

Die Beiträge der Rubrik „Weiterbildung“ sollen dem Stand der Facharztprüfung für den Chirurgen entsprechen und zugleich dem niedergelassenen Facharzt als Repetitorium dienen. Die Rubrik beschränkt sich auf klinisch gesicherte Aussagen zum Thema.

Prinzipien der intramedullären Knochenbruchstabilisierung.

Teil 2: Operationstechnik

Insertion

Zugang

Zahlreiche Lehrbücher empfehlen relativ lange Inzisionen für die Nagelinsertion. Bei der Marknagelung in unaufgebohrter Technik können die Inzisionen aus 3 Gründen sehr viel kleiner gehalten werden. Diese Gründe sind:

- die Position für die Markraumeröffnung wird ohnehin nicht unter direkter Sicht des Auges definiert,
- ein Weichteilschutz für einen Markraumborher ist nicht notwendig,
- klinische Beobachtungen haben gezeigt, dass ohnehin nur der proximale Anteil der Inzision genutzt wird.

Stichinzisionstechniken sind für Femur [6] und Tibia [7] beschrieben worden. Für beide Lokalisationen muss beachtet werden, dass die Zugänge genau in Verlängerung der Markhöhle gelegt werden und nicht zu nah an den Knochen gelegt werden (Abb. 1, 2). Diese Zugänge vermindern den Blutverlust ([14]; kleinere Knochenwunde, geschlossener Implantatquerschnitt), vermindern das Risiko für heterotope Ossifikationen [5] und vermindern an der Tibia funktionelle Beschwerden im Bereich des Knies [12].

Antegrade Femurnagelung

Am Femur erleichtern Flexion und Adduktion im Hüftgelenk den chirurgischen Zugang für die antegrade Nagelung, insbesondere bei Patienten mit höherem Körpergewicht. Trochanter major, der laterale Femurkondylus und, falls möglich, der Femurschaft werden getastet und ggf. mit einem Stift markiert. Diese ventralkonvex gekrümmte Linie wird nach proximal verlängert und eine ca. 3 cm lange Stichinzision wird ca. 10–15 cm oberhalb der Trochanterspitze angelegt (Abb. 2). Das erlaubt das Einbringen eines tastenden Fingers zusammen mit Instrumenten oder dem Implantat. Die Inzision sollte auch nicht zu weit dorsal angelegt werden, da Abduktoren schwächen nach Nagelung beobachtet wurden.

Häufiger Fehler: Ungenügende Abdeckung zwingt zu Kompromissen beim Zugang

Antegrade Tibianagelung

Für die Tibianagelung ist eine ca. 20 mm lange Stichinzision ausreichend, die mit einer großen Klinge in Verlängerung der Markhöhle angelegt wird. Die Inzision verläuft durch Haut und Patellarsehne, beginnend am unteren Patellapol in starker Beugstellung des Kniegelenkes ($>90^\circ$; Abb. 1). Die Markraumeröffnung erfolgt genau an der Vorderkante der Tibia, die einfach palpatorisch mit der Spitze des Markraumeröffnungsinstrumentes palpirt und lokalisiert werden kann.

Retrograde Femurnagelung

Im Falle einer retrograden Femurnagelung gelten ebenfalls die Prinzipien einer weichteilschonenden Chirurgie, das heißt minimierte, stichinzisionsartige Zugänge werden genau in die Achse der geplanten Implantateinbringung platziert. Zu diesem Zwecke wird das Knie ca. 30° gebeugt. Der Führungsdorn für die Markraumeröffnung wird exakt in der Verlängerung der Markraumachse eingebracht, was unter Bildverstärkerkontrolle in 2 Ebenen erfolgt. In diesen Zugang wird eine Schutzhülle eingebracht, gegen die Kondylen gedrückt und die Markhöhle auf das gewünschte Maß eröffnet.

Retrograde Femurnagelung und antegrade Tibianagelung

Im Falle einer retrograden Femur- und antegraden Tibianagelung kann die Einbringung beider Implantate über den selben Zugang erfolgen. In dieser Situation muss sichergestellt werden, dass die Inzision für die retrograde Femurnagelung proximal genug erfolgt, um darüber auch die Tibianagelung erfolgen zu lassen (nahe an der Patella).

Prinzipien der Markraumeröffnung

Die Vorbereitung der Markraumeröffnung sind wichtige Schlüsselschritte bei der intramedullären Stabilisierung, da die Achsenausrichtung der Fragmente über die Platzierung der Markraumeröffnung mit definiert wird. Die Technik unter Verwendung kanülierter Bohrer ist zu bevorzugen, da sie eine systematische Optimierung (Plat-

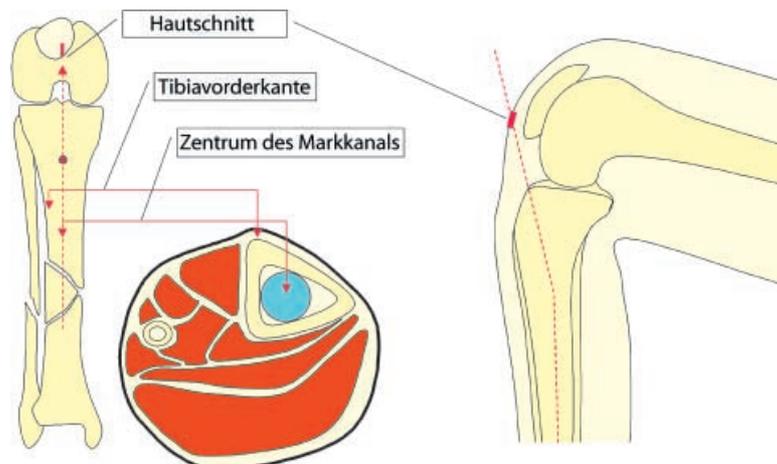


Abb. 1 ▲ Anatomische Grundlagen für Hautschnitt und Markraumeröffnung. Der Hautschnitt sollte in einer Linie mit dem Markkanal liegen. Diese Stelle liegt in 100° Kniebeugung etwa über dem unteren Fünftel der Patella. Die Markraumeröffnung sollte ebenfalls in einer Linie mit dem späteren Weg des Nagels liegen. Wegen des dreieckigen Querschnittes der Tibia ist die entscheidende „Landmarke“ nicht die gut tastbare Tibiavorderkante. Das Zentrum des Markkanals liegt vielmehr medial davon. Als Hilfestellung und sichtbare Marke kann ein kurzer (2 cm) Kirschner-Draht in die proximale Tibia temporär in Projektion auf die Markkanalmitte unter Bildverstärkerkontrolle eingetrieben werden. Das gibt eine gute Orientierung für die Platzierung von Hautschnitt und Markraumeröffnung und hilft, die Strahlendosis zu reduzieren.

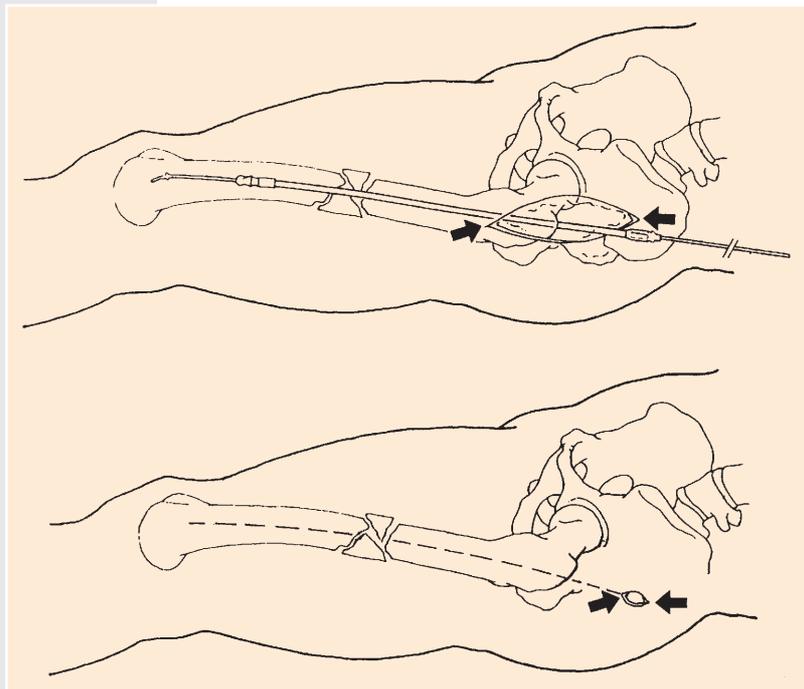


Abb. 2 ◀ Zugang zur Marknagelung am Femur. Die physiologische Antekurvation des Femurs muss bei der Planung des Hautschnittes in Stichinzisionstechnik berücksichtigt werden. Der Zugang liegt etwa 10–15 cm oberhalb der Trochanterspitze

zierung und Kontrolle) des Führungsstiftes mit minimaler Knochendestruktion erlaubt, bevor die definitive, großlumige eigentliche Markraumeröffnung erfolgt.

Markraumeröffnung für die antegrade Femurnagelung

Insbesondere am Femur ist der Führungsdraht selten bereits beim ersten Mal perfekt positioniert. In diesem Falle wird ein zweiter Führungsdraht in korrigierter Position platziert, während der erste zunächst als Referenz verbleibt. Erst wenn der Führungsdraht perfekt platziert ist, wird der Fehlplatzierte entfernt (Abb. 3). Eine Hülle schützt die Weichteile vor Verletzungen durch den großlumigen kanülierten Bohrer.

Markraumeröffnung für die retrograde Femurnagelung

Die Markraumeröffnung für den retrograden Nagel erfolgt ebenfalls in der Achse der Markhöhle, was mit Hilfe des Bildverstärkers im p.-a. und lateralen Strahlengang kontrolliert wird. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Ursprung des hinteren Kreuzbandes (HKB) nicht verletzt wird. Entscheidende anatomische „Landmarke“ ist die Blumensaat-Linie, eine strahlendichte Linie, die das tangential und orthograd getroffene Dach des interkondylären „notch“ repräsentiert.

Markraumeröffnung für die Tibianagelung

Im Bereich der Tibia erfolgt die Platzierung des Führungsdrahtes exakt an der vorderen oberen Tibiakante genau in Richtung des Zentrums der Markhöhle im p.-a.-Strahlengang. Anschließend wird über den Zentrierdorn eine Schutzhülle durch das Lig. patellae auf den Knochen gedrückt. Bereitet die Definition der Markraumeröffnung Schwierigkeiten, so kann zunächst ein gekürzter 20 mm langer Kirschner-Draht etwa auf der Höhe der Tuberositas tibiae die unter Bildverstärkerkontrolle festgestellte Mitte der Markhöhle markieren (Abb. 1). Dieser K-Draht stellt eine konstante, gut visualisierbare Referenz während Inzision, Markraumeröffnung und Implantateinbringung dar und vermindert die Notwendigkeit wiederholter Bildverstärkerkontrollen.

Insbesondere bei proximalen Frakturen ist die korrekte Platzierung der Markraumeröffnung in Verlängerung der Markhöhle essenziell, um hier besonders häufig beobachtete Fehlstellungen zu vermeiden. Bei Verwendung des Markraumeröffnung-

Häufiger Fehler: Zugang nicht in Verlängerung der Markhöhle (Kontrolle durch BV in 2 Ebenen)

Häufige Fehler:

- ▶ Zugang nicht in Verlängerung der Markhöhle (Tibia: Die Tibiavorderkante wird irrtümlich für die Schaftmitte gehalten),
- ▶ Zugang zu weit distal

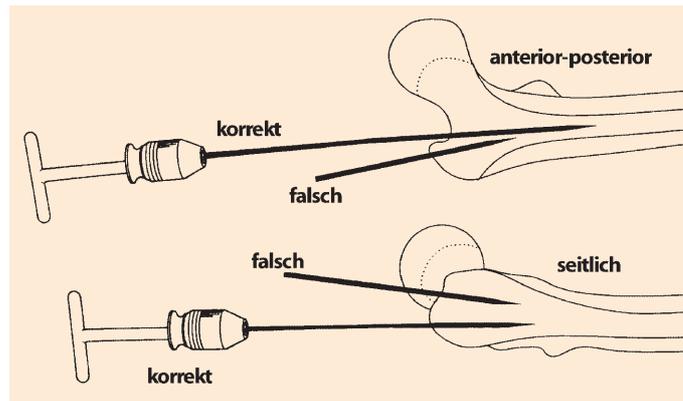


Abb. 3 ▲ Technik für die Platzierung des Führungsdrahtes für die Markraumeröffnung. Die Position des Führungsdrahtes wird mit dem Bildverstärker in 2 Ebenen kontrolliert. Falls die Position nicht korrekt ist, muss sie korrigiert werden. Dazu wird der fehlplatzierte Führungsdraht in situ belassen (als Referenz für den neu zu platzierenden; gleichzeitig wird verhindert, dass der neuplatzierte wieder in die „alte“ Öffnung gerät)

instrumentes wird ein Knochenzylinder gewonnen, der asserviert später unter Umständen als Knochentransplantat verwendet werden kann.

