

Fixateur externe und Knochenbruchheilung

■ Markus Muhm, Hartmut Winkler

Zusammenfassung

Die definitive Frakturbehandlung mit dem Fixateur externe orientiert sich im Wesentlichen am Weichteilschaden, der Frakturform und -lokalisierung der verletzten Extremität. Die intakte Durchblutung im Frakturbereich ist eine wesentliche Voraussetzung für eine ungestörte Heilung. Die zweite Voraussetzung ist eine exakte Reposition mit kleinem Frakturspalt. Die Knochenbruchheilung unter Fixateur-externe-Bedingungen soll zur Kallusbildung führen. Durch interfragmentäre Bewegungen und die Größe des Frakturspalts werden die Heilungsvorgänge beeinflusst. Kleine Bewegungen führen durch Gewebedehnung zu Kalluswachstum, welches bei Überbrückung des Frakturspalts zu einer zunehmenden Stabilität der Fraktur führt. Zu große Bewegungen können bei großen Frakturspalten zur Pseudarthrose führen. Der Fixateur externe bietet in unterschiedlichen Montageformen bei

Berücksichtigung bestimmter biomechanischer Bedingungen eine ausreichende Stabilität der Osteosynthese, welche aber interfragmentäre Bewegungen zur Stimulation der Kallusheilung zulässt. Destabilisierende Maßnahmen an der Fixateur-externe-Konstruktion oder Belastungssteigerung der Extremität fördern bei zunehmender Kallusbildung den Heilungsprozess.

External Fixation and Fracture Healing

The use of an external fixator in the definitive therapy of fracture healing is largely dependent on the pre-existing soft-tissue damage and the extent and localisation of the fracture of the injured extremity. Conditions for adequate fracture healing are, first, an intact vascular perfusion at the fracture site and, second, an exact fragment reduction with small fracture gaps. The use of an external fixator has to pro-

mote callus formation for bony consolidation of the fracture. The process of callus formation and subsequent bone healing is influenced by interfragmentary movement and the size of the fracture gaps. Small movements in callus cause tissue strain and therefore accelerate callus formation. This results in the bridging of the fracture gap and subsequently in stability at the fracture site. A combination of large interfragmentary movements and large fracture gaps carries the risk of non-union. Sufficient stability of the osteosynthesis is gained by the use of different types of external fixators that consider different biomechanical parameters. Adequate interfragmentary movement for stimulation of callus formation is required. Destabilising measures on the external fixator construction or increased weight-bearing of the extremity accelerate callus formation and the healing process.

Einleitung

Indikationen für den Fixateur externe

Neben den vielfältigen Möglichkeiten, die in diesem Heft vorgestellt werden, sind die wichtigsten Indikationen für die Anwendung des Fixateur externe Frakturen mit höhergradigen geschlossenen und offenen Weichteilschäden und Frakturen im Rahmen eines mehrfachverletzten oder polytraumatisierten Patienten. Der Fixateur externe ermöglicht die Reposition und Stabilisierung der Fraktur ohne zusätzliche Weichteilschädigung oder wesentliche systemi-

sche Belastung durch den operativen Eingriff. In den meisten Fällen dient er als temporärer Stabilisator. Nach Konsolidierung der Weichteile oder nach intensivmedizinischen Behandlungsmaßnahmen und systemischer Stabilisierung des Unfallverletzten wird er im Rahmen eines Verfahrenswechsels durch eine interne Osteosynthese ersetzt. Die Versorgung von Schaftfrakturen von Femur und Tibia ist bei Kindern und Heranwachsenden mit dem Fixateur externe sicher und mit geringem zusätzlichen Weichteiltrauma möglich, wenn gleich dieses Verfahren zunehmend von intramedullären elastisch stabilen Verfahren abgelöst wird. Bei meta- und epiphyären Frakturen mit Gelenkbeteiligung wird in der Regel ein internes Verfahren zur Gelenkrekonstruktion und Stabilisierung angestrebt. Bei vielen

Schaftfrakturen wird im Allgemeinen ebenfalls ein Wechsel auf ein internes Osteosyntheseverfahren mit Marknagel oder Platte bevorzugt.

Frakturen mit höhergradigen geschlossenen oder offenen Weichteilschäden, mehrfachverletzte bzw. polytraumatisierte Patienten sowie unter gewissen Voraussetzungen Kinder und jugendliche Patienten sind eine Domäne des Fixateur externe.

