung

Die Arthrodesese des oberen Sprunggelenks kann mit Spezialimplantaten durchgeführt werden, die sich durch eine extrem distale Verriegelungsmöglichkeit mit 2 gekreuzten Verriegelungsschrauben im rechten Winkel zueinander auszeichnen (Abb. 9c).

Bei Verwendung eines 10-mm-Marknagels mit 5-mm-Verriegelungsbolzen resultiert unter Kompression eine hochfeste Versorgung, die bezüglich Stabilität von keiner der sonst etablierten Therapieformen erreicht wird. Postoperativ kann gipsfrei nachbehandelt werden, bei guter Passform der Resektionsflächen und guter Knochenqualität kann regelmäßig nach 2 Wochen auf Vollbelastung übergegangen werden [21].

Wir wenden die Marknagelarthrodesese unter der Voraussetzung einer infektfreien Voranamnese für Situationen mit Gelenkfehlstellungen wie auch Arthrosen ohne wesentliche Achsabweichungen gleichermaßen an. Fehlstellungen werden nach Außenknöchelresektion durch Resektion ausgeglichen. Anschließend wird unter Fixierung der gewünschten Einstellung ein Führdraht eingebracht und eine aufgebohrte Marknagelung vorgenommen. In Situationen ohne oder mit geringer Deformität führen wir die Durchnagelung des Gelenkes im ersten Operationsschritt durch. Anschließend erfolgt die Resektion des Außenknöchels und eine tangentielle Überbohrung des Gelenkes mit 10 mm Boh-

rer vor und hinter dem Nagel (s. Abb. 9). Die entstandenen Bohrdefekte werden anschließend in Dübeltechnik mit Spongiosa aus dem Außenknöchel aufgefüllt. Anschließend wird die Gesamtsituation unter Kompression gesetzt [10].