Beziehung zwischen Markraum- und Implantatgeometrie

In den frühen Tagen der intramedullären Osteosynthese wurden die Implantate ohne vorherige Markraumaufbohrung implantiert. Diese Technik war jedoch limitiert auf kurzstreckige Frakturen im mittleren Diaphysenbereich. Um die Indikation für die Marknagelung auf komplexere Frakturen und Bereiche auch außerhalb der Diaphysenmitte zu erweitern, wurde die Markhöhle aufgebohrt. Dies verbesserte Kontakt und Reibung zwischen Knochen und Implantat und erhöhte die Festigkeit des Knochenimplantatverbundes.

Technik der Markraumaufbohrung

Maschinengetriebene Markraumborner sind bequemer und schneller und werden deshalb für Standardsituationen verwendet. Für Sondersituationen (z. B. Pseudarthrosen mit Sklerose der Markhöhle) sind Handbohrer jedoch sicherer und effektiver.

Der intramedulläre Markraumborrvorgang führt zu einem Anstieg des intramedullären Drucks und der Temperatur. In einer experimentellen Studie wurden der Einfluss von Bohrertyp, Geometrie des Bohrerschafts, Qualität und Geometrie der Bohrerschneiden und schließlich die Technik des Borrvorgangs selbst auf den intramedullären Druck und die kortikale Temperatur gemessen. Von Müller konnte gezeigt werden, dass stumpfe Bohrer, hohe axiale Kräfte, große Durchmesser des Bohrerschafts und geringe Tiefe der Bohrkopfschneiden hohen Druck und/oder Temperatur verursachen [10].

Pape konnte schließlich zeigen, dass das Risiko einer pulmonalen Gefährdung von Design und Konstruktion des Markraumborrsystems abhängen. Distale „Entlüftungslöcher“ sind in ihrer Effektivität abhängig von ihrem Durchmesser, wobei effektive Durchmesser klinisch schwer zu realisieren sind. „Entlüftungslöcher“ und Spültechniken zur Reduktion der Viskosität [13] haben sich trotz eines nachvollziehbaren plausiblen pathophysiologischen Ansatzes nicht in breitem Maße durchgesetzt.

Motorgetriebene Markraumborner

Motorgetriebene Markraumborner („power reamers“) werden überwiegend in Kombination mit einem zentralen Führungsdraht eingesetzt. Der Bohrerschaft ist flexibel und erreicht in der Regel eine Tiefe von 440 mm. Der Bohrerkopf ist kanüliert und wird vom zentralen Führungsdraht auf dem Bohrerschaft gehalten. Typische Boh-

Häufige Fehler:

- ▶ Verwendung stumpfer Bohrer, starker axialer Druck (Hitzentwicklung),
- ▶ ungenügende Reinigung der Bohrköpfe vor Passage,
- ▶ ungenügende Reposition während der Frakturpassage (asymmetrische Abtragung),
- ▶ „Überspringen“ von Bohrschritten (0,5 mm Schritte),
- ▶ fehlender Wechsel auf großen Schaft bei entsprechenden Bohrkopfgrößen,
- ▶ Rückzug bei stehender Maschine

rer Durchmesser sind in den Durchmessern von 9,5–19,5 mm in 0,5 mm Inkrementen erhältlich.

Handbohrer

Die Geschwindigkeit handgetriebener Markraumborner ist natürlich sehr viel geringer im Vergleich zu den motorgetriebenen und produzieren deshalb weniger Hitze. Im Wesentlichen sind 2 verschiedene Handbohrer erhältlich:

- Handbohrer mit fixiertem Handgriff und scharfer konischer Spitze, die in 3 Standardgrößen erhältlich sind (6 mm, 7 mm und 8 mm). Andere spezielle Größen sind auf Anfrage lieferbar.
- Kanülierte Handbohrer mit kanüliertem T-Handgriff, die mit den Bohrköpfen des motorgetriebenen Markraumborersystems kombiniert werden können. Sie weisen eine relativ flache Spitze auf.

Reposition

Biomechanische Überlegungen für die verschiedenen Schritte bei der antegraden Femurnagelung

Die Reposition von Femurschaftfrakturen ist üblicherweise schwieriger als die von Tibiaschaftfrakturen, und zwar aus folgenden Gründen:

- voluminösere Weichteile und weniger/fehlender direkter Zugriff zum Knochen,
- unzugänglicherer Markraumeröffnungspunkt,
- schlechtere laterale Darstellbarkeit des Eintrittspunktes im BV,
- Anwesenheit eines Tractus iliotibialis, mit einer starken Tendenz zur Verkürzung im Frakturbereich bei Adduktion des Beines,
- Die Anforderungen für eine optimierte Positionierung sind in den verschiedenen operativen Schritten unterschiedlich und kontraproduktiv.

Markraumeröffnung und Nagelinsertion ist am einfachsten mit dem proximalen Fragment in *Adduktion*, aber die Reposition in dieser Stellung ist wegen des gespannten Tractus iliotibialis und der dadurch hervorgerufenen Verkürzung der Fraktur schwierig.

Die *Reposition* ist einfacher in *Abduktion*. Allerdings sind in dieser Position die Markraumeröffnung und Nagelinsertion praktisch unmöglich

Positionierungsschritte bei antegrader Femurnagelung

Schritt	Problem	Lösung
Markraumeröffnung	In Neutralposition verhindern Weichteile und Beckenkamm den einfachen Zugang	AD-duktion und Flexion des proximalen Femur bzw. des gesamten Beines
Nagelinsertion in das proximale Hauptfragment	In Neutralposition verhindern Weichteile und Beckenkamm den einfachen Zugang	AD-duktion und Flexion des proximalen Femur bzw. des gesamten Beines
Reposition, Nagelinsertion in das distale Hauptfragment	In adduzierter Stellung des Beines ist der Tractus iliotibialis gespannt und verkürzt die Fraktur	AB-duktion oder Neutralposition des distalen Hauptfragmentes mit dem proximalen Hauptfragment in Neutralposition

Digitale Kontrolle bei der Reposition von Tibiafrakturen

Eines der effektivsten und sensitivsten Hilfsmittel bei der Reposition von Tibiaschaftfrakturen sind die Hände des Operateurs. Im Gegensatz zum Femur liegen große Anteile der Tibia, insbesondere der anteromediale Kortex, unmittelbar unter der Haut und können deshalb einfach palpiert werden. Da die meisten Frakturen im Bereich der mittleren oder distalen Diaphyse lokalisiert sind, sind zahlreiche Frakturen während der Implantateinbringung nahezu vollständig digital-manuell reponierbar. Eine vorübergehende Überkorrektur beim Passieren der Frakturzone ist besonders hilfreich bei Schrägfrakturen.

Im Gegensatz zur Tibia ist das Femur viel weniger für eine rein digital-manuellen Reposition geeignet

Bei Verwendung ungebohrter Nägel mit geringem Durchmesser kann manchmal das distale Hauptfragment mit der Nagelspitze bei der Manipulation geradezu „gefühl“ werden. Die korrekte Position des Implantates im distalen Hauptfragment kann an einer erheblichen Steifigkeitszunahme des Knochenimplantatverbundes ebenfalls „erfühl“ werden.

Im Gegensatz zur Tibia ist das Femur viel weniger für eine rein digital-manuellen Reposition geeignet. Aus diesem Grunde besteht hier ein größerer Bedarf für Repositionsinstrumente und -hilfsmittel.

Repositionshilfen

Die Reposition frischer Frakturen ist gewöhnlich einfach bei frischen Frakturen in Tibiamitte und eine manuelle Reposition ist gewöhnlich ausreichend. Jedoch können veraltete Tibiafrakturen oder Femurschaftfrakturen mit ungenügender Relaxation schwer zu reponieren sein. Für diese Situationen sind folgende Instrumente und Hilfsmittel hilfreich.

Schlingentechnik

Die Verwendung von „Tuchschlingen“ und „Sandsack“ sind einfache, kostengünstige und nicht-invasive Techniken zur Manipulation der Hauptfragmente. Nachteile sind limitiertes „taktiles feedback“, limitierte Feinregulation, eingeschränkte Manipulationsrichtungen und die Notwendigkeit für „zusätzliche Hände“ [6a].

Repositionszangen

Die Verwendung von Repositionszangen (Matta-Zange, King-Tong-Zange) ist vor allem bei Tibiafrakturen hilfreich. Die Zangen werden über Stichinzisionen per- und subkutan platziert. Die Applikation muss entsprechend dem Frakturverlauf sorgfältig geplant werden. Eine Quetschung der Weichteile muss sorgfältig vermieden werden.

Schanz-Schrauben

Die Verwendung von temporären Schanz-Schrauben ist ein effektiver Weg, um direkten manipulativen Knochenkontakt mit kurzen Hebelarmen zu erreichen. Die Schanz-Schrauben können darüber hinaus als „control tool“ für die Fragmentposition dienen. Schanzschrauben sind extrem hilfreich bei frischen Femurschaftfraktu-

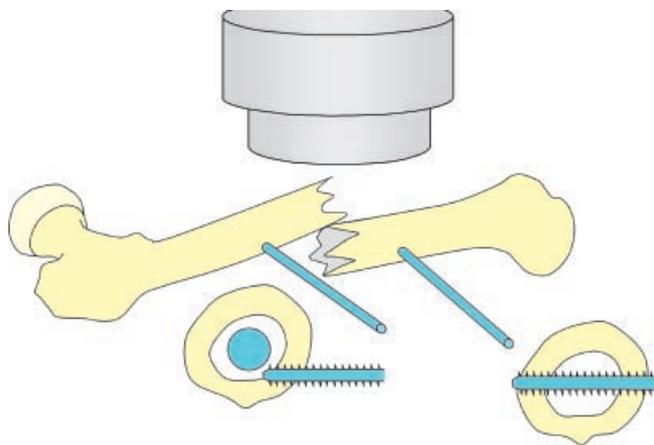


Abb. 4 ▲ Die Verwendung von Schanz-Schrauben für die Reposition. Im proximalen Fragment werden die Schanz-Schrauben unikortikal oder weit dorsal platziert, im distalen Fragment bikortikal. Mit Hilfe des T-Handgriffes werden die Fragmente unter p.-a.-Kontrolle des C-Arms manipuliert und reponiert. Die Orientierung in der sagittalen Ebene erfolgt anhand des taktilen Repositionsfeedbacks über die Schanz-Schrauben

