

Zusammenfassung

Die primäre, d. h. direkte oder ungestörte Knochenbruchheilung bei stabiler Osteosynthese wirkt sich im Röntgenbild „negativ“ aus durch Verschwinden des Frakturspaltes und Fehlen von weiteren Knochenveränderungen. Jeder sichtbare Knochenzuwachs und jede Osteolyse sind (mit Ausnahme der erst später auftretenden Metallose) der Ausdruck einer verzögerten und gestörten primären Knochenheilung, deren Schweregrad und Ursache rechtzeitig erkannt werden müssen, um unter Umständen schwere Mißerfolge zu vermeiden.

Literatur

- ¹ ALLGÖWER, M.: Helv. chir. Acta **28**, 214 (1961).
- ² DANIS, R.: Théorie et pratique de l'ostéosynthese. Paris 1949.
- ³ SCHENK, R., u. H. WILLENEGGER: Experientia (Basel) **19**, 593 (1963).
- ⁴ WIESER, C., u. M. ALLGÖWER: Radiol. clin. (Basel) **31**, 297—303 (1962).
- ⁵ WAGNER, H.: Verh. Dtsch. Orthop. Ges. 49. Kongr. 1961

83. Zur Histologie der primären Knochenheilung

Von

R. SCHENK-Basel/Schweiz (a. E.) und H. WILLENEGGER-Liestal (Schweiz)*

Mit 9 Abbildungen

Im Anschluß an die Ausführungen des Chirurgen und des Röntgenologen ist es meine Aufgabe, Ihnen über die histologischen Vorgänge zu berichten, die der primären Heilung einer Schafftraktur zugrunde liegen. Der röntgenologische Befund einer callusfreien Heilung, mit der DANIS die Vorstellung einer — zum Schlagwort gewordenen — „soudure autogène“ verband, wirft eine ganze Reihe von Fragen auf, welche eine morphologische Klärung wünschenswert erscheinen lassen. Einleitend scheint es mir aber unumgänglich, auf einige Grundbegriffe einzugehen, ohne deren übereinstimmende Interpretation eine Diskussion nicht möglich ist.

Callus heißt Narbe, und unter Narbenbildung versteht die allgemeine Pathologie den Ersatz eines Defektes in einem hochorganisierten Gewebe durch minderwertigeres, weniger differenziertes Material. Die klassische Auffassung vom Ablauf der Frakturheilung ist geradezu ein Musterbeispiel dafür. Die Wiederherstellung der Kontinuität zwischen den Fragmentenden erfolgt stufenweise durch sich ablösende Binde- und Stützgewebe von verschieden hohem Differenzierungsgrad. Der bindegewebige oder knorpelige Callus wird auf dem Wege einer desmalen oder chondralen Ossifikation durch Faserknochen ersetzt. Erst auf der Grundlage

*Vortragender: R. SCHENK-Basel/Schweiz (a. E.).

dieser Knochennarbe können dann die Umbauvorgänge einsetzen, die zur Restitution der ursprünglichen lamellär gebauten Compacta führen. Dieses Geschehen stimmt in den Grundzügen mit der embryonalen Knochenentwicklung überein, die als *Ersatzknochenbildung* oder *indirekte Ossifikation* bezeichnet wird. Wir sind deshalb berechtigt, diese Frakturheilung als eine *indirekte* oder *sekundäre* zu bezeichnen.

Eine *primäre Heilung einer Schaftfraktur* liegt im pathologisch-histologischen Sinne nur dann vor, wenn die *Vereinigung der Fragmentenden ohne Narbenbildung*, d. h. also *direkt durch hoch organisierten Lamellenknochen* erfolgt. Ganz besonders muß betont werden, daß zwischen Lamellenknochen und Faserknochen nicht nur strukturelle und mechanische, sondern auch tiefgreifende physiologische Unterschiede bestehen. Der *Faserknochen* ist eine primitive Form des Knochengewebes. Er ist das Baumaterial des embryonalen Skelets, gleichgültig, ob dies auf dem Wege der primär angiogenen, der desmalen oder der chondralen Osteogenese entstanden ist. Während des Wachstums wird der Faserknochen durch Lamellenknochen ersetzt. Im erwachsenen Organismus ist Faserknochen nur noch an wenigen Stellen anzutreffen, so z. B. an den Ansatzstellen von Sehnen und Bändern, im Felsenbein und im äußeren Gehörgang. Faserknochen tritt aber unter pathologischen Bedingungen häufig und rasch auf. Er ist eine Art Reaktionsform des Knochengewebes, die überall da zur Verfügung steht, wo es gilt, Defekte auszugleichen oder schädigende Elemente einzukapseln (FROST 1963). Gewebe mit osteogenen Potenzen reagieren auf einen entzündlichen Prozeß, auf eine Blutung, auf implantierte Fremdkörper oft rasch mit einer ausgedehnten Faserknochenbildung. Seine Struktur zeigt keine Übereinstimmung mit der mechanischen Belastung. Endokrine Einflüsse wirken sich auf die Intensität der Faserknochenbildung kaum aus.