Die dauerhafte Therapie von Femurfrakturen beim Erwachsenen ist wegen der Perforation des Tractus iliotalialis durch die Schanz-Schrauben nicht vertretbar, da die Gleitfähigkeit des Weichteilmantels gestört wird. Funktionelle Einschränkungen des Kniegelenks sind zu erwarten. Bei kräftigem Weichteilmantel

tel ist bei längere Zeit einliegenden Schanz-Schrauben mit Pin-tract-Infekten zu rechnen.

Bei bestimmten Patienten kann eine Ausbehandlung im Fixateur externe sinnvoll sein. Wenn es gelingt, eine gute achsgerechte Reposition zu erreichen, kommt die ausschließliche Behandlung mit dem Fixateur externe am ehesten bei meta- und diaphysären Frakturen der Tibia in Betracht. Besonders günstig ist die Behandlung bei jugendlichen Patienten, denen man bei gutem Repositionsergebnis keine weitere Operation zumuten möchte. Diese Patienten müssen auf das mehrwöchige Tragen des Fixateur externe vorbereitet werden. Hinsichtlich der (Teil-)Belastung der Extremität muss eine ausreichende Compliance vorhanden sein. Besonders wichtig ist die Anleitung zur Pin-Pflege, die vom Patienten selbst durchgeführt werden sollte.

Auch nach langwieriger Konsolidierung des Weichteilmantels oder lang dauernder intensivmedizinischer Behandlung eines Polytraumatisierten, welche im Verlauf oftmals zu keinem Zeitpunkt ein aufwendiges, rekonstruktives Osteosyntheseverfahren zulässt, kann man gezwungen sein, die Fraktur mit dem Fixateur externe als definitives Stabilisierungsverfahren auszubehandeln.

Hauptteil

Trauma und Durchblutung

Jede Fraktur führt zu Verletzungen der nutritiven Gefäße. In erster Linie entsteht durch den Knochenbruch eine Schädigung der endostalen Vaskularisation. In Abhängigkeit vom Weichteilschaden kann die periostale Blutversorgung zusätzlich beeinträchtigt sein. In jedem Fall kommt es zu einer Verminderung und Umverteilung des Blutflusses zwischen den periostalen und endostalen Gefäßnetzen. In günstigen Fällen tritt bei geringer Traumatisierung in wenigen Wochen eine Revaskularisierung ein. Schwere Weichteilschäden, die sich spontan nicht erholen, führen zu Durchblutungsstörungen des Knochens. Dementsprechend sind Komplikationen und Störungen der Frakturheilung mit erforderlichen Reoperationen bei offenen Frakturen gehäuft [5].

Die Osteosynthese muss das Ausmaß des Weichteilschadens berücksichtigen und sollte vor allem zusätzliche Schä-

den, welche zu einer Kompromittierung der Vaskularisation führen können, vermeiden. Gleichzeitig ist eine ausreichende Stabilität anzustreben. Das Ziel ist eine „Biologische Osteosynthese“, welche die Durchblutung der Weichteile und des Knochens schont. Der Fixateur externe stellt unter diesen Bedingungen das ideale Osteosyntheseinstrument dar, da er mit wenigen Stichinzisionen implantiert werden kann und die periostale Durchblutung nicht kompromittiert. Die Beachtung der biologischen Rahmenbedingungen darf jedoch nicht zulasten der mechanischen Stabilität gehen. Eine vermehrte Instabilität, eine schlechte Reposition und große Frakturspalte führen zwangsläufig zu einer Störung der Frakturheilung und machen Reoperationen erforderlich.

Die perkutane Implantation des Fixateur externe vermeidet eine weitere Kompromittierung der Weichteile. Die Beachtung der biologischen Rahmenbedingungen darf nicht zulasten der mechanischen Stabilität gehen.

Mechanismen der Knochenheilung

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen einer direkten Frakturheilung, die auch als primäre Heilung bezeichnet wird und einer Kallusheilung, die auch Spontanheilung oder sekundäre (indirekte) Knochenbruchheilung genannt wird [4,5,10]. Biomechanisch setzt die direkte Knochenbruchheilung eine interfragmentäre Kompression voraus, bei der Bewegungen im Frakturspalt verhindert werden. Osteone wachsen unmittelbar von einem Fragment in das andere. Röntgenologisch sind Heilungsveränderungen nur schwer zu beurteilen und die Belastbarkeit ist über längere Zeit reduziert. Implantate müssen wegen des langsam verlaufenden Remodelling-Prozesses lange in situ verbleiben.

Die Kallusheilung ist gekennzeichnet durch eine röntgenologisch erkennbare Knochenneubildung, welche wesentlich durch interfragmentäre Bewegungen ausgelöst wird. Sie läuft in 4 Phasen ab.