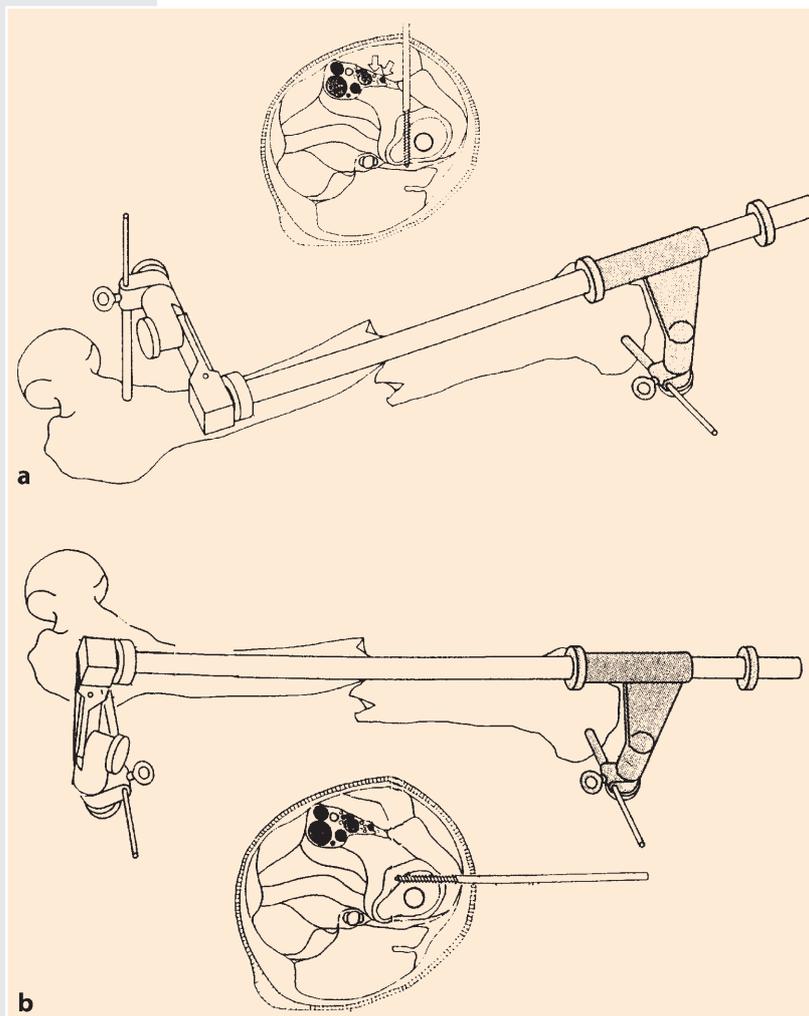


Abb. 5a, b ◀ Die Verwendung des Distraktors für die Reposition. a Standardanordnung für den Femurdistraktor. b Alternative Verwendung mit beiden Schanzschrauben von lateral. (Nach [1])

ren und bei verzögerter Versorgung von Tibiaschaftfrakturen [6, 7]. Die 3 wichtigsten Prinzipien sind:

- Platzierung nahe der Fraktur,
- unikortikale Platzierung oder Platzierung außerhalb des Nagelweges zumindest im proximalen Fragment bei der antegraden Femurnagelung,
- Ankoppelung an T-Handgriff für eine einfachere Manipulation.

Im „chirurgischen Koordinatensystem“ gibt es vor allem 2 Ebenen, die kontrolliert werden: posterior-anteriore (p.-a. oder frontale Ebene) und laterale (sagittale) Ebene. Die Frontalebene wird mit dem p.-a.-Bildverstärkerbild kontrolliert, während die sagittale Ebene über die Schanz-Schraube(n) kontrolliert wird. Die Verwendung des Bildverstärkers kann reduziert werden, wenn die Position der T-Handgriffe relativ zueinander vermehrt beachtet wird. Die taktile Kontrolle der Hauptfragmente in der Sagittalebene trägt ebenfalls zu einer Verminderung der Durchleuchtungszeit bei (Abb. 4).

Distraktor

Die Hauptindikation für die Verwendung von Schanz-Schrauben ist die Notwendigkeit für Längszug gegen größeren Widerstand und Verkürzungstendenz [9a]. Dies ist vor allem hilfreich bei verzögerten Fällen [1, 6a]. Die Möglichkeiten für den Distraktor für die Kontrolle von Verschiebungen in der sagittalen oder frontalen Ebene sind sehr viel geringer, da die einzelnen Schanzschrauben sich verbiegen und im Knochen rotieren. Falls ein spezieller Distraktor nicht zur Verfügung steht, können mit ent-

Häufige Fehler:

- „zu späte“ Verwendung von Repositionshilfen (Schanz-Schrauben),
- inkorrekte Schanz-Schraubenplatzierung (proximal im Markrohr),
- ungenügendes Verständnis für die Pathophysiologie und Pathomechanik der Fraktur (Hauptdislokationsrichtungen, Verhalten des Tractus iliotibialis in Ab- und Adduktion des Beines)

sprechenden Fixateursystemen spezielle „Rohr-zu-Rohr-Konstruktionen“ aufgebaut und verwendet werden (Abb. 5).

Pollerschrauben (PS)

Die intramedulläre Stabilisierung von metaphysären Frakturen ist im Vergleich zu diaphysären Frakturen wegen der relativ hohen Muskelkräfte und nur kurzstreckiger Verankerung mit einer erhöhten Rate an Fehlstellungen [4] und verbleibender Instabilität [7] verbunden. Wegen der großen Differenz zwischen Implantataußen- und Markrauminnendurchmesser und fehlendem Nagel-Kortikalis-Kontakt kann das Implantat im Knochen entlang der Verriegelungsschrauben verschoben werden.

Eine Abhilfe für dieses Problem können „Pollerschrauben“ darstellen, die in unmittelbarer Nähe des Nagels platziert werden. Sie können die Translation des Nagels entlang der Verriegelungsschraube im metaphysären Bereich von Tibia [7] und Femur [6] verhindern (Abb. 6). Diese „Pollerschrauben“ vermindern funktionell die Weite der Metaphyse und blockieren die Nagelmigration entlang der Verriegelungsschrauben und erhöhen die mechanische Steifigkeit des Knochenimplantatkomplexes. Pollerschrauben können eingesetzt werden für

- Achsenkorrekturen,
- Stabilisationserhöhung,
- als Manipulationstool.

Bei der Verwendung von Pollerschrauben für *Achsenkorrekturen* ist die Konstruktion ausreichend stabil, aber fehlgestellt. In diesem Fall wird der Nagel temporär entfernt, die Pollerschraube in der Regel im Verlauf des ehemaligen Nagelbettes platziert

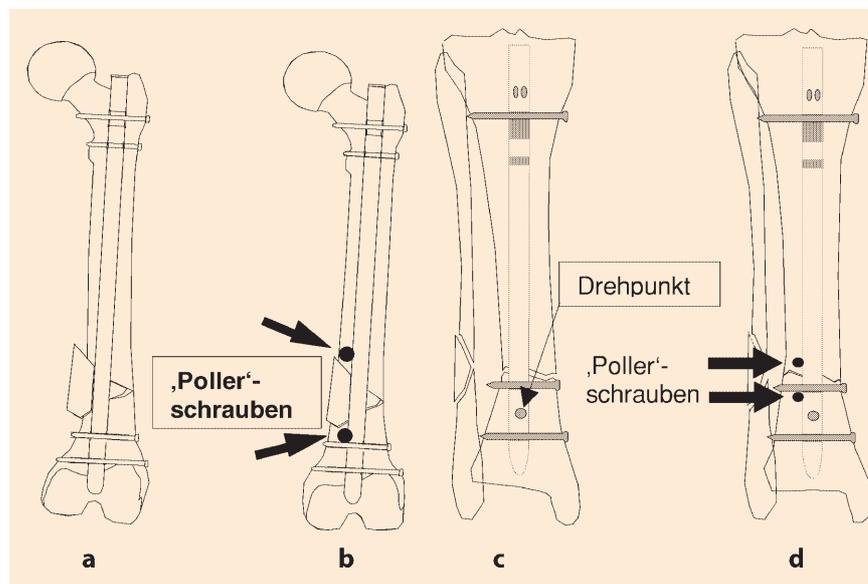


Abb. 6a–d ▲ Pollerschrauben zur Prävention von Fehlstellung und Instabilität. a Schemazeichnung einer distalen Femurfraktur. Wegen der Diskrepanz zwischen Markhöhleninnen- und Nagelaußendurchmesser und wegen eines gewissen „Spiels“ zwischen Nagel und Verriegelungsschrauben kann der Nagel auf dem Verriegelungsbolzen gleiten, was zu Instabilität und Fehlstellung führt. b Die Platzierung eines (distal) oder zweier (distal und proximal) Verriegelungsbolzen als „Pollerschrauben“ kann die Fehlstellung verhindern und gleichzeitig die Stabilität erhöhen. c Schemazeichnung einer distalen Tibiafraktur: ungeachtet der Anwesenheit einer a.-p.-Schraube sind Instabilität und Fehlstellung in der Frontalebene möglich, insbesondere bei kurzem distalem Hauptfragment, weitem Markraum und osteoporotischem Knochen. Die a.-p.-Schraube wirkt in dieser Situation als Drehpunkt. d Die geschlossene Reposition und entweder uni- oder bilaterale Abstützung mit „Pollerschrauben“, die bikortikal in der Sagittalebene platziert werden, verhindern die Angulation in der Frontalebene. Die Platzierung erfolgt vorzugsweise unter Verwendung des strahlentransparenten Winkelgetriebes unter Bildverstärkerkontrolle

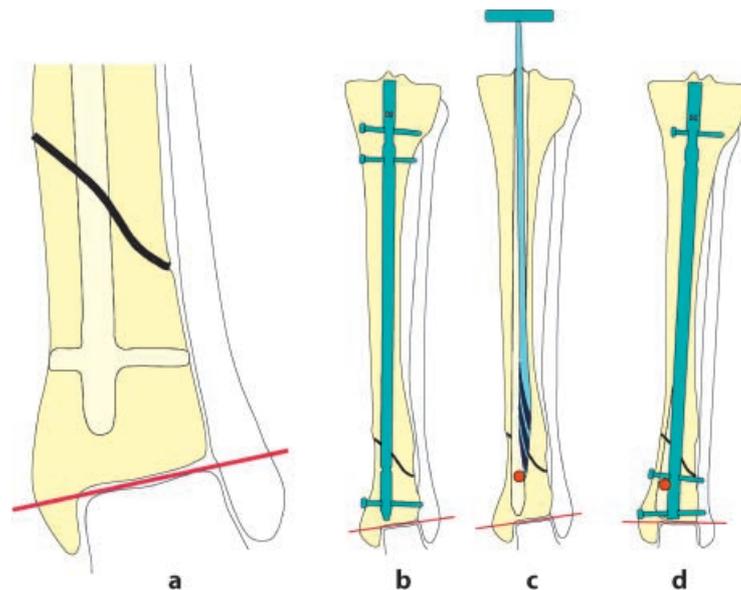


Abb. 7a–d ▲ Pollerschrauben als Manipulationshilfe. a Schemazeichnung eines klinischen Falles mit Refrakturen nach vorangegangener Nagelung und Ausheilung in Valgusfehlstellung. b Da der vorgegebene Nagelkanal von einem Sklerosesaum umgeben ist, kann der Versuch einer korrekten Nagelplatzierung unmöglich werden. c Diese und ähnliche Situationen können mit Pollerschrauben als Manipulationshilfe einfach gelöst werden. Der Nagel wird temporär entfernt, die Pollerschraube (rot) wird in alten, unerwünschten Nagelkanal eingebracht und verhindert, dass der Handbohrer bei der Erstellung des neuen erwünschten Nagelbettes in den alten sklerosierten Kanal zurückrutscht. d Sobald das neue Nagelbett mit Hilfe des Handbohrers vorbereitet ist erfolgt die Reinsertion des Nagels in korrekter Achsenstellung

ziert auf der konvexen Seite der Fehlstellung (bei Valgusfehlstellung medial des Nagels und umgekehrt; Abb. 6).

Bei der Verwendung von Pollerschrauben zur *Stabilisierungserhöhung* ist der Knochenimplantatkomplex instabil, was im metaphysären Bereich in einer Fehlstellung resultiert. In diesem Fall kann der Nagel während der Korrektur in der Regel in situ verbleiben und die Pollerschraube wird in leichter Überkorrektur eingebracht. Auch hier wird die Pollerschraube senkrecht zum Implantat in der Richtung der zu erwartenden Dislokation (Konvexseite) eingebracht. Das ist an der Tibia aufgrund des asymmetrischen lateralen Muskelzuges und der daraus resultierenden Valgusfehlstellung in der Regel eine Platzierung medial des Nagels. Diese Technik ist besonders hilfreich bei Schrägfrakturen, da hier die Scherkräfte in Druckkräfte umgewandelt werden. Als Pollerschrauben werden handelsübliche Verriegelungsschrauben verwendet (Abb. 6).