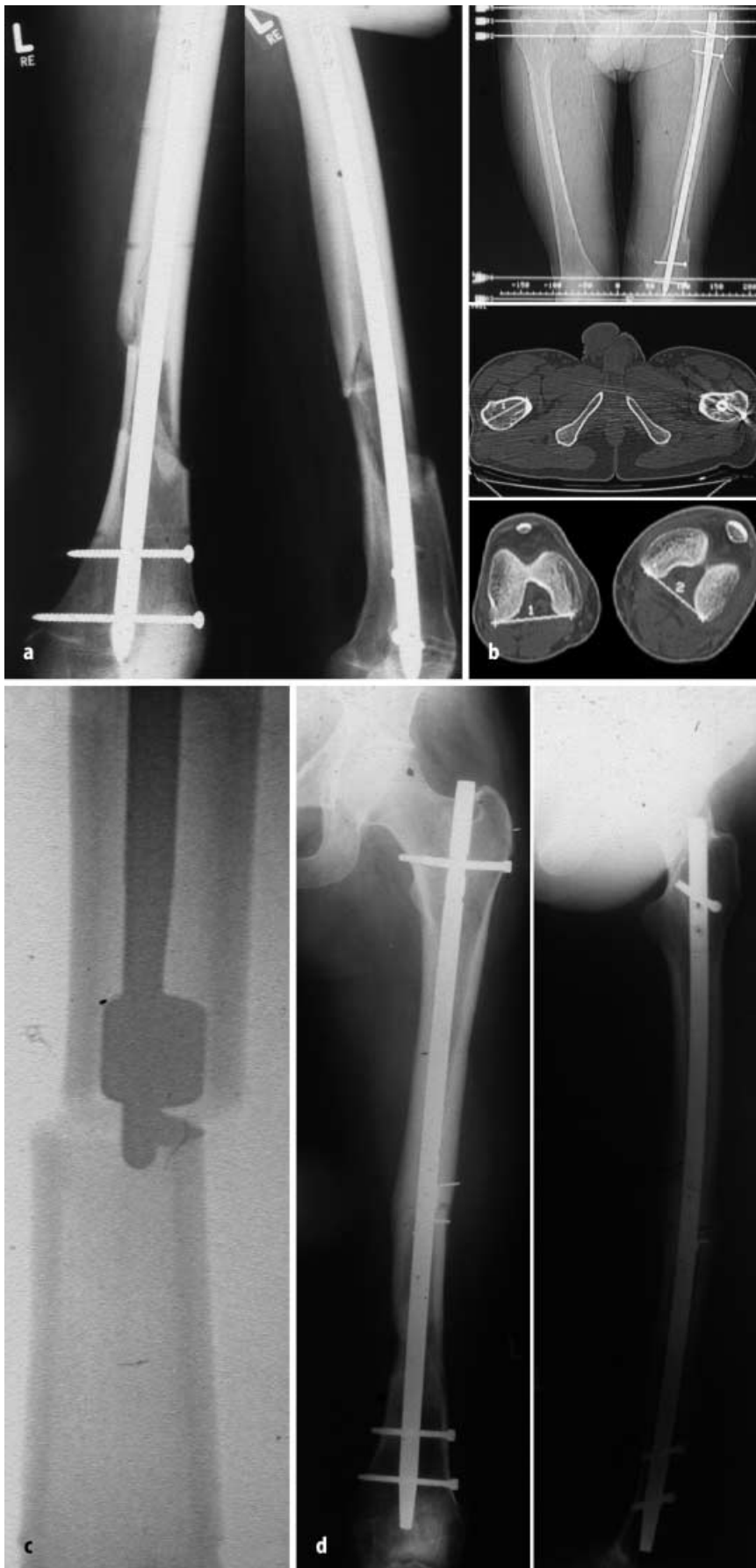
Diskussion

Im Schaftbereich der großen Röhrenknochen an den unteren Extremitäten sind etwa 40% der Frakturen prinzipiell für eine komprimierte Marknagelung geeignet. Inwieweit sich im Vergleich zu den heute üblichen Marknagelverfahren mit ungebohrten oder wenig gebohrten Implantaten unter statischer oder dynamischer Verriegelung tatsächlich klinisch nutzbare Vorteile ergeben, bleibt aufgrund fehlender vergleichender Studien unbewiesen. Naturgemäß ist darüber hinaus davon auszugehen, dass eine einfache Femurfraktur unter fachgerechter Anwendung jeglicher Nageltechnik komplikationslos ausheilen wird. Dennoch lassen sich unter kritischer Betrachtung Befundsituationen beschreiben, die von einer aktiv komprimierten Marknagelosteosynthese profitieren könnten.

In der Folge einer vermehrten Anwendung der ungebohrten Marknagelung mussten in den letzten Jahren zunehmend Frakturheilungsstörungen beobachtet werden, die infolge einer durch den Nagelvorschub induzierten Fragmentdehizens verursacht worden sind (s. Abb. 5) [17].

Unter statischer Verriegelung kann es in dieser Situation bei fehlender Dynamisierung, am Unterschenkel häufig durch eine schnell heilende und dann sperrende Fibula verstärkt, zur Pseudarthrosenbildung kommen. Zur Vermeidung einer derartigen primären Dehizens wird ein Stauchen der Extremität entweder durch direkte Weichteilmanipulation oder das Rückschlagen des Nagels unter alleiniger distaler Verriegelung vorgeschlagen.

Der Kompressionsmechanismus des Marknagels erlaubt eine wesentlich feiner dosierte Fragmentadaptation, die zu dem unter Bildwandlerlicht kalkuliert millimetergenau eingestellt werden kann. In einer Vielzahl der Fälle konnten wir zudem beobachten, dass insbesondere bei frischer Frakturversorgung die Fragmentenden unter Führung über den Marknagel millimetergenau einrasten und so auch bei geschlossener Marknagelung eine anatomische Reposition resultiert (s. Abb. 2).