Entzündungsphase

Aus den verletzten Gefäßen des Periosts und der Weichteile entsteht zunächst ein Hämatom. Eine Permeabilitätssteigerung führt zum Einschweben von Entzündungszellen. Knochenzellen an den Frakturrenden sterben ab. Nach wenigen Tagen wachsen im Rahmen der Re-

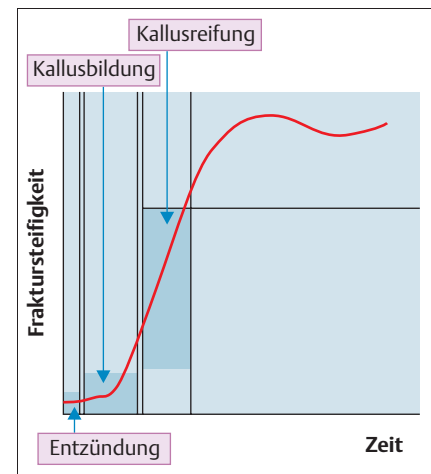


Abb. 1 Die Grafik verdeutlicht die Zunahme der Fraktursteifigkeit in den verschiedenen Phasen der Frakturheilung.

vaskularisierung Kapillaren in das Hämatom, welches in Granulationsgewebe umgewandelt wird.

Bindegewebiger Kallus

Mit einer verstärkten Proliferation von Gefäßen wandern Fibroblasten ein und bilden ein straffes Bindegewebe. In einem Abstand zur Fraktur beginnt die Neubildung von desmalem und enchondralem Knochen. Dieser wächst von der Peripherie auf die Frakturlinie zu.

Knöcherner Kallus

Die Phase ist gekennzeichnet vom Umbau des bindegewebigen Kallus in knöchernen Kallus. Nach Abbau von Verkalkungszonen durch Chondroklasten und Osteoklasten folgt ein Knochenaufbau durch Osteoblasten mit der Bildung von mechanisch belastbarem Geflechtknochen. Dieser wächst von beiden Seiten auf den Frakturspalt zu und es kommt zur Fusion der Kallusspangen. Die Fraktur wird so mechanisch stabil und die interfragmentären Bewegungen werden reduziert [11].

Remodelling-Phase

Nach der Überbrückung beginnt ein Ab- und Umbauprozess, der nach Jahren die normale Knochenstruktur mit normaler Festigkeit wieder entstehen lässt.

Mit zunehmender Heilungsdauer nimmt die Steifigkeit der Fraktur zu (Abb. 1).

Biomechanische Bedingungen der Frakturheilung

Die biomechanischen Grundvoraussetzungen für die Heilung einer Fraktur sind die Steifigkeit der Osteosynthese, die Konfiguration der Fraktur, die exakte Reposition und Art und Ausmaß der Instabilität im Bereich der Frakturrenden. Entscheidend sind interfragmentäre Bewegungen, welche einen Stimulationsreiz für die periostale Knochenneubildung setzen. Die Bewegungen im Frakturspalt stellen unter biomechanischen Gesichtspunkten Gewebedehnungen dar, welche die Zellaktivität hinsichtlich der Proliferation und der Matrixsynthese beeinflussen [9].

Eine biomechanisch zu steife Osteosynthese, welche keine interfragmentären Gewebedehnungen zulässt, reduziert die Zellaktivität und es kommt zu einer Verzögerung der Knochenheilung. Im Gegensatz dazu kann eine instabile Osteosynthese mit einer zu großen Gewebedehnung zum Zerreißen des neu gebildeten Kallus im Frakturspalt führen. Die Folge ist dann ebenfalls eine Störung der Heilung.

Interfragmentäre Bewegungen stimulieren durch Gewebedehnung die Kallusbildung. Frakturspalte von 1–3 mm begünstigen die Knochenneubildung. Zu steife und zu instabile Osteosynthesen führen zu einer Störung der Frakturheilung.

Wir unterscheiden Zug- und Druckdehnungen, die in axialer Richtung des Knochens wirken, von Scherdehnungen, die quer zur Knochenachse ausgerichtet sind.

Frakturspalte von 1–3 mm haben sich als günstig für eine Knochenneubildung herausgestellt. Bei größeren Frakturspalten ist die Stimulation der Knochenneubildung gestört. Bei Trümmerfrakturen wird die Gewebedehnung über mehrere Frakturspalte verteilt, sodass Instabilitäten der Osteosynthese sich weniger gravierend auswirken.