Darüber hinaus können Pollerschrauben als *Manipulationstool* eingesetzt werden. Dies ist hilfreich zum Beispiel in Situationen, wo Sklerosezonen, z. B. durch ein vormals fehlplatziertes Implantat oder im Bereich von Pseudarthrosen, eine optimale Implantatneuplatzierung verhindern (Abb. 7). Hier besteht eine starke Tendenz an der harten Sklerosezone in den „alten Kanal“ zu gleiten. Die Pollerschraube kann ebenso in Situationen benutzt werden, in denen eine vorgegebene Markraumeröffnung ursprünglich fehlplatziert war. Denn auch wenn eine neue, korrekt platzierte Markraumeröffnung geschaffen wird, tendiert das Implantat dazu, in den vorgegebenen Nagelkanal zu rutschen. In so einem Fall wird das Implantat temporär entfernt, die Pollerschraube zur Blockade des unerwünschten Pfades platziert und der Nagel wieder eingebracht.

Prinzipiell besteht bei Einbringung der Pollerschrauben ein potenzielles Risiko der Nagelbeschädigung und nachfolgender Korrosion, so wie grundsätzlich bei jeder Verriegelung das Risiko einer Implantatschädigung durch den Bohrer besteht. Andere Risiken beinhalten eine Blockade des Implantates durch die verklemmende Pollerschraube oder ein Schraubenausbruch.

Häufige Fehler:

- ▶ keine temporäre Entfernung des Nagels bei straffer Fraktursituation,
- ▶ ungenügende Kenntnis der Pathomechanik und Hauptdislokationsrichtungen

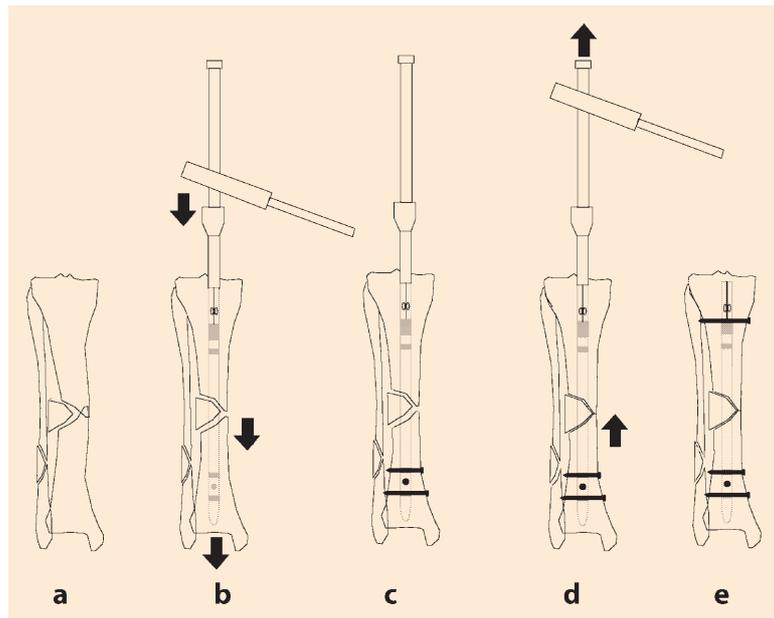


Abb. 8a–e ▲ Rückschlagtechnik zur Korrektur von Fragmentdiastase. a, b Insertion des Nagels v. a. bei der Anwendung in ungebohrter Technik verursacht häufig eine Diastase der Hauptfragmente, was mit „Gegenhalten“ bei der Insertion oder „Schlag auf die Ferse“ in der Regel nicht zu kompensieren ist. c Diese Situation wird mit der Rückschlagtechnik korrigiert. Hierzu werden zunächst alle (drei) distalen Verriegelungsoptionen besetzt (Festigkeitssteigerung). d Vorsichtiges Zurückschlagen unter Bildverstärkerkontrolle bis die Hauptfragmente adaptiert sind oder die geplante Länge erreicht ist. e Proximale Verriegelung entsprechend Frakturmuster und -lokalisierung

Tourniquet-Technik

Die Verwendung einer Blutsperremanschette als Repositionsmittel für geschlossene Tibiaschaftfrakturen wurde beschrieben. Luftinflation und Längszug bewirken eine Reposition der Fraktur und temporäre Stabilisierung, die zusätzliche Verwendung eines Distraktors ist möglich [11]. Allerdings beinhaltet die Technik durch die Druckaufbringung ein zusätzliches Risiko bei Frakturen mit schwerem Weichteilschaden. Aus diesem Grunde sollten Manschettendruck und Applikationszeit niedrig gehalten und die Anwendung auf Frakturen ohne Weichteilschaden beschränkt werden.

Sequenz der Verriegelung

Während der Nagelinsertion v. a. bei unaufgebohrt eingebrachten Implantaten kann insbesondere bei fester metaphysärer Knochenstruktur ein Vorantreiben des jenseitigen Hauptfragmentes beobachtet werden (Abb. 8). Die dadurch bedingte Diastase führt zum Anstieg des Kompartimentdruckes, zur Kompromittierung des Perfusionsdruckes und kann so zu Frakturheilungsstörungen führen. Bei in Diastase verriegelten Frakturen sind die Verriegelungsschrauben in der Rehabilitationsphase einer starken Biegebelastung (Risikofaktor für Schraubenbruch) ausgesetzt. Die diastasebedingte fehlende Abstützung der Hauptfragmente kann darüber hinaus Achsenfehlstellungen begünstigen.

Im Gegensatz zu den meisten Osteosynthesemanualen und Lehrvideos wird bei der antegraden Nagelung der routinemäßige distale Beginn der Verriegelung empfohlen [7]. Dies ermöglicht es dann, das distale Hauptfragment über das Einschlaggestänge weiter zu manipulieren. Die „Rückschlagtechnik“, durchgeführt nach distaler Verriegelung, führt zu einer Aufhebung der Distraction und zu einer gut steuerbaren Adaptation oder gar Kompression der Hauptfragmente (Abb. 8, 10). Die Missachtung dieser Reihenfolge führt häufig zur Fragmentdiastase, zu einer erhöhten mechanischen Belastung der Verriegelungsschrauben und steigert die Risiken für Nagel- oder

Häufige Fehler:

- ▶ proximale Verriegelung vor distaler Verriegelung (Ausnahme Spiralklinge Femur),
- ▶ Distraction,
- ▶ fehlende Fragmentadaptation (Rückschlagtechnik)

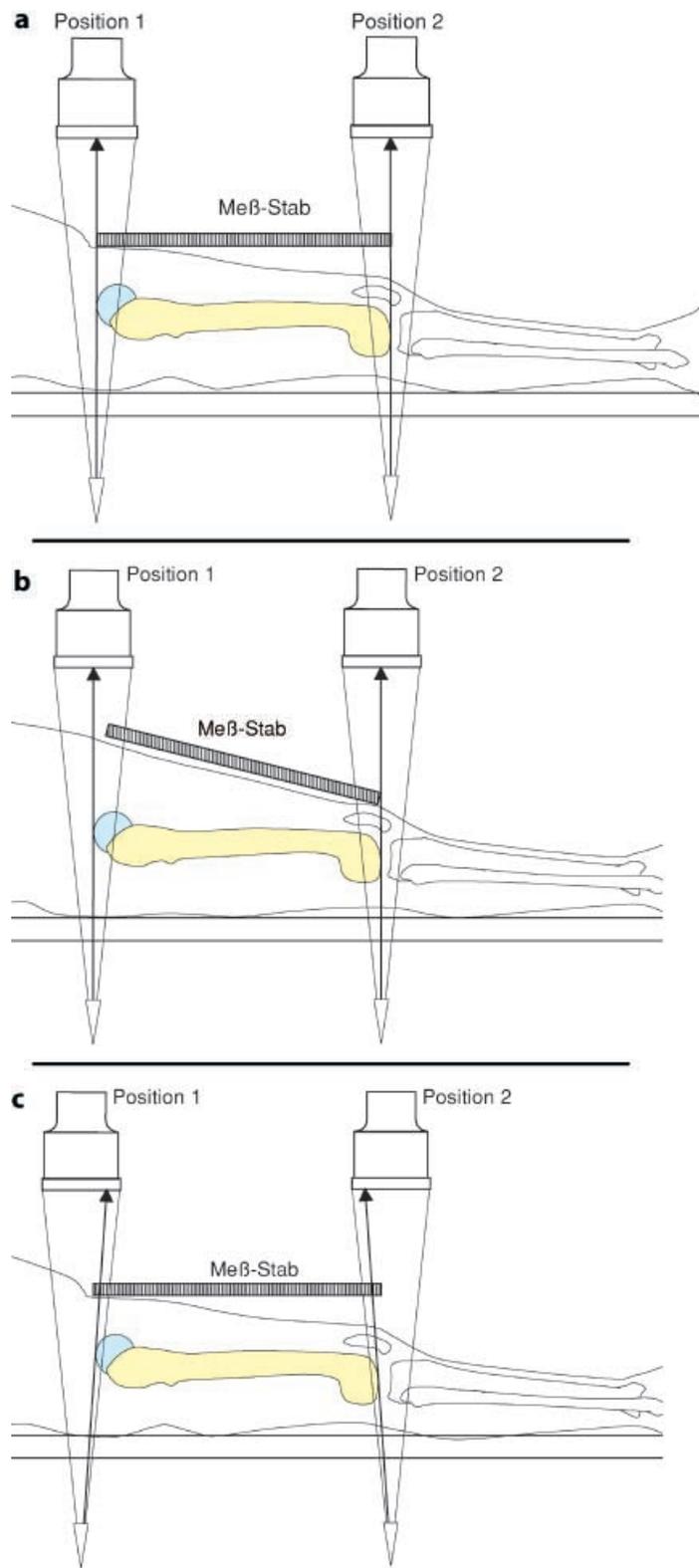


Abb. 9a–c ▲ Intraoperative, radiologische Längenbestimmung mit Hilfe des Bildverstärkers und mögliche Fehlerquellen (Zu beachten ist, dass sich die Fehler, siehe b und c, addieren können). a Korrekte Position von Patient, Messstab und Bildverstärker. b Schräge Position des Messstabes führt zu zu kurzen Messergebnissen. c Exzentrische Bildverstärkerplatzierung bewirken ebenfalls zu kurze Messergebnisse

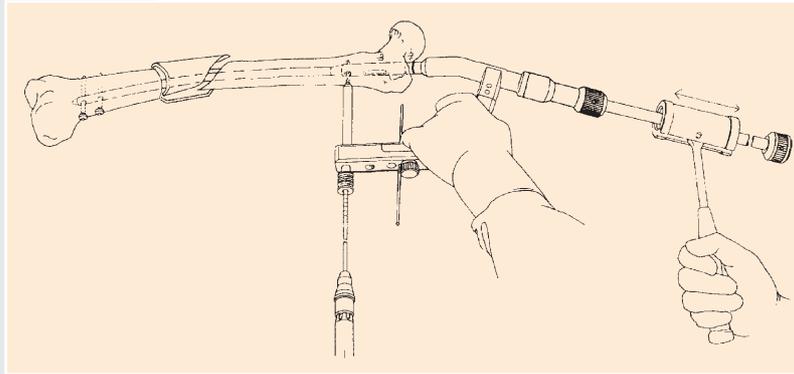


Abb. 10 ◀ **Längenkontrolle nach distaler Verriegelung mit dem Schlitzhammer über das mit dem Nagel verbundene Instrumentarium**

Schraubenbruch [8]. Insbesondere bei weit distal gelegenen Tibiafrakturen ist das in Abb. 11 beschriebene Vorgehen hilfreich.

Techniken zur Kontrolle von Länge und Rotation

Die Abbildungen 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 beschreiben Techniken zur intraoperativen Kontrolle von Länge, Rotation und Achsen in der Frontalebene.

Spezielle Repositionstechniken für verzögerte Fälle und Pseudarthrosen

In verzögerten Fällen trifft man häufig auf folgende Probleme:

- Fehlstellung (Verkürzung, Abknickung, Seitverschiebung),
- abgelaufene Reparatursprozesse mit Kallusbildung und straffen bindegewebigen Verbindungen erschweren oder verhindern die Reposition.
- Die Enden der Hauptfragmente sind sklerosiert und entweder eingengt oder verschlossen,
- während die Hauptfragmente häufig Zeichen einer inaktivitätsbedingten Osteoporose zeigen.