Selbstverständlich wird auch bei dynamischer Verriegelung unter zunehmender Teilbelastung des Beines ein ähnlicher Mechanismus wirksam. Ist diese Lastaufnahme jedoch nicht möglich, so z. B. beim ans Bett gefesselten Schwerstverletzten oder bei nicht belastungsstabiler Zusatzverletzung der gleichen Extremität, vermittelt die Kompression eine sichere Adaptation der Fraktur trotz fehlender Gewichtsbelastung. Weiterhin ist theoretisch zu erwarten, dass zumindest in der ersten Heilungsphase die Wundschmerzen aufgrund fehlender Mikrobewegungen verringert sind. Diese Annahme bestätigt sich in der klinischen Erfahrung, in unserem Patientengut hat diese Tatsache zu einem signifikant verkürzten stationären Aufenthalt bei kompressionsverriegelten Unterschenkelfrakturen geführt [13].

Wesentlich erscheint die deutlich höhere Rotationsstabilität für die komprimierte Marknagelosteosynthese insbesondere für Humerusfrakturen [2]. Operationsindikationen stellen hier die hoch instabilen Bruchformen und die Versorgung beim Mehrfachverletzten dar, der in der Regel auf den Arm auch in Abstützfunktion angewiesen ist. Außerdem entfällt am Arm naturgemäß der Gesichtspunkt einer natürlichen Gewichtsbelastung, die Dynamisierung wird lediglich durch den Muskelzug vermittelt, der bei entsprechender Weichteilerstörung in erheblichem Maße gemindert sein kann.

Für hypertrophe Pseudarthrosen beinhaltet die Kompressionsmarknagelung alle bekannten wirksamen Therapieprinzipien: Aufbohrung mit Anfrischung, Osteosynthese unter starker Fragmentpressung und hohe Stabilität zur ungestörten Knochenheilung. Die theoretischen Vorteile bestätigen sich in den eigenen Ergebnissen mit insgesamt 112 Patienten mit jeweils 56 Pseudarthrosen des Femurs und der Tibia, die über einen 3-Jahres-Zeitraum behandelt wurden

Abb. 6a–d ◀ **Drehfehlerkorrektur Oberschenkel.**
 a Nach primärem Fixateur externe mit ungebohrtem Femurmarknagel versorgte Oberschenkelfraktur. b Im Mess-CT Rotationsfehler linksseitig im Vergleich zur Gegenseite von 40° Außenrotation. c Osteotomie mit Innensäge in Schaftmitte und Derotation. d Stabilisierung mit Kompressionsmarknagel, rasche Aufbelastung und zeitgerechte Ausheilung



[11]; 92% der Fälle heilten nach Erstein-griff aus, in jeweils 4 Fällen waren sekundäre Nachkompressionen bzw. Marknagelwechsel als Zweitoperation erforderlich, mit jeweils anschließender Ausheilung. Die Serie war kompliziert durch 2 septische Verläufe, wobei lediglich eine Tibiafraktur unter Fixateur externe zur Ausheilung gebracht werden musste.

Aufgrund der biomechanischen Datenlage ist für nicht oder wenig aufgebohrte intramedulläre Osteosynthesen lediglich die Kompressionsmarknagelung in der Lage, eine quere Osteotomie suffizient gegen Rotation zu stabilisieren. Ohne Kompression muss je nach verwendetem Implantat mit spontanen Rotationsmöglichkeiten durch Spiel in den Verriegelungslöchern von bis zu 20° gerechnet werden. Wir haben im genannten Zeitraum 41 Fehlstellungen korrigiert, davon 19 Rotationsabweichungen am Femur. Bezüglich Patientenzufriedenheit wurden vorzugsweise auch durch die frühe Vollbelastbarkeit überdurchschnittlich gute Werte erzielt bei zeitgerechter Ausheilung aller Osteotomien. Die Serie war lediglich durch ei-

ne septische Komplikation bei einem Patienten mit femoraler Valguskorrektur belastet.