Die Entstehung von *Lamellenknochen* ist demgegenüber an eine ganze Reihe von Voraussetzungen gebunden. FROST u. a. neigen dazu, ihn von einer speziellen Osteoblastenpopulation abzuleiten. Diese Osteoblasten reagieren empfindlich auf endokrine Faktoren. Thyroxin und Wachstumshormon wirken stimulierend, Corticosteroide und Oestrogene dagegen hemmend auf ihre Aktivität. Der Lamellenknochen zeigt einen ausgesprochen trajektorialen Aufbau. Auf Grund eines noch unbekanntem Regelmechanismus wird er bei veränderten Belastungsverhältnissen umgebaut. Die mechanischen Bedingungen für die Entstehung von Lamellenknochen sind durch die eingehenden Untersuchungen von PAUWELS und seinen Schülern weitgehend geklärt. Erforderlich ist ein Leitgerüst von einer mechanischen Stabilität, wie sie im Körper nur durch Knochen — sei es nun Faser- oder Lamellenknochen — gewährleistet wird. Der Umweg über den Faserknochen, der bei der Entwicklung unseres Skelets, aber auch bei der indirekten Frakturheilung beschritten wird, ist daraus

verständlich. Unter den vielen Aspekten, welche die normale und die gestörte Frakturheilung bieten, wird deshalb die Frage ihrer Beeinflussung durch mechanische Faktoren zum zentralen Problem.

Es wird deshalb unsere Aufgabe sein, zu untersuchen, ob es mit den Mitteln der operativen Frakturbehandlung, d. h. mit der sog. *stabilen Osteosynthese* gelingt, die Fragmente so gegeneinander zu fixieren, daß eine *primäre Vereinigung durch Lamellenknochen* möglich ist.

In den vielen experimentellen Untersuchungen über die Frakturheilung finden sich zahlreiche Beweise für den gewebsdeterminierenden Einfluß mechanischer Faktoren. Das Überwiegen von Zugkräften führt zu einem bindegewebigen, ein Vorherrschen von Druck dagegen zu einem knorpeligen Callus (ALTMANN, KROMPECHER, MATZEN, OBERDAHLHOFF, PAUWELS). YAMAGISHI und YOSHIMURA konnten zeigen, daß mit besserer Stabilisierung die Menge des gebildeten Callus abnimmt und dieser überwiegend aus Knochen besteht. Auch bei den Versuchen von FRIEDENBERG und FRENCH ergab sich, daß bei der unter Druckenwendung erreichbaren guten Stabilisierung eine rasche, knöcherne Vereinigung der Fragmente eintrat. PETROKOV hat dieses Experiment unter Verwendung von homoplastischen Corticalistransplantaten wiederholt und ist dabei zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. WAGNER (1963) hat an Hunden in sehr schönen Versuchen den experimentellen Nachweis einer primären Heilung von Semifrakturen erbringen können und anschaulich dargestellt, daß in Übereinstimmung mit der Theorie und PAUWELS zwischen federnd fixierten Fragmenten Knorpelgewebe entstand. Unsere Arbeitsgruppe hat auf Grund eigener Experimente an Schafen und an Hunden zur primären Frakturheilung in verschiedenen Publikationen Stellung genommen (WILLENEGGER et al. 1962, ALLGÖWER et al. 1963, SCHENK und WILLENEGGER 1963, 1964).

Für unsere Versuche wurde ein Vorgehen gewählt, das möglichst genau der klinisch gebräuchlichen Druckplattenosteosynthese entspricht.* Allerdings mußte im Interesse einer einheitlichen, reproduzierbaren Lage des Bruchspaltes auf eine echte Frakturierung des Knochens verzichtet werden. An ihrer Stelle wurde mit einer feinen Säge eine exakte, vollständige Querosteotomie angelegt (Abb. 1). Die Reposition erfolgte mittels eines geeichten Spanners unter einem Druck von 0, 10, 20 oder 30 kg. Aus technischen Gründen ist eine gewisse Inkongruenz bei der Adaption der Fragmente unvermeidlich. Die dorsalkonvexe Krümmung des Radius wird bei der Verschraubung mit einer planen Platte nahezu ausgeglichen. Der Radius wird aufgerichtet, die Osteotomiespalte dadurch ganz leicht keilförmig. Unter der Druckenwendung wird die Compacta direkt unter der Platte maximal adaptiert, während die Fragmente auf der Gegenseite durch eine feine Spalte voneinander getrennt bleiben. Dieses Detail erweist sich beim Studium der histologischen Vorgänge als wesentlich.

*Die Untersuchungen erfolgten mit Unterstützung der Fritz Hoffmann-La Roche-Stiftung zur Förderung wissenschaftlicher Arbeitsgemeinschaften in der Schweiz.