Je nach Fixateurmontage können unter Belastung interfragmentäre Bewegungen von 1–5 mm auftreten. Bei ventralen, monolateralen Fixateur-externe-Montagen der Tibia wurden interfragmentäre Bewegungen von 1–3 mm und bei Ring- oder Hybridfixateuren bis zu 5 mm gemessen [1,4–6,8] (**Abb. 2**).

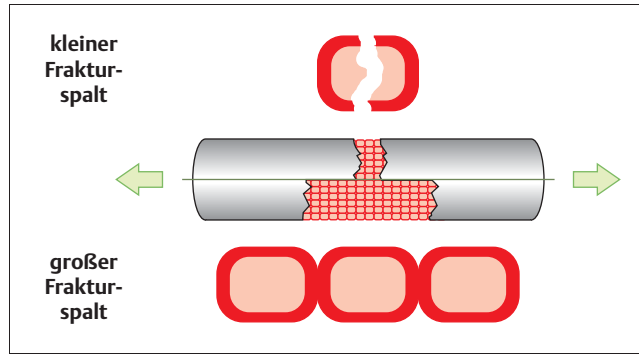


Abb. 2 Prinzip der Gewebedehnung, bei sehr kleinen Frakturspalten können die Dehnungen zum Zerreißen des Gewebes führen. Bei größeren Spalten wird die Dehnung über mehrere Zellen verteilt (aus AO-Principles of Fracture Management).

Biomechanik der Fixateur-externe-Osteosynthese

Die Behandlung einer Fraktur mit dem Fixateur externe stellt unter biomechanischen Gesichtspunkten eine externe Schienung dar. Sie hat das Ziel der Schmerzreduktion, der Wiederherstellung der anatomischen Achsen und der Begrenzung der interfragmentären Bewegung. Eine relativ hohe Stabilität ist die Voraussetzung für die Revaskularisierung und knöchernen Überbrückung. Die Implantate werden über Stichinzisionen perkutan außerhalb des Frakturgebietes eingebracht. In erster Linie wird sich die Schraubenplatzierung nach dem unfallbedingten Weichteilschaden richten. Moderne modulare Fixateur-externe-Systeme erlauben variable der jeweiligen Weichteilsituation angemessene Konstruktionen.

Die Stabilität ergibt sich aus dem Halt der Schrauben im Knochen, der Steifigkeit, Qualität und Dimensionierung der Fixateurelemente und der Montageform des Fixateur externe. Schraubenhalt und die Eigenschaften der Fixateurelemente sind vorgegeben und können vom Operateur nicht beeinflusst werden [5].

Montageprinzipien

- Durch die Form der Fixateur-externe-Montage kann der Operateur Einfluss auf die Stabilität der Osteosynthese nehmen.
- In jedem Hauptfragment sollten 2–3 Schrauben (a) implantiert werden.
- Die Stabilität wird vergrößert, wenn die freie Strecke der Schanz-Schrauben verkürzt ist. Der Abstand (b) der Längsstäbe zur Knochenoberfläche muss möglichst gering sein.
- Die Distanz (c) zwischen den Schrauben in jedem Fragment muss möglichst groß sein.

- Es empfiehlt sich, zwei Schanz-Schrauben proximal und distal fraktur-nah (d) zu platzieren.
- Da der Schraubendurchmesser (e) die Stabilität der Osteosynthese wesentlich beeinflusst, sollten möglichst dicke Schanz-Schrauben verwendet werden, wobei der Schraubendurchmesser der Stärke des Knochens angemessen sein muss. Eine Vergrößerung des Schraubendurchmessers um 1 mm verdoppelt die Steifigkeit der Montage.
- Eine weitere Steigerung der Stabilität kann durch die Verwendung eines zweiten Längsstabes (f) erreicht werden (**Abb. 3**).

Für Ring- oder Hybridfixateure gelten unter mechanischen Gesichtspunkten die gleichen Bedingungen. Da diese Fixateure partiell oder komplett mit Drähten im Knochen verankert werden, ist aus Stabilitätsgründen auf eine ausreichend hohe Drahtspannung zu achten. Bei einem Verlust der Spannung ist mit zunehmender Instabilität zu rechnen (**Abb. 4**).

Auch monolaterale Monotube-Fixateursysteme unterliegen den gleichen biomechanischen Gesetzmäßigkeiten. Allerdings kann der Schraubenabstand bei diesen Systemen nicht mehr frei gewählt werden (**Abb. 5**).