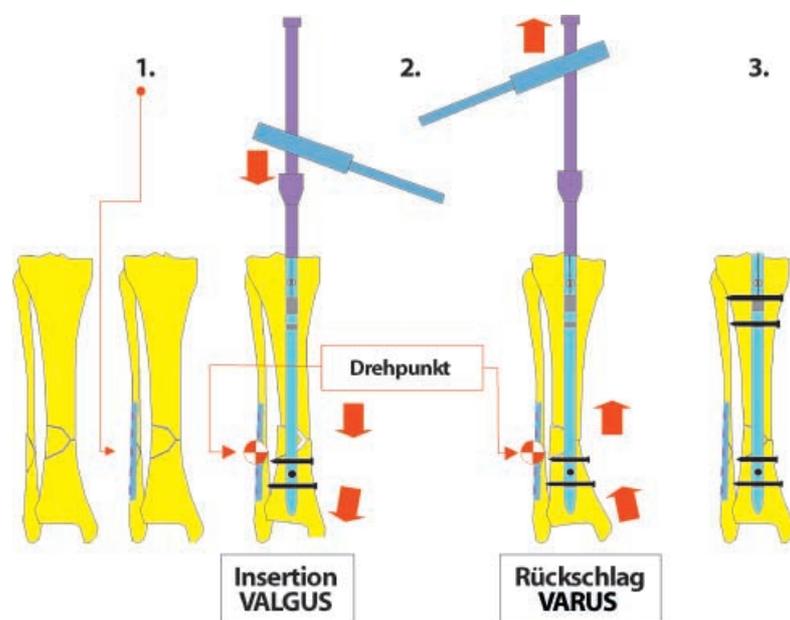


Abb. 11 ▲ **Achsenkontrolle nach Fibulaosteosynthese und distaler Verriegelung mit dem Schlitzhammer über das mit dem Nagel verbundene Instrumentarium**

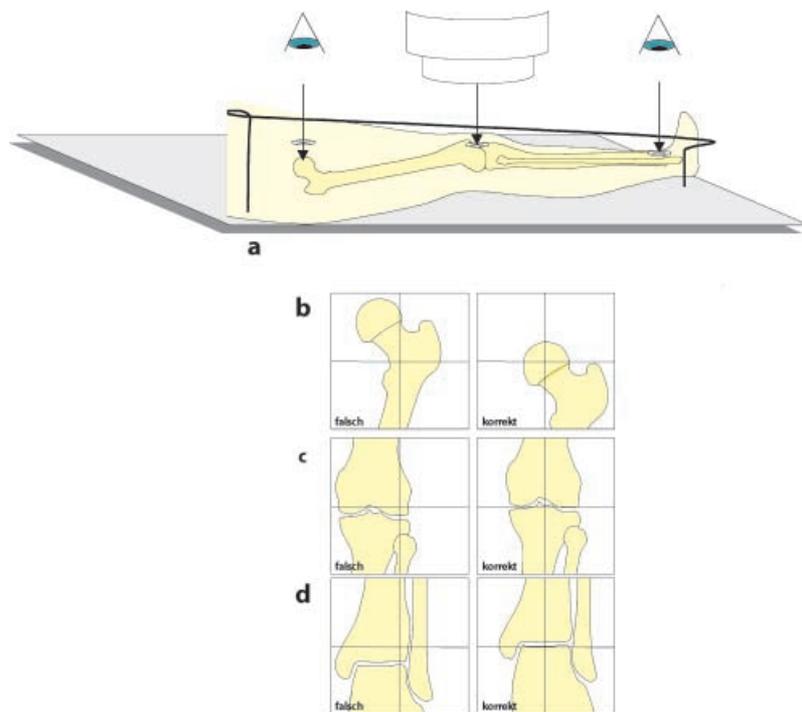


Abb. 12a–d ▲ Kabeltechnik zur Achsenkontrolle in der Frontalebene. a Das Knie ist gestreckt und die Patella zeigt nach ventral. In dieser Position wird der Winkel zwischen medialem Fußrand und der Vertikalen abgeschätzt und notiert. **Schritt 1:** Mit dem Bildverstärker in streng vertikaler Ausrichtung und dem Zentrum des Femurkopfes im Zentrum des Bildverstärkers wird das Femurkopfbereich mit dem Stift auf der Haut markiert. **Schritt 2:** In analoger Technik wird das Zentrum des Taluskörpers auf Haut oder Abdeckmaterial (straff gewickelte Bandagen) markiert. Die Assistenz spannt dann das Kabel des Elektroauters zwischen beiden Landmarken. **Schritt 3:** Das Kniegelenk wird im Bildverstärker dargestellt. Die Abweichung des projizierten Elektroauterkabels vom Zentrum des Kniegelenkes gibt Hinweise auf die Achsabweichung in der Frontalebene. b–d Um Fehlprojektionen zu vermeiden müssen die analysierten Strukturen jeweils im Zentrum des Strahlenfeldes (Monitors) abgebildet werden

Diese Bedingungen machen die intramedulläre Stabilisierung schwierig, selbst wenn die Fehlstellung nur gering ist. Eines der Probleme ist, dass die geraden Instrumente (Bohrer) sich nicht der Krümmung der Deformation anpassen sondern dazu tendieren, die Kortikalis zu perforieren. Während reine Winkelabknickungen häufig noch mit dem Distraktor korrigiert werden können, ist eine Fragmenttranslation erheblich schwieriger zu korrigieren. In dieser Situation können eine oder in Serie gesetzte Pollerschrauben helfen, Instrumente und Implantate in die gewünschte Richtung zu leiten (Abb. 16, 17).

Technik zur Prävention oder zur sekundären Korrektur von Fehlstellungen

Vorsichtige Wahl des Nageleintrittspunktes und der Nagelposition im proximalen und distalen Hauptfragment zur Vermeidung von Fehlstellungen in der Frontal- und Sagittalebene. Im Falle von proximalen oder distalen metaphysealen Frakturen kann der relative lose Kontakt zwischen Verriegelungsschraube und Nagel und das daraus resultierende Nagelspiel für die Korrektur von Fehlstellungen ausgenutzt werden. Korrektur und Stabilitätserhöhung können erreicht werden mit zusätzlichen Implantaten wie (temporärer) Fixateur externe, Pollerschrauben oder Platten.

Kallusdeformation durch temporäre externe Fixation

Ein temporär applizierter Fixateur externe (konventionelle transkortikale Pins oder Schanz-Schrauben) kann verwendet werden für eine graduelle oder einzeitige Korrektur und deren Retention [6].

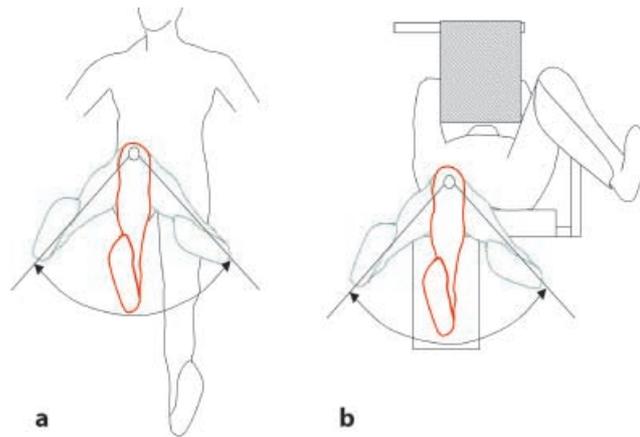


Abb. 13a, b ▲ Intraoperative, klinische Bestimmung der Femurrotation in Abhängigkeit von der Lagerung. a Hüft- und Kniegelenk sind gebeugt (nicht möglich bei antegrader Nagelung, wenn die Instrumente noch in situ sind). b Hüftgelenk gestreckt, Kniegelenk gebeugt: bevorzugt bei antegrader Nagelung, wenn die Instrumente noch in situ sind

„Pollerschrauben“

In Analogie zur Anlage des Fixateur externe kann der relativ lose Kontakt und das daraus resultierende Spiel des Nagels im Knochen genutzt werden für eine einzeitige, interne Problemlösung. Unter einer gewissen Überkorrektur der Fehlstellung wer-

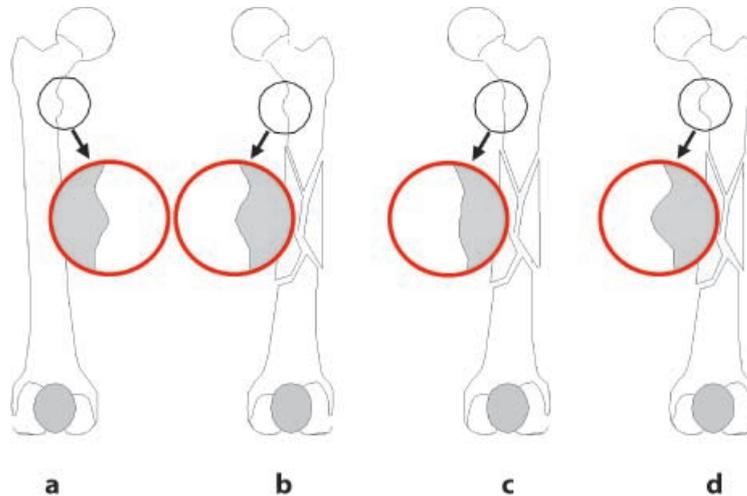


Abb. 14a–d ▲ Intraoperative, radiologische Bestimmung der Femurrotation unter Berücksichtigung der radiologisch bestimmten Kontur des Trochanter minor auf der kontra- und ipsilateralen Seite (Trochanter-minor-Zeichen). a Präoperativ wird vor der definitiven Lagerung des Patienten die Kontur des Trochanter minor der kontralateralen Seite dargestellt und im Bildverstärker-Memory gespeichert. Das Bein wird während dieser Aufnahme so gehalten, dass die Patella streng nach anterior zeigt. Anstelle der Patella bei gestrecktem Knie kann das neben dem Tisch gebeugte Knie mit hängendem Unterschenkel zur Ausrichtung und Orientierung des distalen Hauptfragmentes benutzt werden. b Vor der Verriegelung des zweiten Hauptfragmentes wird das Bein solange gedreht, bis die Patella streng nach ventral zeigt. Das proximale Hauptfragment wird (z. B. mit Hilfe einer Schanz-Schraube) unter p.-a.-Bildverstärkerkontrolle solange gedreht, bis die Kontur des Trochanter minor mit der kontralateralen Seite übereinstimmt. c Im Falle einer Außenrotationsfehlstellung ist die Kontur der Trochanter minor verkleinert. Wenn die Patella streng nach ventral zeigt, ist der exzentrisch gelegene Trochanter minor teilweise vom Femurschaft verdeckt. d Im Falle einer Innenrotationsfehlstellung ist die Kontur der Trochanter minor vergrößert. Wenn die Patella streng nach ventral zeigt, ist der exzentrisch gelegene Trochanter minor weniger vom proximalen Femurschaft verdeckt

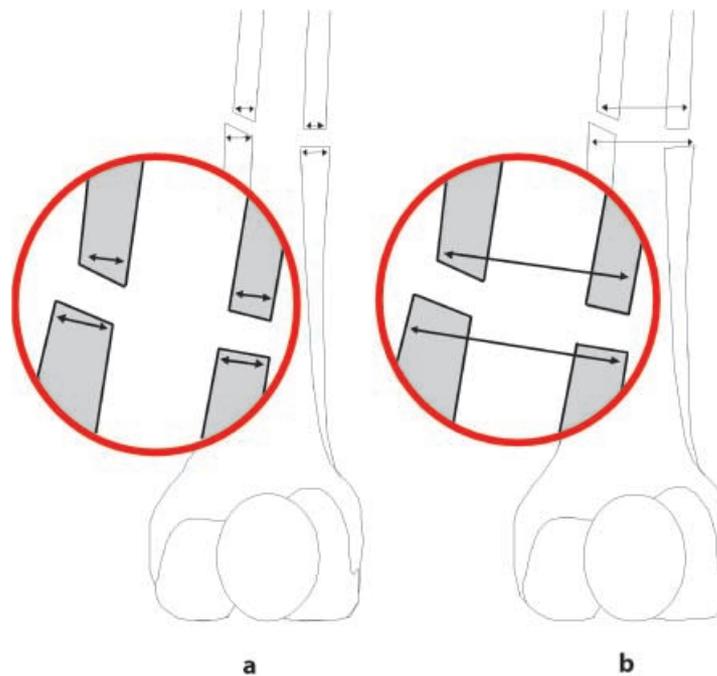


Abb. 15a, b ▲ Radiologische Hinweise auf das Vorhandensein eines Rotationsfehlers unter Verwendung des „Kortikalissprung“- und „Durchmesserdiffereenzzeichens“. Positiv nur bei Vorhandensein großer Rotationsfehler. a Kortikalissprungzeichen: Bei vorhandenen Drehfehlern können die kortikalen Strukturen des proximalen und distalen Hauptfragmentes mit unterschiedlicher Dicke abgebildet werden. b Durchmesserdiffereenzzeichen: Dieses Zeichen ist positiv in den Fällen, wo das Knochenrohr ovale und nicht runde Konfiguration aufweist. In diesen Fällen werden proximales und distales Hauptfragment mit unterschiedlichen Querdurchmessern abgebildet

den unter BV-Kontrolle Pollerschrauben bikortikal platziert, die eine Redislokation der des Nagels in die vorherige Position verhindern [6, 6a, 7]. Diese Schrauben steigern gleichzeitig die Steifigkeit des Knochenimplantatkomplexes. Im Falle eines vorhandenen, fehlplatzierten Eintrittspunktes können diese Pollerschrauben auch den alten, falschen Nagelkanal wirkungsvoll blockieren, in den das Implantat sonst immer wieder zurück rutschen würde (Abb. 16, 17).