Röntgenaufnahmen, die in regelmäßigen Abständen nach der Operation angefertigt wurden, bestätigen die von WIESER für die Diagnose einer primären Knochenheilung gegebenen Richtlinien (Abb. 2). Die anfänglich scharf begrenzte Osteotomie verschwindet im Laufe von 4—8 Wochen, ohne daß

eine periostale oder endostale Corticalisverdickung sichtbar wird. Dagegen tritt entlang der Plattenränder und um die freien Enden der Schrauben öfters eine periostale Reaktion auf. Dies ist auch aus einem histologischen Übersichtspräparat ersichtlich (Abb. 3). Um das Schraubengewinde bilden das Periost und die Zellen des Markraums regelmäßig eine Knochenmanschette, welche die auf der Schraube lastenden Kräfte aufnehmen hilft. Die Osteotomiestelle selbst ist nur noch als eine feine Linie erkennbar. Unterhalb der Platte sind die Fragmente bis auf eine capilläre Spalte adaptiert. Diese wird von regenerierten Osteonen überbrückt, die von einem Fragment ins andere durchgewachsen sind. Auf der von der Platte abgewandten Seite klafte nach der Operation eine schmale Spalte. Sie wurde zunächst knöchern ausgefüllt und in der Folge ebenfalls von regenerierenden Haversschen Systemen durchwachsen. Die periostale und die endostale Reaktion halten sich im Bereiche der Osteotomie dagegen in engen Grenzen.

Die durch das experimentelle Vorgehen bedingte Differenz im Ausmaß der Osteotomiespalte bleibt also nicht ohne Einfluß auf die histo-

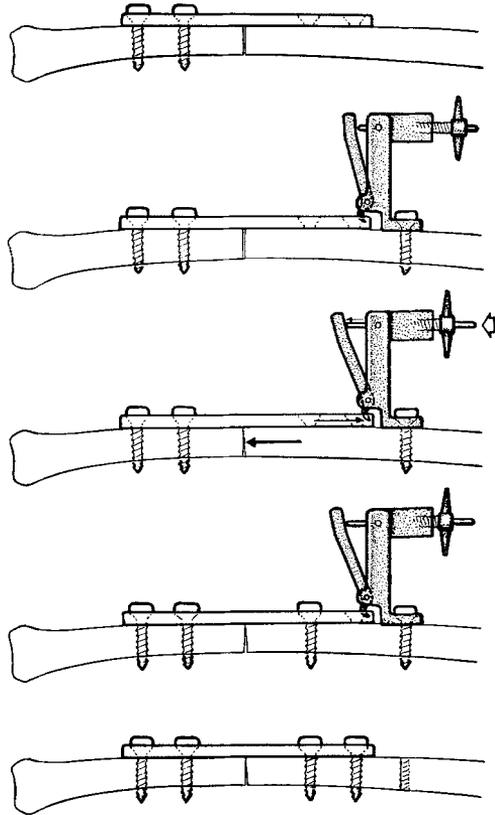


Abb. 1. Operatives Vorgehen bei der Druckplattenosteosynthese nach Querosteotomie am Radius des Hundes. Von oben nach unten: Verschrauben der Platte am distalen Fragment, Befestigen des Spanners am proximalen Fragment und Reposition, Kompression der Osteotomiestelle mit geeichteten Druckwerten, Verschrauben der Platte am proximalen Fragment, Entfernen des Spanners und Einsetzen der 4. Schraube

logischen Vorgänge während der Heilung. Das *Ausfüllen der klaffenden Osteotomiestellen* beginnt bereits in der ersten Woche nach der Operation (Abb. 4). Vom Markraum, vom Periost und von eröffneten Haversschen

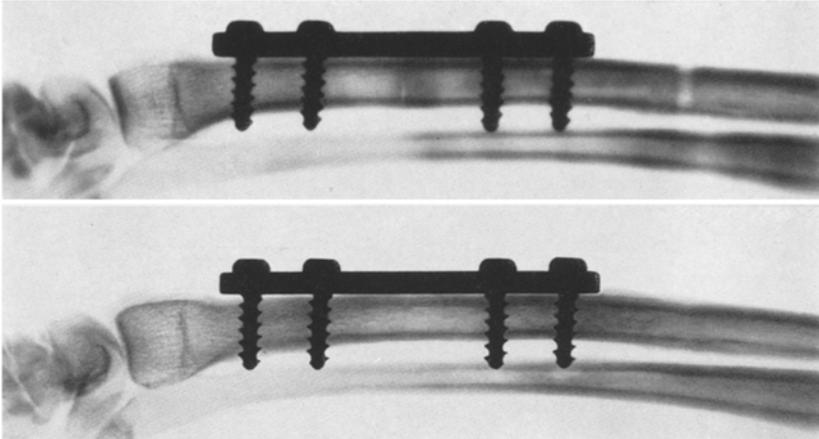


Abb. 2. Röntgenbilder eines Hunderadius nach Querosteotomie und Druckosteosynthese mit 20 kg. Oben 3 Tage, unten 8 Wochen nach der Operation. Durchbau der Osteotomiestelle ohne nennenswerte Callusbildung. Periostale Auflagerungen am proximalen Plattenrand