Unter Einsatz der schon von Künt-scher beschriebenen Innensäge lassen sich Dreh- wie auch in begrenztem Maße Achskorrekturen in defakto minimal-invasiver Technik durchführen. Der Nachteil einer im Schaftbereich deutlich verlängerten Heilungszeit gegenüber Osteotomien metaphysennah ist durch die sofort belastungsstabile Versorgung irrelevant, da sie für den Patienten zu keinen funktionellen Einschränkungen führt. In unserem Krankengut werden zunehmend Patienten mit komplexen posttraumatischen Fehlheilungen beobachtet, die neben den Achsabweichungen Verkürzungen und Pseudarthrosen-bildungen aufweisen. Im Schaftbereich ist die Nagelung mit einem hochstifen Implantat per se geeignet, die Achsfehlstellung zu korrigieren, unter Kompression werden zudem gute Voraussetzungen für die knöcherne Ausheilung geschaffen (s. Abb. 7, 8).

In Bezug auf die Implantatausfüh-rung ergeben sich aus der Kompressi-

onmarknageltechnik einige Anforder-ungen, die schon Ritter an ein ideales Implantat gestellt hatte. Die Verriegelungsbohrungen im Nagel sollten nicht im schlecht tragenden metaphysären Bereich sondern eher im kortikalen Bereich des Knochens zu liegen kommen [34]. Dies steht in einem gewissen Wi-derspruch zu dem heute zu beobachtenen Trend, durch extreme Lochanord-nungen proximal wie distal die Anwend-barkeit der Nagelmodelle auch auf me-taphysäre Frakturen auszudehnen.

Weiterhin setzt eine effektive Kom-primierbarkeit an der unteren Extre-mität Verriegelungsschraubendurchmesser von mindestens 5 mm voraus. Für der-artige Schrauben kann bezüglich des in-tramedullären Implantates ein Durch-messer von 9 besser 10 mm nicht unter-schritten werden. Diese Maßvorgaben sind für den Femur als unkritisch anzu-sehen, an der Tibia können für solide ungebohrte Implantate jedoch nur Bol-zen von maximal 4 mm zur Anwendung kommen. Bei diesen Schraubendimen-sionen ist eine hohe Kompression nicht durchführbar, da eine starke Deformie-



rung des im Längsloch eingebrachten Querbolzens zu befürchten wäre. Immerhin kann auch bei diesen Implantaten die Kompressionstechnik zur Fragmentadaptation genutzt werden.

Kritisch diskutiert wird bisweilen eine potentiell denkbare Störung der biologischen Knochenbruchheilung durch die Einbringung eines permanent hohen Druckes in den Frakturspalt [27]. In der klinischen Praxis sind derartige Störungen z. B. als Resorptionsphänomene nicht beobachtbar. Die positiven Resultate für Pseudarthrosen und Osteotomien sind vorstehend berichtet, in der Frakturheilung wurden durchgehend im Vergleich mit etablierten Mangeltechniken vergleichbare Durchbauungszeiten beobachtet [5, 6, 7].

Unter diesen langjährig gewonnenen Eindrücken haben wir im eigenen Vorgehen die Indikation so z. B. für die septische Wiederherstellungschirurgie erweitert. Unter der Überzeugung einer unter biologischen wie mechanischen Gesichtspunkten optimalen Methode wurden auch die Patienten mit vasculär gespielter allogener Knie-Transplantation bzw. Femurdiaphysentransplantation mittels Kompressionsmarknagelung stabilisiert [18, 19], wobei an der Tibia eine retrograde Technik angewendet wurde [16]. Auch in diesem sensiblen Patientengut haben wir keine prinzipiellen Negativeffekte der Primärkompression des Osteotomiespaltes beobachten müssen.

Abb. 8a–d ◀ **Varuspseudarthrose Tibia. Pseudarthrose mit Varusfehlstellung nach konservativ behandelter Unterschenkelfraktur. a** Klinisches Bild, Dorsalansicht. **b** Messaufnahme untere Extremitäten in a.-p.-Ansicht. **c** Vorgehende Fibulaosteotomie, Mobilisierung der Pseudarthrose, Kompressionsmarknagelung der Tibia, Zuggurtungsosteosynthese der Fibula. **d** klinische Ansicht von hinten nach Umstellung