Fibula-Osteosynthese

Eine multizentrische Studie (AO A6) hat gezeigt, dass metaphysäre Tibiafrakturen mit Fibulafrakturen in der gleiche Höhe ein höheres Risiko für Heilungsstörungen haben als Frakturkombinationen auf unterschiedlichem Niveau. Diese Beobachtung kann durch Experimente von Weber et al. nicht erklärt werden, die gezeigt haben, dass die Stabilisierung der Fibula in einem Tibiadefektmodell die Frakturspaltbewegung nicht signifikant beeinflusste. Die Reihenfolge des Vorgehens verdeutlicht Abb. 11.

Abstützung und Zuggurtungsplatten

In proximalen metaphysären Frakturen kann die Verwendung von Platten als Zusatzimplantate ebenfalls hilfreich sein, wobei auf sparsame Weichteilablösung und Verwendung kleiner kurzer Implantate geachtet werden sollte. Abhängig von Typ und Lokalisation der Fehlstellung agieren diese Platten, vornehmlich Zuggurtungsimplantate (Abb. 11), als Implantate, die eine Seitverschiebung verhindern und seltener mit einer Abstützfunktion.

Implantatrotation

Im Falle von Fehlstellungen in der Frontalebene kann die Implantatkrümmung für eine Korrektur der Fehlstellung an Tibia (bei proximalen Frakturen) und Femur ge-

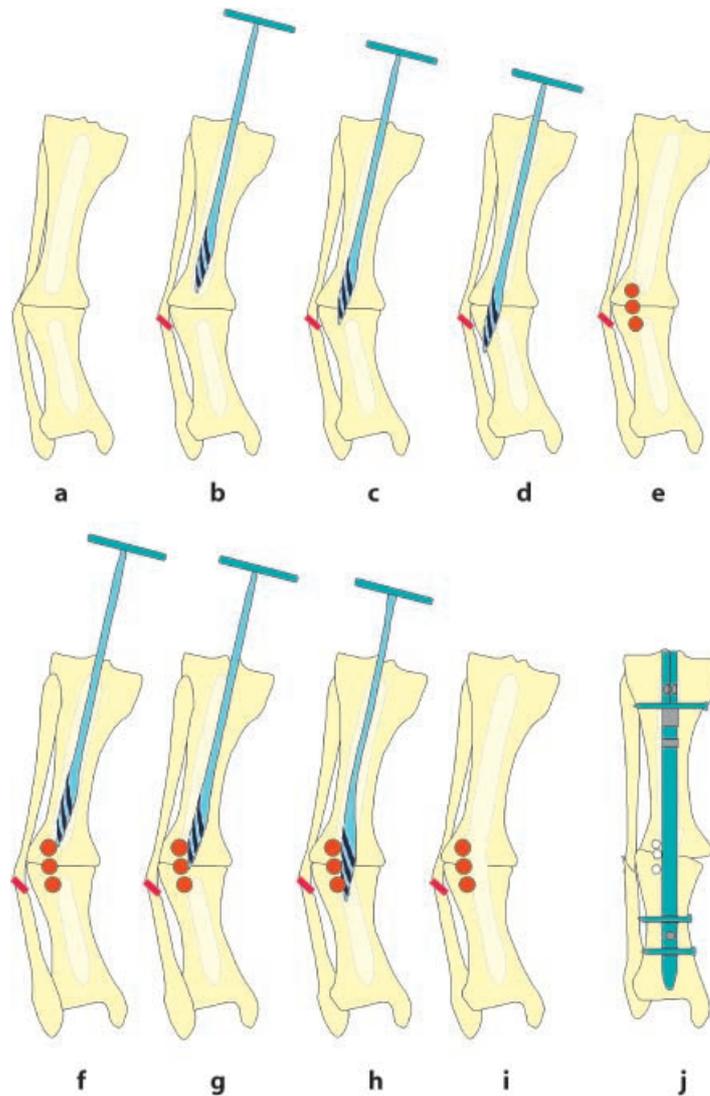


Abb. 16a–j ▲ **Nagelmanipulation bei verzögerter Heilung, sklerosierter Frakturzone und Fehlstellung unter Verwendung von „Pollerschrauben“ als Manipulationstool.** a–d Die Manipulation mit dem Handbohrer führt aufgrund der Fehlstellung und der harten Knochenkonsistenz in der Sklerosezone häufig zur Perforation der Markhöhle. e Die Platzierung mehrerer Pollerschrauben in Serie kann das Problem lösen, da so der Handbohrer mit flexiblem Schaft „um die Ecke“ dirigiert werden kann. Die erste Pollerschraube wird dort platziert, wo der Handbohrer hintendiert, aber den Markkanal nicht verlassen soll. Die anderen werden so platziert, dass sie die von der ersten Schraube erreichten Richtungskorrekturen noch weiter schrittweise verstärken. f Die Spitze des Handbohrers trifft auf die Pollerschraube und rutscht in Richtung Markhöhle. g–h Dieser Vorgang wiederholt sich bei der nächsten Pollerschraube, was die Richtung des Bohrers unter Biegung des Bohrer-schaftes weiter verbessert. i Sobald der Kanal geschaffen ist, j kann die Achse mit der Insertion des sehr viel steiferen Nagels korrigiert werden. Gegebenenfalls ist eine zuggurtende Fibulaplatte hilfreich

nutzt werden [6, 7]. Nach temporärer Entfernung der distalen und proximalen Verriegelungsschrauben können die Hauptfragmente (bei fehlender Verklebung, z. B. unaufgebohrte Nagelung) um das Implantat rotiert werden. Nach Erreichen der Korrektur werden die Verriegelungsschrauben neu platziert. Es ist zu beachten, dass dieses Verfahren auch die Stellung in der Sagittalebene beeinflusst, was aber in der Regel weniger problematisch ist (Abb. 18).

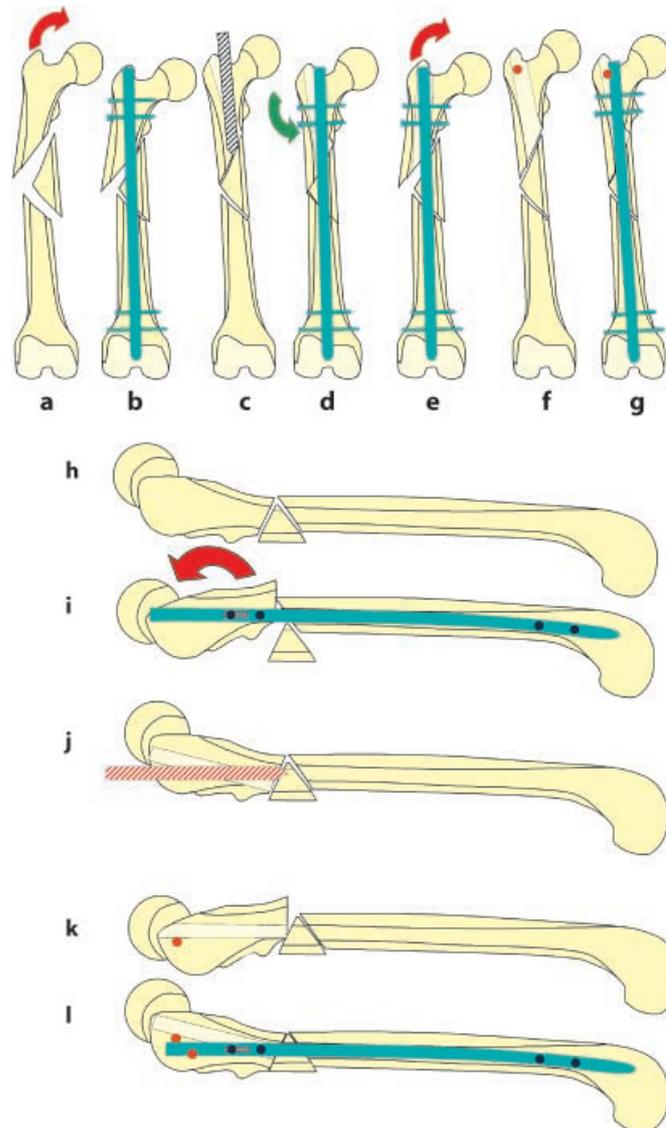


Abb. 17a–l ▲ Prävention einer falschen Nageleintrittsstelle bei Vorhandensein eines fehlplatzierten Nagelkanals mit Hilfe von „Pollerschrauben“. a, h Eine fehlplatzierte Markraumöffnung resultiert bei proximalen Femurfrakturen häufig in Fehlstellung und Instabilität. b, i Da das proximale Hauptfragment in der Regel gebeugt und abduziert ist, ist die falsch platzierte Markraumöffnung in der Regel zu weit ventral und lateral. Dies führt zu einer Antekurvations- und Varusdeformität. d Selbst bei korrekter Platzierung einer neu durchgeführten Markraumöffnung und initial korrekter Reposition, e hat der Nagel infolge der großen einwirkenden Muskelkräfte eine starke Tendenz in die frühere Fehlposition zurück zu rutschen. f, k Dies kann mit Pollerschrauben verhindert werden, die auf jeder Seite in Frontal- und Sagittalrichtung nach temporärer Nagelentfernung platziert werden. Die Pollerschrauben werden im oder in unmittelbarer Nähe des alten Nagelpfades platziert, um g, l den Nagel am Zurückrutschen zu hindern. Während die Pollerschrauben in der Frontalebene nach der proximalen Verriegelung entfernt werden können, sollten die a.-p.-Pollerschrauben in situ verbleiben

Fixierung

Verriegelungsschrauben

Bei der ungebohrten Nagelung werden alle, bei der aufgebohrten Nagelung heute fast alle Frakturen proximal und distal verriegelt (Tabelle 1). Stabile Frakturmuster wurden früher bei entsprechenden Möglichkeiten „dynamisch“ verriegelt. Bei entspre-

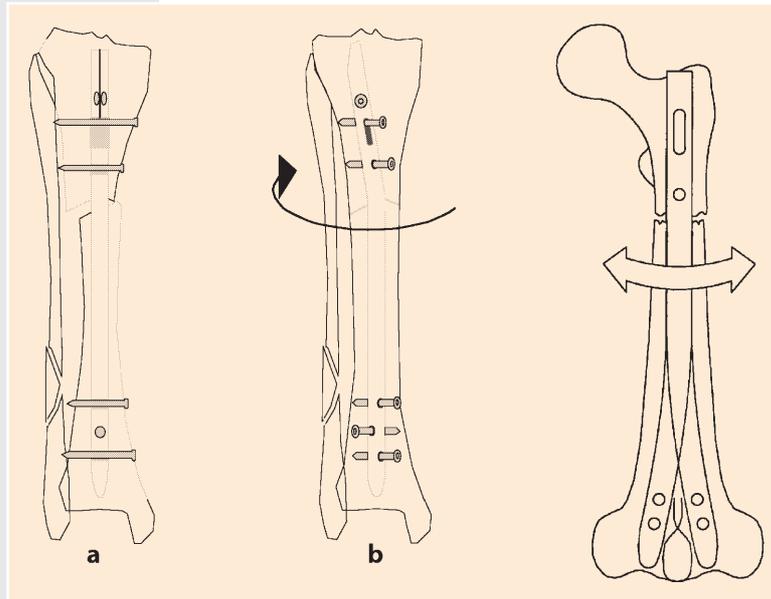


Abb. 18 ◀ **Implantatrotation zur Korrektur von Achsenfehlern.** Die Verriegelungsbolzen müssen vor der Implantatrotation entfernt werden. Das Implantat wird entsprechend der Fehlstellung rotiert, womit gleichzeitig eine Achsenkorrektur in der Frontalebene erfolgt. Eine gleichzeitig entstehende Achsabweichung in der Sagittalebene ist in der Regel von geringerer Bedeutung

Häufige Fehler bei der Freihandtechnik:

- ▶ fehlende „Ankörung“,
- ▶ zu große initiale axiale Kraft bei schrägen Knochenoberflächen (Ableiten, Fehlplatzierung),
- ▶ ungenügende Zahl distaler Bolzen (in der Regel alle Optionen nutzen!),
- ▶ ungenügend orthograde Einstellung der Nagelbohrungen im Bildverstärker

chender Verzahnung im Frakturbereich ist die Stabilität um die Längsachse des Knochens (Rotation) gesichert. Die Verwendung solider Implantate basiert nicht mehr auf der Verklemmung zwischen Nagel und Implantat und bedarf deshalb grundsätzlich der proximalen und distalen Verriegelung.