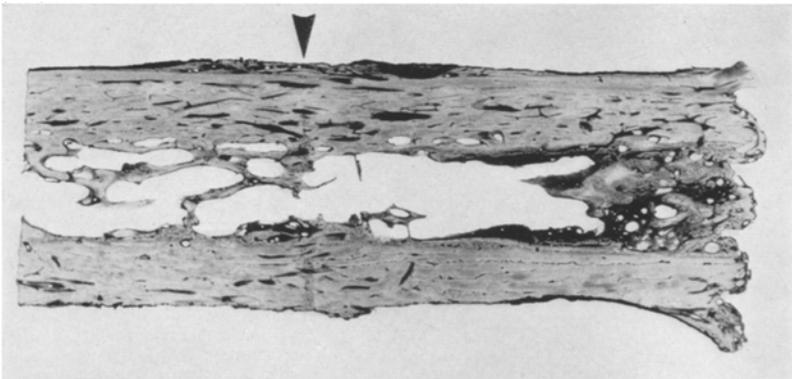


Abb. 3. Unentkalkter Längsschliff durch den Radius eines Hundes, 10 Wochen nach der Operation (gleicher Fall wie Abb. 2). Fuchsfärbung, 4:1. Rechts im Bild ist die periostale und endostale Knochenbildung um ein Schraubengewinde erkennbar. Die Osteotomie (Pfeil) ist in der plattennahen (oberen) Corticalis optimal adaptiert und von regenerierten Osteonen durchbaut. In der gegenüberliegenden Corticalis klaffte die Osteotomie nach der Operation um 0,3 mm. Diese Spalte wurde knöchern ausgefüllt und anschließend von regenerierenden Osteonen durchbaut

Kanälen aus sprossen dünnwandige Gefäße ein, die von einem zellreichen Bindegewebe begleitet werden. Bei einwandfrei stabiler Fixation spielen sich auf der Oberfläche der Fragmentenden osteogenetische Prozesse ab, die mit dem Knochenanbau entlang der Wandung der Haversschen Kanäle

durchaus vergleichbar sind. Osteoblasten belegen diese Flächen in einem beinahe epithelialen Verband und haben nach 8 Tagen bereits einen ansehnlichen Knochensaum produziert. Durch schichtweise Ablagerung neuer Lamellen wird die Spalte immer mehr eingeengt, und nach 4 Wochen haben sich Osteone gebildet, die allerdings senkrecht zur ursprüng-

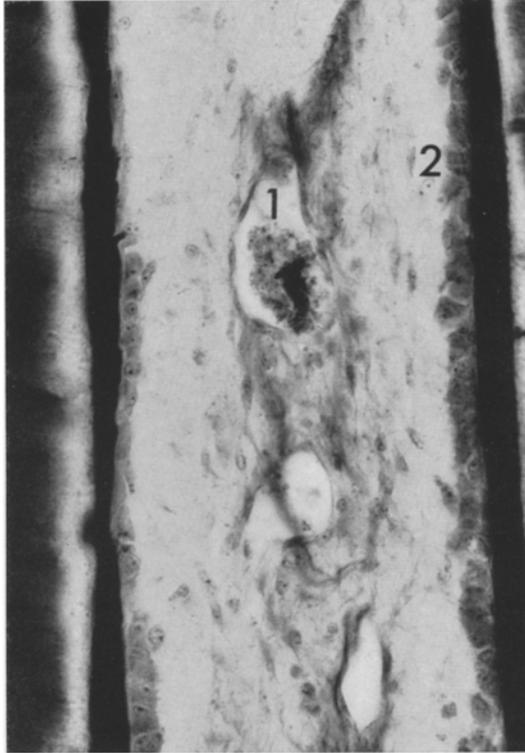


Abb. 4. Beginn der Ossifikation in einer 0,17 mm breiten Osteotomiespalte, 1 Woche nach der Operation. Radius eines Hundes. 1 Blutgefäß, 2 Osteoblasten, rechts davon dunkel gefärbtes Osteoid. Längsschliff nach Fuchsinfärbung und Methylmethacrylateinbettung, 320:1

lichen Corticisstruktur verlaufen (Abb. 5). Die ernährenden, für die Knochenbildung ausschlaggebenden Blutgefäße stammen in den gezeigten Fällen aus dem Markkanal. Ebenso häufig kann man aber beobachten, daß aus eröffneten Haversschen Kanälen Gefäße und Osteoblasten in den Spaltraum eindringen und sich an der knöchernen Überbrückung desselben beteiligen (Abb. 6). Immer aber — und das ist für unsere Fragestellung wesentlich — bestehen die Regenerate *primär aus Lamellenknochen*.