Mechanische Parameter der Fixateur-externe-Stabilität sind:

- Schraubendurchmesser
- Schraubenzahl
- Schraubenabstand
- Abstand zwischen Knochen und Längsstab
- Zweiter Längsstab
- Drahtspannung bei Ringfixateuren

Mit der primär gewählten Montageform wird eine möglichst hohe Stabilität angestrebt, um die Revaskularisierung zu

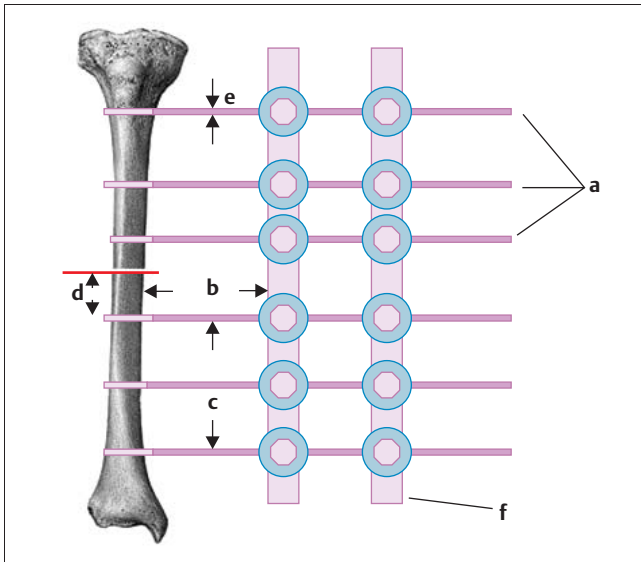


Abb. 3 Biomechanische Einflussmöglichkeiten auf die Stabilität einer Fixateur-externe-Montage.

Fixateur externe unterstützt werden können.

Möglichkeiten der Destabilisierung eines Fixateur externe

Zur Reduktion der Steifigkeit der Fixateur-Montage kann die Anzahl der Schanz-Schrauben in jedem Fragment verringert oder der Abstand zwischen Knochen und Längsträger vergrößert werden.

Die einfachste Maßnahme der Destabilisierung stellt die Entfernung des zweiten Längsträgers dar.

Eine weitere Möglichkeit ist die Dynamisierung eines Fixateur externe. Hierzu bleibt die Doppelrohrkonstruktion erhalten. Die Verbindungsbacken werden am knochen nahen Längsträger proximal und am knochenfernen Längsträger distal gelöst. Unter Belastung der Extremität kommt es zu einem dynamischen Gleiten der Längsträger gegeneinander mit entsprechenden interfragmentären Bewegungen des Knochens (Abb. 6).

Bei Monotube-Fixateuren sind destabilisierende Umbaumaßnahmen durch Abbau von einzelnen Elementen nicht durchführbar. Die Körper oder Zylinder dieser Fixateure können ineinander gleiten, sodass bei ihnen aufgrund ihrer Konstruktion eine Dynamisierung möglich ist. Zu Beginn der Behandlung wird der Gleitvorgang durch eine Verriegelung blockiert und erst nach beginnender Konsolidierung des Bruches ist durch einfache Entriegelung einer zentralen Schraube eine Dynamisierung möglich, welche ein axiales Gleiten des Systems zulässt.

Vermehrte Druck- und Zugbelastung im Bereich der Kallusformation wird einerseits durch mechanische Destabilisation am Fixateur externe und vermehrte Lastaufnahme der Extremität erreicht.



Abb. 4 Montagebeispiel einer Kombination aus konventionellem Fixateur externe mit Schanz-Schrauben und einem Ringfixateur mit intraossären Drähten (Hybridfixateur).

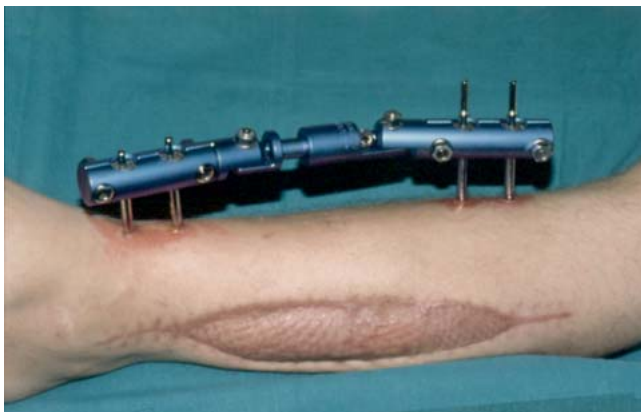


Abb. 5 Montagebeispiel eines Monotube-Fixateur-externe.

gewährleisten. Veränderungen in der Stabilität der Fixateur-externe-Montage sind geeignet, die für die Knochenbruchheilung erforderlichen interfragmentären Bewegungen zu beeinflussen. Im Laufe der Behandlung sind destabilisierende Eingriffe an der Fixateurkonstruktion erforderlich, um die zur Heilung

notwendigen Gewebedehnungen zu unterstützen.