Die distale Verriegelung kann mit der Freihandtechnik unter Bildverstärkerkontrolle z. B. mit Hilfe eines strahlentransparenten Winkelgetriebes oder einem entsprechenden Halter für einen Steinmann-Nagel durchgeführt werden. Die proximale Verriegelung erfolgt über einen am Nagel befestigten Zielbügel ohne BV-Kontrolle.

Am Femur sind zwei distale Verriegelungsschrauben sinnvoll. Zwar haben Studien gezeigt, dass keine signifikanten Unterschiede in der Torsionssteifigkeit oder der axialen Bruchlast bestehen wenn eine oder zwei distale 6 mm Verriegelungsschrauben am Femur verwendet werden. Trotzdem werden zwei Verriegelungsschrauben empfohlen und zwar aus folgenden Gründen:

Schrauben-Nagel-Verbindung

Nagelspielprobleme. Aufgrund des Herstellungsprozesses gibt es sowohl für die Schrauben als auch für die Verriegelungsbohrungen in den Nägeln Herstellungstoleranzen. Dies führt zu Nagelspielphänomenen zwischen Nagel und Verriegelungsschraube und der Nagel kann entlang der Verriegelungsschraube „wandern“. Dieses Nagelspiel kann zu Instabilität und Fehlstellung in der Ebene der platzierten Schrauben (in der Regel die Frontalebene) führen. In der klinischen Situation wird das meist durch eine akzidentell nicht parallele Insertion der Verriegelungsschrauben etwas kompensiert. Schon aus diesem Grund ist die Verwendung von zwei distalen Schrauben empfehlenswert.

Schraubenbruch. Derzeit besteht für jedes traumatologisch-orthopädische Implantat ein prinzipielles Risiko zur Materialermüdung und zum Implantatversagen. Das ist u. a. abhängig von verwendetem Material, Implantatgeometrie und -design, Oberflächenstruktur und -behandlung, den einwirkenden Kräfte und Momente sowie der Anzahl an Lastzyklen. Bei Nägeln mit kleinem Durchmesser (unaufgebohrte Systeme) muss der Durchmesser der Verriegelungsschrauben kleiner sein als bei Nägeln mit großem Durchmesser, die in der Regel mit der aufgebohrten Technik implantiert werden. Diese Tatsache schlägt sich in einer vergleichsweise hohen Rate an Verriegelungsschraubenbrüchen nieder.

Da die distalen Verriegelungsschrauben gewöhnlich den Schwachpunkt des Systems markieren, sollten alle Anstrengungen unternommen werden, die mechanische Festigkeit in diesem Bereich zu erhöhen. Die einfachste, kostengünstigste und ef-

effektivste Art und Weise ist die Verwendung aller möglichen Schraubenoptionen, d. h. an der Tibia drei und am Femur zwei Schrauben.

Technik für die Verriegelungsschraubenplatzierung

Strahlentransparentes Winkelgetriebe

Das strahlentransparente Winkelgetriebe erlaubt die Bohrung unter kontinuierlicher Bildverstärkerkontrolle ohne dass die Hände in den Strahlengang gebracht werden. Spezielle dreischneidige Bohrer reduzieren die Tendenz der Bohrer, an schrägen Knochenflächen abzugleiten. Eine kurze Bohrerspitze minimiert die Wahrscheinlichkeit der versehentlichen Erfassung von Weichteilen in den laufenden Bohrer und erlaubt das Bohren ohne Schutzbohrhüllen.

Distales Zielgerät (DAD)

Es bestehen weiterhin kontroverse Diskussionen über die Gefahren einer Strahlenexposition des OP-Personals während der Verriegelungsnagelung. Kürzlich konnten Mehlman und DiPasquale zeigen, dass das OP-Personal und hier insbesondere der Operateur innerhalb eines Abstandes von 24 inch zum Bildverstärkerstrahl (wie bei der Freihandtechnik unter Verwendung des strahlentransparenten Winkelgetriebes) eine signifikante Strahlenexposition erfährt, insbesondere im Bereich der häufig ungeschützten Augen, des Halses oder der Hände [9].

Techniken mit am proximalen Nagelende befestigten Zielbügeln versagen, weil einfache Zielbügel nicht die insertionsbedingte Nagelverformung (Biegung, Torsion) berücksichtigen können. Die Freihandtechnik ist somit weiterhin die am meisten verbreitete Technik für die distale Verriegelung.

Kürzlich wurde ein komplett röntgenstrahlenunabhängiges Zielgerät für die distale Verriegelung (Distal Aiming Device, DAD) für ungeschlitzte Implantate entwickelt (Abb. 19). Ungeschlitzte Implantate weisen keine wesentliche insertionsbedingte Nageltorsion auf. Das DAD basiert auf einem Zielbügel, der über einen Arbeitskanal auf den deformierten Nagel nachjustiert wird, und einem asymmetrischen Abstandsgeber. In prospektiven randomisierten Studien an humanen Ganzkörperpräparaten wurden DAD und Winkelgetriebe verglichen.

Tabelle 1

Verriegelungsprotokoll Tibia (Beispiel UTN)

	Frakturlokalisierung Segment	Frakturtyp	Proximale Verriegelung
1	1-2	Alle A-C Frakturen	Statisch + dynamisch + schräg
2			
3	3-5	Alle A3, gut adaptierte B2-3, C2 Frakturen	Dynamisch
4			
5	3-5	Alle A1-2, B1, ungenügend adaptierte B2-3, C2, alle C1 und C3 Frakturen	Statisch + dynamisch

Die Lokalisation bezieht sich auf die proximalste Frakturausdehnung in der proximalen Tibia und die distalste Frakturausdehnung in der distalen Tibia. Statisch: „statische“ Verriegelung im runden Querloch. Dynamisch: „dynamische“ Verriegelung in Längsloch. Schräg: „statische“ Verriegelung in schrägem ausgerichtetem Rundloch. Distale Verriegelung: distal werden immer alle 3 Verriegelungsoptionen besetzt. Proximal werden bei Frakturen im 1. und 2. Fünftel immer alle 3 Verriegelungsoptionen besetzt, bei Frakturen im Segment 3-5 werden die Optionen entsprechend dem Frakturtyp besetzt

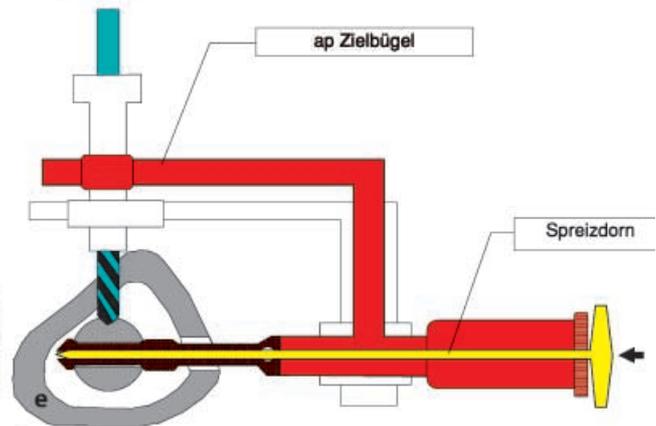
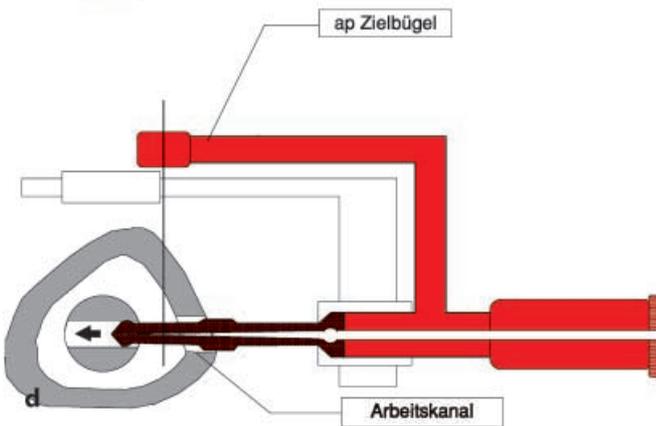
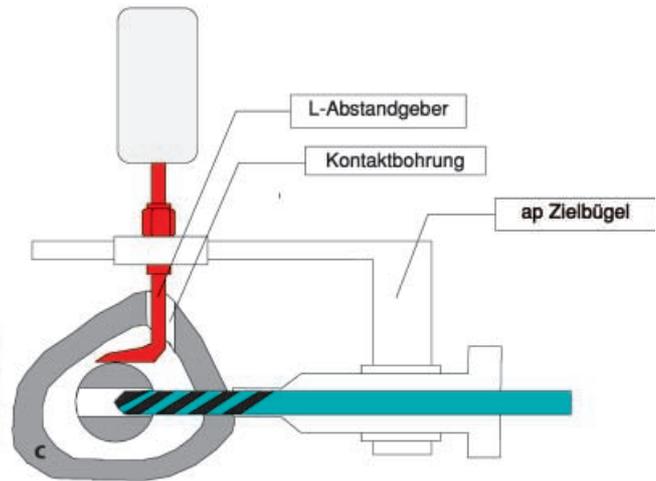
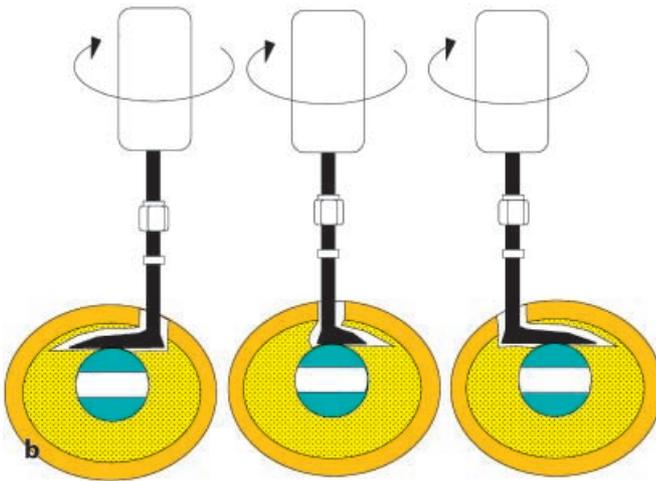
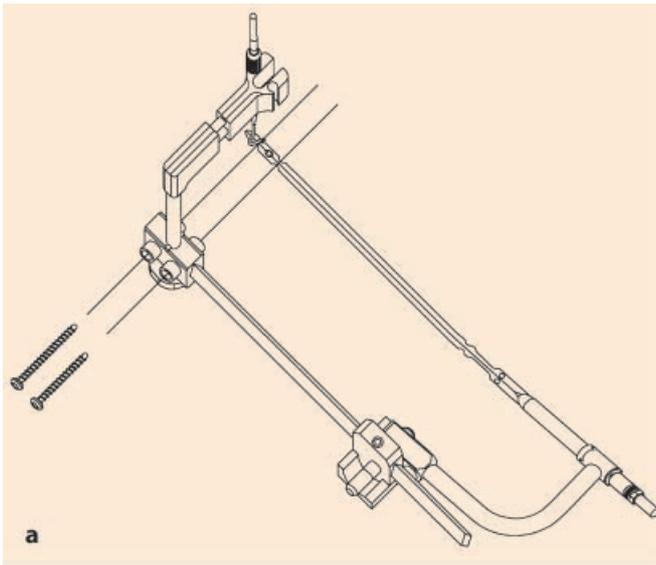