Hinsichtlich der Beurteilung der Vitalität der Fragmentenden gehen in der Literatur die Meinungen weit auseinander. GEISER (1963) nimmt einen extremen Standpunkt ein und verneint einen Beitrag der Corticalis an die Überbrückung von Defekten und an den Umbau der devitalisierten Fragmentenden. Nach Corticalisdefekten an Hunden fanden dagegen BASSETT et al. (1961), daß nach Abschirmung gegen den Markraum und

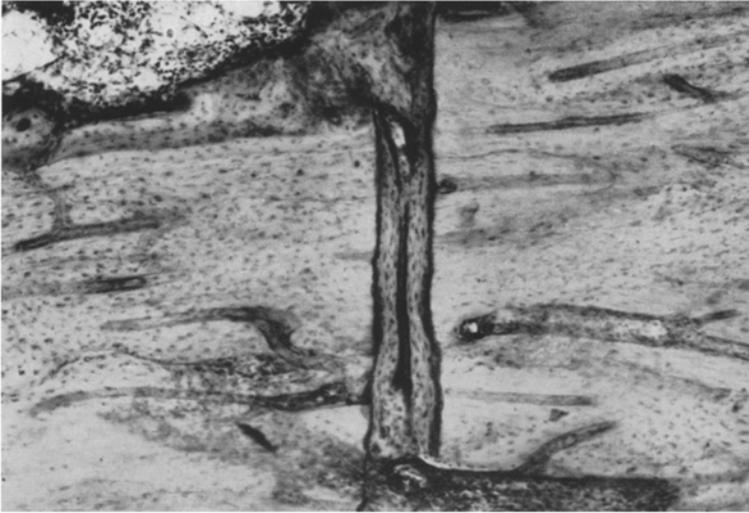


Abb. 5. Durch Lamellenknochen ausgefüllte Osteotomiespalte, 4 Wochen nach der Operation. Die Fragmente sind etwas gegeneinander versetzt, die Osteotomiespalte war an dieser Stelle 0,1 mm breit. Sie wurde an dieser Stelle durch ein Osteon ausgefüllt, das senkrecht zur Längsrichtung des Knochens verläuft. Die an der Knochenbildung beteiligten Blutgefäße stammen hier überwiegend aus dem Markraum. Celloidinschnitt, Hämatoxylin Delafield, 80:1

gegen das Periost eine Knochenregeneration aus dem Inhalt der Haversschen Kanäle eintrat. ALLGÖWER hat 1963 an Hand unserer ersten Befunde an Schafen und an Hunden zeigen können, daß vom vital gebliebenen Inhalt der Haversschen Kanäle aus ein reger Umbau der Corticalis einsetzt. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen können wir zu dieser Frage genauer Stellung nehmen.

Die Vitalität der Zellen innerhalb des Kanalsystems der Knochencompacta ist in erster Linie abhängig von der Blutversorgung. Diese basiert auf einem reich verzweigten Gefäßnetz, das von periostalen und endostalen Arterien aus gespeist wird. Jede Fraktur oder Osteotomie führt zu einer schweren Beeinträchtigung der Blutzirkulation. Diese hat innerhalb der Fragmentenden eine Devitalisierung zur Folge, deren Ausmaß im einzelnen von der Zahl und der Lage funktionstüchtiger Anastomosen, von der Mitverletzung des Periostes und von der Schädigung der

Gefäße im Markraum abhängt. Auf Grund frischer, unentkalkter Schlifflinien und der Färbung mit basischem Fuchsin haben wir den Eindruck gewonnen, daß Osteocyten in der Wandung von Haversschen Systemen, die ihrer Blutversorgung verlustig gingen, noch ein bis zwei Wochen überleben können. Erst dann zeichnet sich auf Grund von Kernpyknoten und Cytoplasmazerfall das Ausmaß der Nekrosen ab. Etwa gleichzeitig,

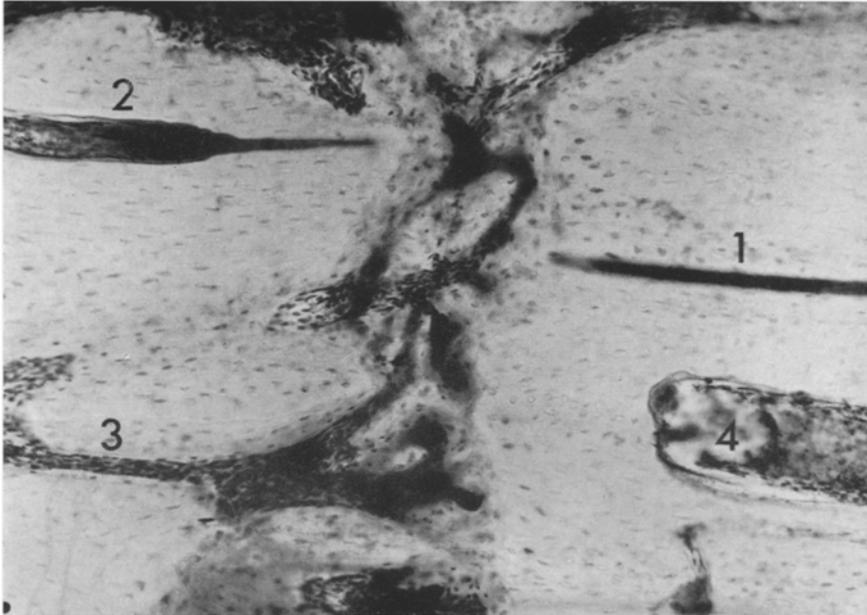


Abb. 6. Längsschliff durch eine klaffende Osteotomiestelle, 4 Wochen post op. 1 devitalisierter, 2 partiell devitalisierter Haversscher Kanal. Vom Inhalt eines vital gebliebenen Haversschen Kanals aus (3) sind Blutgefäße und Osteoblasten in die Osteotomiespalte eingewachsen und beteiligen sich an den Ossifikationsvorgängen. 4 In Ausbildung begriffener Resorptionskanal im devitalisierten Gebiet. Basisches Fuchsin, 100:1