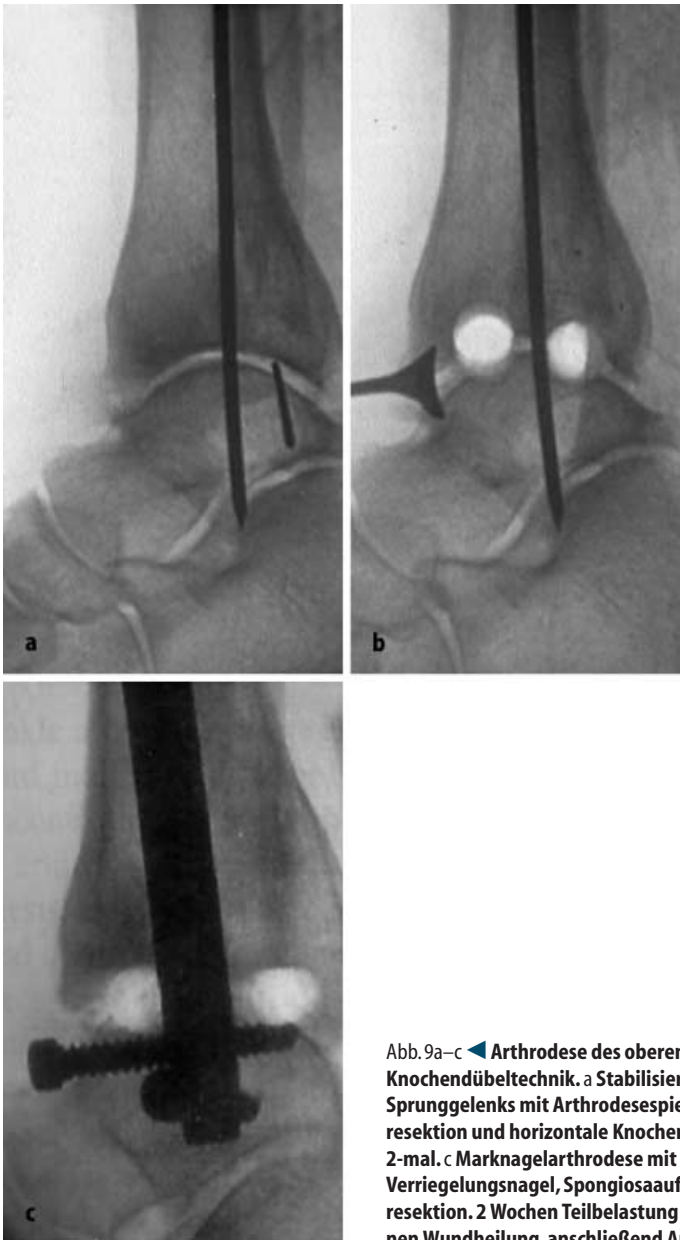


Abb. 9a–c ◀ **Arthrodesis des oberen Sprunggelenks in Knochendübeltechnik. a Stabilisierung des oberen Sprunggelenks mit Arthrodesespieß. b Außenknöchelresektion und horizontale Knochenauffräsung 10 mm 2-mal. c Marknagelarthrodesis mit extrem distalen Verriegelungsnagel, Spongiosaauffüllung der Bohrlochresektion. 2 Wochen Teilbelastung bis zur abgeschlossenen Wundheilung, anschließend Aufbelastung**

Fazit für die Praxis

Trotz seit nunmehr 60-jähriger weltweiter Anwendung scheint das innovative Potential der intramedullären Osteosynthese nicht erschöpft zu sein. Aus den eigenen dargestellten Erfahrungen heraus schließen wir uns der Meinung von M. Perren an, dass die Möglichkeit der Marknagelkompression für die Lösung klinischer Probleme ungerechtfertigterweise noch zu wenig bekannt ist [31]. Andererseits ist anzumerken, dass die Indikationsstellung für Revisionseingriffe und auch in der Frakturbehandlung durchaus anspruchsvoll ist.