Eine Möglichkeit der Lastumverteilung vom Fixateur externe auf den Knochen ist die zunehmende Vollbelastung der verletzten Extremität durch den Patienten, welche durch Veränderungen am

Beurteilung der Heilung

Bei der Beurteilung der Knochenfestigkeit ist man auf röntgenologische Kontrollen angewiesen. Im Idealfall erkennt man eine zunehmende Kallusformation, die zu einer Querschnittvergrößerung des Knochens führt. Der Zeitpunkt, an dem der stabilisierende Fixateur externe entfernt werden kann, ist auch mit großer klinischer Erfahrung nicht absolut sicher festzulegen. Es empfiehlt sich auch nach Entfernung des Fixateur externe zur Sicherheit einen Brace-Verband anzulegen, um die frisch verheilte

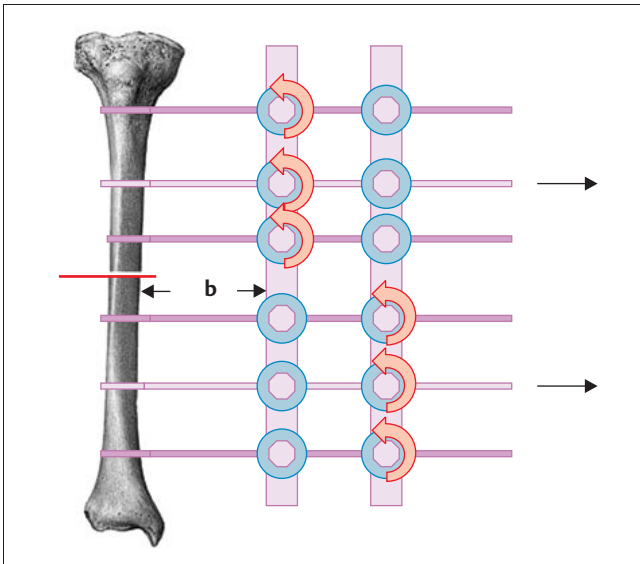


Abb. 6 Möglichkeiten der Destabilisierung am Fixateur externe.



Abb. 9 Brace-Verband zur funktionellen Behandlung von Unterschenkelfrakturen.

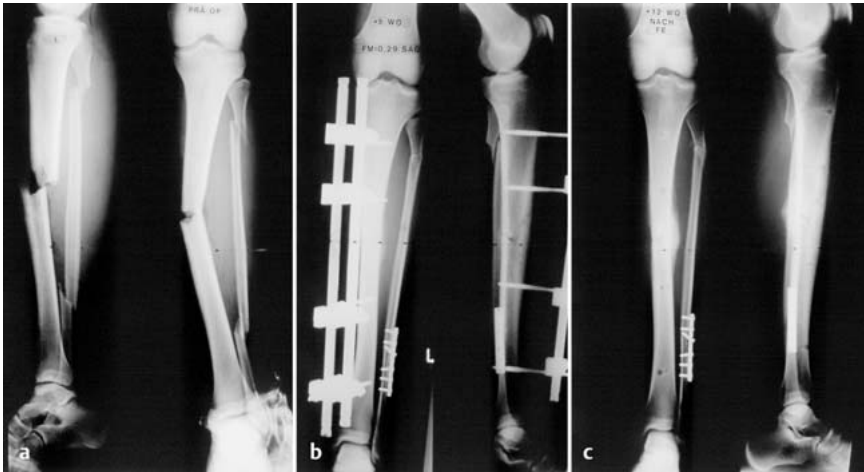


Abb. 7 a bis c Unterschenkelfraktur mit GI-Weichteilschaden eines 17-jährigen Patienten (a), Primärstabilisierung mit Fixateur externe, ideale Reposition der Tibia, beginnende Kallusbildung nach 5 Wochen (b), Entfernung des Fixateur externe nach 12 Wochen bei guter Kallusbildung (c).