im Laufe der 3. Woche, beginnt von den vitalgebliebenen Abschnitten der Haversschen Kanäle aus der schleichende Ersatz der nekrotischen Knochenpartien. Osteoclasten beginnen den Kanal aufzuweiten und treiben in der Richtung auf die Osteotomie neue Resorptionskanäle vor. Dicht darauf folgen ihnen Blutgefäße und mesenchymale Zellen, die zu Präosteoblasten und Osteoblasten modulieren. Sie lagern auf die Wandung des Resorptionskanals neue Knochenlamellen ab. Auf diese Weise entstehen neue Osteone, die gegen die Osteotomiestellen vorrücken und diese schließlich überqueren (Abb. 7). Dieses Überschreiten der Frakturlinie erfolgt von beiden Fragmenten aus, und auffallend häufig verzweigen sich die regenerierenden Osteone.

Die *Regeneration der Haversschen Systeme* ist die Grundlage eines *Umbaues der Fragmentenden*, durch den die *Corticalis revitalisiert und die ursprüngliche Textur wiederhergestellt wird*. Im normalen Ablauf der Frakturheilung tritt sie erst in der letzten Phase ein und kann Jahre in Anspruch nehmen. Sie stellt aber auch die einzige Möglichkeit dar, zwei Fragmente miteinander zu verbinden, die nach exakter anatomischer

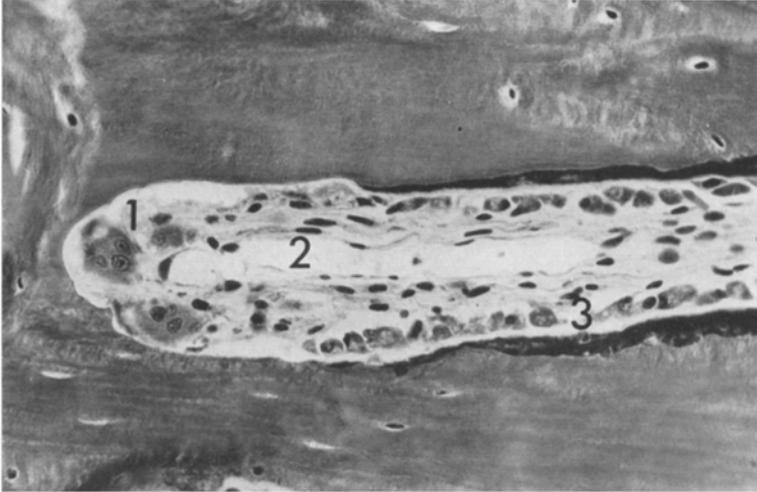


Abb. 7. Dünnschnitt durch ein in der Längsrichtung regenerierendes Osteon. Am blinden Ende des Resorptionskanals liegen Osteoclasten (1), die den Kanal in axialer Richtung verlängern. Um ein zentrales Blutgefäß (2) gruppieren sich Präosteoblasten und Osteoblasten (3), die auf die Wandung neue, hier dunkel gefärbte Knochenlamellen ablagern. Unentkalkter Schnitt nach Einbettung in Methylmethacrylat, 5 μ , Färbung nach GOLDNER, 320:1

Reposition und nach Druckanwendung miteinander in direktem Flächenkontakt stehen. Wir haben in der oberen, plattennahen Corticalis des Präparates der Abb. 3 bereits auf die zu einer capillären Spalte reduzierte Osteotomie hingewiesen. Diese Spalte ist tatsächlich so fein, daß ein Eindringen von Zellen, geschweige denn von Blutgefäßen, ausgeschlossen ist. Sie wird ausschließlich von regenerierenden Osteonen durchquert, welche die Fragmente buchstäblich miteinander verzapfen. Etwa 3 Wochen nach der Operation dringen die ersten Resorptionskanäle durch den Osteotomiespalt, 6 Wochen nach der Operation sind bereits zahlreiche neue Osteone entstanden, welche die Fragmentenden miteinander vereinigen (Abb. 8). *An solchen Stellen wird demnach nicht nur eine Frakturspalte primär durch Lamellenknochen ausgefüllt. Durch einen Regenerationsprozeß, dessen Träger die Corticalis selbst ist, erfolgt eine Vereinigung der Fragmentenden auf dem Wege einer primären Wiederherstellung der ursprünglichen Corticalisstruktur.*

Offen bleibt noch eine Frage: Wie gestaltet sich der zeitliche Ablauf und wie groß ist der Umfang der durch die Osteotomie ausgelösten Erneuerung der Osteone? Für ihre Überprüfung erwies sich die seit ihrer Entdeckung durch MILCH, RALL und TOBIE vielfach geübte Markierung des mineralisierenden Knochens mit Hilfe von Tetracyclinen als außerordentlich geeignet. Wir haben diese Methode an verschiedenen Hunden