Die derzeit vorhandenen Implantate und Instrumentationen sind eher auf eine umfassende Nutzung des Marknagels für statische und dynamische Indikationen ausgerichtet und infolgedessen für eine Kompressionsosteosynthese nicht optimiert. Die absehbar zunehmende Anwendung intramedullärer Implantate an der oberen Extremität läßt eine im gleichen Maße zunehmende Hinwendung zu komprimierenden Techniken erwarten, die ihre besonderen Stärken in der kalkulierten Fragmentadaptation unter hoher Primärstabilisierung hat.

Literatur

1. Baas N, Gonschorek O, Beickert R, Bühren V (1999) Entwicklung eines neuen Marknagels mit internem Kompressionsmechanismus zur Behandlung von Oberarmseudarthrosen. *Hefte Unfallchir* 275:35
2. Blum J, Machemer H, Högner M, Baumgart F, Schlegel U, Wahl D, Rommens PM (2000) Biomechanik der Verriegelungsmarknagelung bei Oberarmschaftfrakturen. Vergleichsuntersuchungen zweier Marknagelsysteme und des Effekts der interfragmentären Kompression beim unaufgebohrten Humerusnagel. *Unfallchirurg* 103:183–190
3. Böstmann O, Vainionpää S, Saikku K (1984) Infra-isthmal longitudinal fractures of the tibial diaphysis: results of treatment using closed intramedullary compression nailing. *J Trauma* 24:964–969
4. Bühren V, Gonschorek O (1998) Indikation, Lokalisation und Technik von Torsionskorrekturen am Femurschaft. *Unfallmedizinische Tagungen der Landesverbände der gewerblichen Berufsgenossenschaften* 101:111–118
5. Bühren V, Potulski M, Mittelmeier W, Mittelmeier H (1993) Kompressions-Verriegelungs-Nagel zur Frakturbehandlung an Femur und Tibia. *Hefte Unfallchir* 230:799–802
6. Bühren V, Potulski M, Marzi I (1993) Konzept und Ergebnisse der primär komprimierten Verriegelungsnagelung ohne Kortikalisaufräsung an Femur und Tibia. *Langenbecks Arch Chir* 1993 [Suppl]:937–939
7. Bühren V, Potulski M, Mittelmeier H, Mittelmeier W (1993) Klinische Erfahrungen mit einem neuen Kompressions-Verriegelungsnagel. *Orthop Prax* 9:588–590
8. Derweduwen J (1979) A new intramedullary compression device for fractures and pseudarthroses of the long bones. *Acta Orthop Belg* 45:6–12
9. Gonschorek O, Beickert R, Hofmann GO, Bühren V (1998) Minimalinvasive Technik zur Derotationsosteotomie des Femurs unter Verwendung von Innenraumsäge und Verriegelungs-Kompressionsmarknagelung. *Osteosynthese Intern* 6:11
10. Gonschorek O, Beickert R, Hofmann GO, Bühren V (1999) Spongiasoplastik in Knochendübeltechnik bei Sprunggelenksarthrosen. *Trauma Berufskrankh* 1:429–431
11. Gonschorek O, Hofmann GO, Bühren V (1998) Interlocking compression nailing: a report on 402 applications. *Arch Orthop Trauma Surg* 117:403–437
12. Gonschorek O, Hofmann GO, Hofmeister M, Bühren V (1999) Treatment of femoral pseudarthrosis by using a reamed IM nail with active compression (Interlocking Compression Nail). *Osteosynthese Intern* 7 [Suppl 1]:27–30
13. Gonschorek O, Hofmann GO, Kirschner MH, Bühren V (1999) Hochstabile Versorgung von Unterschenkelkfrakturen durch Kompressionsmarknagelung. *Osteosynthese Intern* 7 [Suppl 2]:92–94