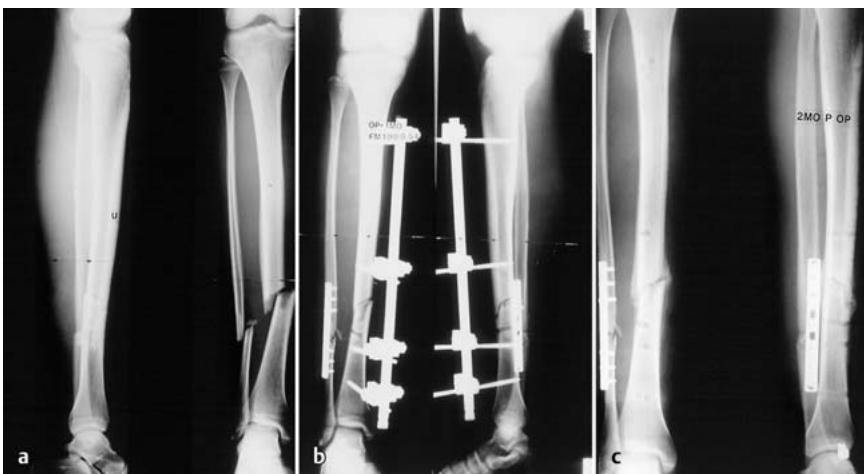


Abb. 8 a bis c 18 Jahre alter Rollerfahrer mit Unterschenkelfraktur und GI-Weichteilschaden (a), gute Reposition, geringe Kallusbildung nach 1 Monat (b), nach 2 Monaten erkennbarer Kallus, Entfernung des Fixateurs wegen beginnendem Pin-Infekt, zum Schutz gegen Scherkräfte wird ein Brace-Verband angelegt (c), siehe auch **Abb. 9**.

Fraktur vor allem gegen Scherkräfte zu schützen (**Abb. 7 bis 9**).

Messung der Fraktursteifigkeit

Neben der röntgenologischen Beurteilung der Knochenbruchheilung anhand der Größe der Kallusformation stellt die Messung der Fraktursteifigkeit eine Möglichkeit dar, den Heilungsfortschritt zu objektivieren. In experimentellen Untersuchungen kamen Dehnungsmessstreifen zur Anwendung. Auch über die Anwendung einer elektronischen Schublehre (Dynamometer), welche in der Lage ist, die Bewegungsauslässe bei Monotube-Fixateuren zu messen, wurde berichtet [2,3].

Die unter Belastung eintretende Verformung der Schrauben des Fixateur externe macht sich die Messung mit dem Fraktometer FM 100 zunutze. Es handelt sich um eine elektronische Messuhr, die an den Enden der Schanz-Schrauben montiert wird. In Abhängigkeit vom Heilungszustand werden die Schrauben unterschiedlich stark verformt. Bei regelmäßig wiederholter gleicher axialer Belastung auf der Personenwaage (z.B. 20 kp), gibt die Relativänderung der Messkurve im Verlauf Hinweise auf den Fortschritt der Frakturheilung (**Abb. 10**).



Abb. 10 Fraktometer FM 100 in situ bei der Messung der Relativbewegungen bei der Verformung der Schanz-Schrauben unter Belastung.

Bei abgestützten Frakturen, bei denen keine wesentliche Verformung zu erwarten ist, wird die Messung durch Anheben des Beines beim liegenden Patienten vorgenommen. Bei zunehmender knöcherner Heilung ist ein Steifigkeitszuwachs [7,8,10] durch die Kallusbildung und eine abnehmende Gewebedehnung zu verzeichnen (**Abb. 11**).

- Voraussetzung einer ungestörten Frakturheilung sind:
- Durchblutung von Knochen und Weichteilen
 - Gute Reposition
 - Kleiner Frakturspalt
 - Ausreichende Stabilität der Osteosynthese

Schlussfolgerung

Die Behandlung von Extremitätenfrakturen mit dem Fixateur externe orientiert sich an Art, Ausmaß und Lokalisation des Weichteilschadens, der Frakturform und -lokalisation. Die Schanz-Schrauben dürfen nur in intakten Arealen des Weichteilmantels eingebracht werden. Die Reposition hat auch bei der primären notfallmäßigen Versorgung so exakt wie möglich zu erfolgen.