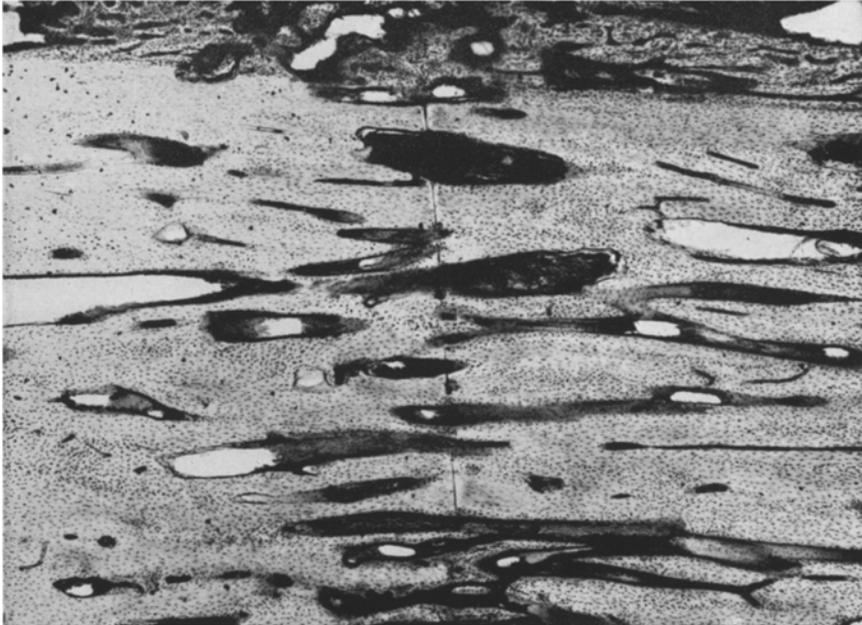


Abb. 8. Durch optimale Reposition und Druckenwendung kann die Osteotomie auf eine capilläre Spalte reduziert werden. 6 Wochen nach der Operation sind solche Stellen bereits von zahlreichen, in der Längsrichtung des Radius regenerierenden Osteonen durchquert. Am oberen Bildrand ist eine periostale Auflagerung erkennbar. Längsschliff, basisches Fuchsin, 25:1

routinemäßig angewandt. Besonders instruktiv sind die Ergebnisse bei einem Hund, der am Ende der 2., der 4. und der 6. Woche nach der Operation einen Achromycinstoß erhielt. An Querschliffen durch die nicht operierte Kontrollseite und durch die Gegend der Osteotomie wurden die während dieser Zeitspanne von der Markierung erfaßten, also in Regeneration begriffenen Osteone ausgezählt. Die Resultate sind in der Tabelle zusammengefaßt. Während sich auf einem der Frakturstelle entsprechenden Querschnitt des nicht operierten Radius innerhalb von 6 Wochen 2,5% sämtlicher Osteone im Umbau befanden, stieg dieser Anteil auf der operierten Seite auf über 60% an. Die Mineralisation der regenerierenden Osteone setzt in der 3. Woche nach der Osteotomie ein,

erfaßt am Ende der 4. Woche 24%, nach 6 Wochen 54% und nach 8 Wochen 63% sämtlicher Haversscher Systeme. Noch anschaulicher als die Zahlenwerte belegen vielleicht die fluoreszenzmikroskopischen Aufnahmen des operierten und des nicht operierten Radius die erstaunliche Aktivität, welche der Inhalt der Haversschen Kanäle — als Träger der