14. Gonschorek O, Hofmann GO, Wagner FD, Bühren V (1999) Reamed interlocking compression nailing for the treatment of tibial pseudarthrosis. *Osteosynthese Intern* 7 [Suppl 1]: 142–145
15. Gonschorek O, Schupfner B, Bühren V (1996) Dynamische Fibulazuggurtungsosteosynthese in Kombination mit Tibiakompressionsnagelung für Revisionseingriffe am Unterschenkel. *Osteosynthese Intern* 4: 436–440
16. Hofmann GO, Gonschorek O, Bühren V (1999) Retrograde tibial nailing. Anatomical considerations and first clinical experiences. *Osteosynthese Intern* 7: 162–169
17. Hofmann GO, Gonschorek O, Bühren V (2000) Deficient fracture dynamization employing unreamed nails in tibial fractures. *Osteosynthese Intern* 8: 109–112
18. Hofmann GO, Kirschner MH, Brauns L, Gonschorek O, Wagner FD, Bühren V (1998) Allogeneic vascularized grafting of human knee joints under postoperative immunosuppression of the recipients. *World J Surg* 22: 818–823
19. Hofmann GO, Kirschner MH, Gonschorek O, Bühren V (1999) Überbrückung langstreckiger Knochen- und Gelenkdefekte durch allogene vaskularisierte Transplantate. *Unfallchirurg* 102: 458–465
20. Hofmann GO, Bühler M, Potulski M, Gonschorek O, Bühren V (1999) Retrograder Tibia-Marknagel. Klinische Studie zur kontrollierten Erstanwendung. *Hefte Unfallchir* 275: 408
21. Hofmeister M, Schittig P, Bühren V (1995) Arthrodesis des oberen Sprunggelenkes mit dem Kompressions-Verriegelungsnagel. *Osteosynthese Intern* 4: 285–292
22. Huckstep RL (1986) The Huckstep intramedullary compression nail. Indications, technique and results. *Clin Orthop* 212: 48–61
23. Hutter GG, Oden R, Kirk R (1977) The intramedullary compression rod. *Clin Orthop* 122: 165–173
24. Kaessmann HJ (1966) Stabile Osteosynthese durch den Kompressionsnagel. *Chirurg* 37: 272–276
25. Kaessmann HJ (1969) Der Kompressionsnagel, eine Modifikation des Marknagels nach Küntscher. *Bruns Beitr. z. Klin Chir* 217: 315–320
26. Mittelmeier W (1999) Biomechanische Untersuchungen zur Primärstabilität der intramedullären Kompressionsosteosynthese am Femur. *Habilitationsschrift. Technische Universität München, Fakultät für Medizin*
27. Mittelmeier W, Hauschild M, Hellmuth F, Steinhauser E, Gradinger R (1999) Einfluss des Kompressionsnagel-Prinzips auf die Steifigkeit des Knochen-Implantat-Verbundes und Mikrobewegungen im Bruchspalt. *Osteologie* 8 [Suppl 1]: 27–28
28. Mittelmeier H, Trennheuser M, Mittelmeier W (1989) Biomechanische Untersuchungen über die interfragmentären Kompressionskräfte mit einem neuen kombinierten Kompressions-Verriegelungsnagel. *Hefte Unfallheilkd* 207: 305
29. Mittelmeier H, Trennheuser M, Mittelmeier W (1990) Vergleichende biomechanische Messungen der Torsionsstabilität von intramedullären Nagel-Osteosynthesen. *Hefte Unfallheilkd* 212: 468–471
30. Olerud S (1970) Intramedullary Nailing after Reaming. *Acta Orthop Scand* 1970 [Suppl]: 134–139
31. Perren SM (1999) Wissenschaftliche Grundlagen der Marknagelung mit spezieller Berücksichtigung der Stabilität. *OP-J* 15: 31–38
32. Richardson T, Voor M, Seligson D (1998) Fracture site compression and motion with three types of intramedullary fixation of the femur. *Osteosynthese Intern* 6: 261–264
33. Ritter G (1989) Biomechanische Voraussetzungen für die Kompressionsosteosynthese mit dem neuen AO-Universal-Marknagel. *Hefte Unfallheilkd* 207: 304
34. Ritter G (1991) Kompressionsosteosynthesen mit dem neuen AO-Universalnagel. Funktionsprinzip und biomechanische Voraussetzungen. *Unfallchirurg* 94: 9–12