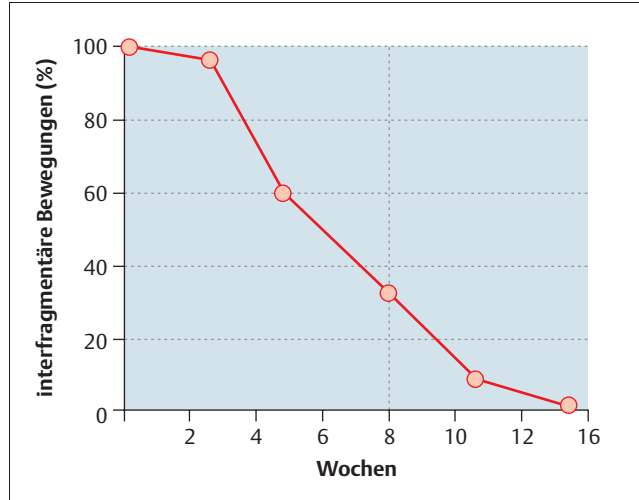


Abb. 11 Die Grafik zeigt die Abnahme der interfragmentären Bewegung bei Kallusbildung. Durch die Überbrückung des Frakturspalts tritt durch bindegewebigen und knöchernen Kallus eine zunehmende Steifigkeit in der Fraktur ein, wodurch die Bewegungen im Frakturspalt reduziert werden.

Durch persistierende Fehlstellungen können Weichteilschäden unterhalten oder verschlechtert werden.

Fehlstellungen sind auch unter der Prämisse, dass sekundär ein Verfahrenswechsel erfolgen soll, nicht zu akzeptieren. Im weiteren Behandlungsverlauf können primär nicht absehbare Situationen eintreten, welche einen Verfahrenswechsel auf eine interne Osteosynthese unmöglich und eine Ausbehandlung im Fixateur externe erforderlich machen.

Aus diesen Gründen muss bereits bei der primären Reposition ein möglichst kleiner Frakturspalt erreicht werden, welcher eine Ausbehandlung mit Fixateur externe über eine Kallusheilung ermöglicht. Hinsichtlich der Montageform sollten primär biomechanisch stabile Konstruktionen gewählt werden, welche die erforderliche Anzahl, Stärke und Abstände der Schrauben sowie Distanzen zwischen Knochen und Längsstab berücksichtigen. Im Heilungsverlauf sind zur Stimulation der Heilungsvorgänge durch interfragmentäre Bewegungen destabilisierende Umbaumaßnahmen des Fixateurs notwendig und gleichzeitig kann der Patient die Knochenbruchheilung durch dosierte Belastung fördern.

Literatur

¹ Aro HT, Chao EYS. Bone-healing patterns affected by loading, fracture fragment stability, fracture type, and fracture site compression. Clin Orthop 1993; 293: 8-17
² Asche G. Frakturheilungsmessung bei Unterschenkelfrakturen mit dem Dynamometer am Monotube. Osteo Int 1993; 2: 89-96

³ Awakowicz A. Experimentelle Untersuchungen des Verformungsverhaltens von Schanz-Schrauben als Voraussetzung für die Kontrolle der Frakturheilung. Diss. Ruhr-Universität Bochum, 2002
⁴ Claes L, Wolf S, Augat P. Mechanische Einflüsse auf die Callusheilung. Chirurg 2000; 71: 983-994
⁵ Claes L. Biologie und Biomechanik der Osteosynthese und Frakturheilung. Orthopädie und Unfallchirurgie up2date 2006; 1: 329-341
⁶ Egger EL, Gottsauner-Wolf F, Palmer J, Aro HT, Chao EYS. Effects of axial dynamization on bone healing. J Trauma 1993; 34: 185-192
⁷ Gerngroß H, Claes L, Wentzensen A, Scherer MA, Becker HP. Eine neue quantitative Meßmethode zu Verlauf und Prognose der Knochenheilung. Wehrmed Mschr 1992; 8: 313-316
⁸ Kershaw CJ, Cunningham JL, Kenwright J. Tibial external fixation, weight bearing, and fracture movement. Clin Orthop 1993; 293: 28-36
⁹ Ruedi TP, Buckley RE, Moran CG. AO Principles of Fracture Management. 2nd ed. Stuttgart: Thieme, 2007
¹⁰ Schmickal T, Hochstein P, Wentzensen A. Behandlung von Unterschenkelfrakturen im Fixateur externe. Trauma Berufskrankh 1999; 1: 240-246
¹¹ Stürmer KM. Histologische Befunde der Frakturheilung unter Fixateur externe und ihre klinische Bedeutung. Unfallchirurgie 1984; 10: 110-122

Dr. med. Markus Muhm
 Oberarzt
Priv.-Doz. Dr. med. Hartmut Winkler
 Chefarzt

Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
 Westfal-Klinikum Standort I
 Hellmut-Hartert-Straße 1
 67655 Kaiserslautern