Abb. 19a–e ▲ Wirkungsweise des Distal Aiming Device (DAD). a Der Nagel ist fixiert am Einschlagbügel. Der DAD-Zielbügel wird auf die korrekte Länge mit den distalen Verriegelungsbohrungen gebracht. Anschließend wird der Nagel z. B. in die Tibia eingebracht. b Mit Hilfe des DAD-Zielbügels wird durch eine Stichinzision eine 6 mm Kontaktbohrung vorzugsweise etwas medial der Mittellinie durch die ventrale Kortikalis der distalen Tibia durchgeführt. Der spongiöse Knochen zwischen ventraler Kortikalis und Nagel wird mit Hilfe einer L-förmigen Kürette entfernt. Bei Nagelkontakt kommt es zu einem sehr charakteristischen taktilen Metall-Metall-Rückkopplungsphänomen. c Die Kürette wird entfernt und ein ähnlich konfigurierter ventraler Abstandgeber wird durch die Kontakt-

öffnung auf den Nagel aufgesetzt. Nach Verifizierung des korrekten Abstandgeber-Nagelkontaktes wird der Abstandgeber gegen den Nagel gepresst und mit dem DAD-Zielbügel verbunden. Beide Querbohrungen des DAD-Zielbügels sind nun genau auf die Querbohrungen des Nagels ausgerichtet. d Die Öffnung der oberen Querbohrung wird in der medialen Kortikalis auf 6 mm erweitert. Durch diese Öffnung wird ein medialer Abstandgeber auf den Nagel aufgesetzt. e Ein in den medialen Abstandgeber eingesteckter Spreizdorn spreizt die Spitze des medialen Abstandgebers und verbindet diesen fest mit dem Nagel. Die a.-p.-Bohrung des DAD-Zielbügels ist nun genau auf die a.-p.-Bohrung des Nagels ausgerichtet

In der DAD-Gruppe waren Gesamtoperationszeit, distale Verriegelungszeit, Gesamtdurchleuchtungszeit und die Zeit für die Schraubenplatzierung signifikant geringer. In der DAD-Gruppe betrug die distale Verriegelungszeit 0 Sekunden, während die Versagerquote in beiden Gruppen gleich war (1,6% oder 1 von 60 Schrauben). Am Femur und bei einem erfahrenen Chirurgen waren die Operationszeiten nur geringfügig unterschiedlich, die Strahlenexposition aber wieder in der DAD-Gruppe hochsignifikant vermindert.

Andere Verfahren

Nahezu alle Verfahren zur distalen Verriegelung beruhen auf der Verwendung des Röntgenbildverstärkers. Es wurden zahlreiche Vorrichtungen und Techniken für Vermeidung von Röntgenstrahlen während der distalen Verriegelung entwickelt: am proximalen Nagelende fixierte Zielbügel, am Bildverstärker fixierte Zielbügel, Magnetfelder, flexible Bohrwellen vom Nagelinneren und Formanalysen des deformierten Implantates. Von all diesen Verfahren haben die am proximalen Nagelende fixierten Zielbügel das größte Interesse erfahren.

Dynamisierung

Am Femur ist die Dynamisierung von statisch verriegelten Nägeln nur selten notwendig [3]. An der Tibia wird dagegen bei speziellen Frakturformen mit hohem Risiko für eine verzögerte Frakturheilung eine routinemäßige Dynamisierung in Verbindung mit einer Knochentransplantation empfohlen [2]. Allerdings fanden sich in diesem Patientengut [2] große verbliebene Frakturspalten und ausgedehnte Distractionen der Hauptfragmente. Es ist deshalb vermutlich eher angezeigt, die Fraktur während des initialen Eingriffes zu „dynamisieren“, indem die distale Verriegelung zuerst durchgeführt und anschließend über das Einschlaggestänge („Rückschlagtechnik“) eine Adaptation der Hauptfragmente herbeigeführt wird ([6, 7]; Abb. 8).

Literatur

1. Baumgärtel F, Dahlen C, Stiletto R, Gotzen L (1994) Technique of using the AO-Femoral Distractor for femoral intramedullary nailing. *J Orthop Trauma* 8: 315–321
2. Bone LB, Kassman S, Stegemann P, France J (1994) Prospective study of union rate of open tibial fractures treated with locked, unreamed intramedullary nails. *J Orthop Trauma* 8: 45–49
3. Brumback RJ, Reilly JP, Poka A, Lakatos RP, Bathon GH, Burgess AR (1988) Intramedullary nailing of femoral shaft fractures. Part I: Decision-making errors with interlocking fixation. *J Bone Joint Surg Am* 70: 1441–1452
4. Freedman EL, Johnson EE (1995) Radiographic analysis of tibial fracture malalignment following intramedullary nailing. *Clin Orthop* 315: 25–33
5. Furlong AJ, Giannoudis PV, Smith RM (1997) Heterotopic ossification: a comparison between reamed and unreamed femoral nailing. *Injury* 28: 9–14
6. Krettek C, Rudolf J, Schandelmaier P, Guy P, Könemann B, Tscherne H (1996) Unreamed intramedullary nailing of femoral shaft fractures: operative technique and early clinical experience with the standard locking option. *Injury* 27: 233–254
- 6a. Krettek C, Schandelmaier P, Rudolf J, Tscherne H (1994) UCH Aktueller Stand der operativen Technik für die unaufgebohrte Nagelung
7. Krettek C, Schandelmaier P, Tscherne H (1995) Non-reamed interlocking nailing of closed tibial fractures with severe soft tissue injury: Indications, technique and clinical results. *Clin Orthop* 315: 34–47
8. Krettek C, Tscherne H (1997) Removal of a broken solid femoral nail: a simple push-out technique. A case report. *J Bone Joint Surg Am* 79: 247–251
9. Mehlman CT, DiPasquale TG (1997) Radiation exposure to the orthopaedic surgical team during fluoroscopy: „How far away is far enough?“. *J Orthop Trauma* 11: 392–398
- 9a. Moed BR, Watson JT (1994) Intramedullary nailing of the tibia without a fracture table: the transfixion pin destructure technique. *J Orthop Trauma* 8: 195–202
10. Müller C, Frigg R, Pfister U (1993) Effect of flexible drive diameter and reamer design on the increase of pressure in the medullary cavity during reaming. *Injury* 24: 40–47
11. Ryf C, Melcher GA, Rüedi T (1993) Pneumatische Manschette als Repositionshilfe bei geschlossener Marknagelung. *Unfallchirurg* 98: 617–619
12. Schandelmaier P, Krettek C, Wolter K, Tscherne H (1999) Ability to kneel after tibial nailing: The length of incision matters. *OTA 1999 Annual Meeting, Charlotte, NC, USA, Abstractbook*
13. Stürmer KM, Tammen E (1986) Verminderung der corticalen Gefäßschädigung durch kontinuierliches Spülen und Absaugen während des Aufbohrens der Markhöhle. *Hefte Unfallheilkd* 181: 236–240
14. Tornetta PI, Tiburzi D (1997) The treatment of femoral shaft fractures using intramedullary interlocked nails with and without intramedullary reaming: a preliminary report. *J Orthop Trauma* 11: 89–92

Häufige Fehler:

- ▶ Dynamisierung zu spät,
- ▶ Dynamisierungshindernisse nicht beachtet (Sklerosezonen)

Fragen zur Zertifizierung

1. Welche Kombination ist richtig ?

Aussage 1: Bei der Tibiamarknagelung liegt der Hautschnitt und die Markraumeröffnung genau in Verlängerung der Tibiavorderkante weil die Platzierung von Hautschnitt und Markraumeröffnung genau in Verlängerung der Markhöhle die Implantateinbringung erleichtert.

- a) Alles richtig.
- b) Aussage 1 und 2 sind richtig, die Verknüpfung ist falsch.
- c) Aussage 1 ist richtig, Aussage 2 ist falsch.
- d) Aussage 1 ist falsch, Aussage 2 ist richtig.
- e) Beide Aussagen sind falsch.

2. Welche Kombination ist richtig?

Die Markraumeröffnung des Femurs und die Nagelinsertion bei der antegraden Femurnagelung geschieht am einfachsten in Adduktion und Flexion des proximalen Femur weil In Adduktion der Traktus iliotibialis entspannt ist.

- a) Alles richtig.
- b) Aussage 1 und 2 sind richtig, die Verknüpfung ist falsch.
- c) Aussage 1 ist richtig, Aussage 2 ist falsch.
- d) Aussage 1 ist falsch, Aussage 2 ist richtig.
- e) Beide Aussagen sind falsch.

3. Welche Kombination ist richtig?

Das Verschieben des Führungsdrahtes oder Nagels vom proximalen in das distale Hauptfragment am Femur geschieht am einfachsten in Neutralstellung des proximalen und Abduktion des distalen Hauptfragmentes weil in Abduktion des distalen Hauptfragmentes der Traktus iliotibialis entspannt ist.

- a) Alles richtig.
- b) Aussage 1 und 2 sind richtig, die Verknüpfung ist falsch.
- c) Aussage 1 ist richtig, Aussage 2 ist falsch.
- d) Aussage 2 ist richtig, Aussage 1 ist falsch.
- e) Beide Aussagen sind falsch.

4. Welche Aussage ist falsch?

- a) Pollerschrauben dienen der Verriegelung von Marknägeln.
- b) Pollerschrauben können zur Achskorrektur verwendet werden.
- c) Pollerschrauben dienen der Stabilitäts-erhöhung.
- d) Pollerschrauben können als Manipulations-tool verwendet werden.
- e) Pollerschrauben sollten bikortikal eingebracht werden.

5. Welche Aussage ist falsch ?

- a) Bei der unaufgebohrten antegraden Nagelung ist zunächst die distale Verriegelung empfehlenswert.
- b) Die Reihenfolge der Verriegelung spielt bei der unaufgebohrten antegraden Nagelung keine Rolle.
- c) Bei distaler Unterschenkelfraktur bringt die Stabilisierung der Fibulafraktur auf gleicher Höhe wesentlichen Stabilitätszuwachs.
- d) Bei distaler Unterschenkelfraktur nach Versorgung der Fibula führt ein Vortreiben des Nagels nach distaler Verriegelung zu einer Valgusstellung der Tibiafragmente.
- e) Bei distaler Unterschenkelfraktur nach Versorgung der Fibula führt ein Rückschlagen des Nagels nach distaler Verriegelung zu einer Varusstellung der Tibiafragmente.

6. Welche Aussage ist richtig

- a) Bei A-Frakturen in Schaftmitte müssen immer alle Verriegelungsoptionen genutzt werden.
- b) Steil verlaufende Spiralfrakturen können proximal risikolos dynamisch verriegelt werden.
- c) Das Distal Aiming Device (DAD) bringt keine signifikante Verminderung der intraoperativen Strahlenbelastung des Operateurs.
- d) Die ‚Blumensaat‘ Linie bietet keine gute Orientierung bei der retrograden Femurnagelung.
- e) Verriegelung in Überdistraktion erhöht das Risiko für die Entwicklung eines Kompartmentsyndroms, Bolzenbruch und Frakturheilungsstörungen.

Die Antworten folgen in Heft 10/2001

Einsendeschluss: 21.09.2001

Auflösung aus Heft 6/2001: 1a, 2b, 3d, 4c, 5d