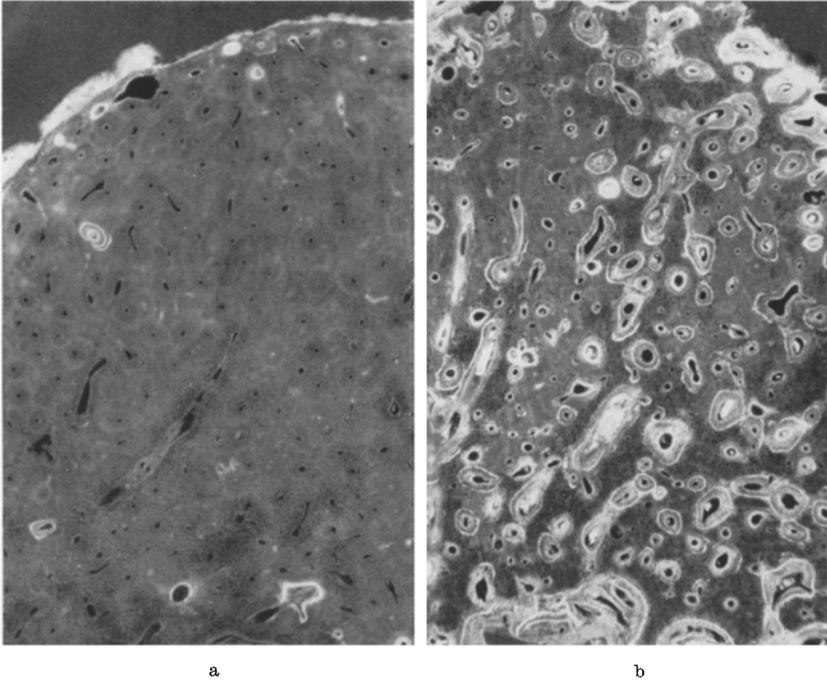


Abb. 9a u. b. Querschliffe durch den Radius eines Hundes, fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen nach Tetracyclinmarkierung (vgl. Text und Tabelle). 32:1. a nicht operierte Kontrollseite, b operierter Radius, 3 mm proximal von der Osteotomie. Die Intensivierung des Haversschen Umbaus ist an Hand der zahlreichen, von der Markierung erfaßten Osteone klar ersichtlich

*intra*kanalären Osteogenese in der Compacta der Röhrenknochen — im Zuge der Regeneration der devitalisierten Fragmente und im Verlaufe der primären Heilung einer Schaftfraktur entfaltet (Abb. 9).

Wir glauben, daß die Ergebnisse unserer histologischen Untersuchungen einige wichtige Fragen über die Frakturheilung unter stabilen Bedingungen geklärt haben. Wir wollen diese abschließend noch einmal zusammenfassen:

1. Im Sinne einer primären Heilung können Frakturspalten unter stabiler Fixation direkt durch Lamellenknochen ausgefüllt werden. Die Ausbildung eines Callus aus Bindegewebe, Knorpel oder Faserknochen unterbleibt.

Tabelle. *Haverssche Umbaurate am Radius eines Hundes*

Das Tier erhielt 2, 4 und 6 Wochen nach der Operation einen Achromycinstoß und wurde 8 Wochen nach der Operation getötet.

1. *Kontrollseite, nicht operiert:*

Ruhende Osteone	97,6% (1500)
Regenerierende Osteone	2,4% (35)

2. *Operierte Seite: Querosteotomie, Druckosteosynthese mit 10 kg, Auswertung über je 7 mm beidseits der Osteotomiestelle.*

Ruhende Osteone	37,7%
Regenerierende Osteone	62,3%

Beginn der Mineralisation in der regenerierenden Osteonen:

1—2 Wochen nach der Operation	0,4%
3—4 Wochen nach der Operation	23,3%
5—6 Wochen nach der Operation	30,0%
7—8 Wochen nach der Operation	8,6%

Total markierte Osteone	62,3%
-------------------------------	-------

2. Unter Druckanwendung ist es möglich, die Fragmente so zu reponieren, daß sie stellenweise direkt aufeinandergepreßt werden. Solche Stellen werden ausschließlich von regenerierenden Haversschen Systemen durchwachsen. Die Vereinigung der Fragmente erfolgt gleichzeitig mit der Wiederherstellung der ursprünglichen Corticalisstruktur.

3. Jede Fraktur löst im Cortex einen intensiven Haversschen Umbau aus. Unsere Auswertungen am Hunderadius haben ergeben, daß innerhalb von 2 Monaten rund zwei Drittel sämtlicher Osteone von dieser Regeneration erfaßt werden. Diese Zahlen beweisen, daß die Corticalis unter stabilen Bedingungen einen wesentlichen Beitrag zur Frakturheilung leisten kann.

Literatur

- ALLGÖWER, M., M. MÜLLER, R. SCHENK u. H. WILLENEGGER: *Langenbecks Arch. klin. Chir.* **305**, 1 (1963).
- ALTMANN, K.: *Z. Anat. Entwickl.-Gesch.* **115**, 52 (1950).
- BASSETT, C. A. L., D. K. CREIGHTON, and F. E. STINCHFIELD: *Surg. Gynec. Obstet.* **112**, 145 (1961).
- DANIS, R.: *Théorie et pratique de l'ostéosynthese*. Paris: Masson & Cie 1949.
- FRIEDENBERG, Z. B., and G. FRENCH: *Surg. Gynec. Obstet.* **94**, 743 (1952).
- FROST, H. M.: *Bone remodelling dynamics*. Springfield (Ill.): Ch. C. Thomas (1963).
- GEISER, M.: *Z. Orthop.* **97**, Suppl. (1963).
- KROMPECHER, S.: *Die Knochenbildung*. Jena: Gustav Fischer 1937.
- MATZEN, P. F.: *Brun's Beitr. klin. Chir.* **184**, 147 (1952).
- *Brun's Beitr. klin. Chir.* **188**, 97 (1954).
- MILCH, R. A., D. P. RALL, and J. E. TOBIE: *J. Bone Jt Surg. A* **40**, 897 (1958).
- OBERDAHLHOFF, H.: *Langenbecks Arch. klin. Chir.* **260**, 109 (1947).
- *Dtsch. med. Wschr.* **73**, 291 (1948).
- PAUWELS, F.: *Z. Anat. Entwickl.-Gesch.* **121**, 478 (1960).
- PETROKOV, V.: *Brun's Beitr. klin. Chir.* **205**, 265 (1962).
- SCHENK, R., u. H. WILLENEGGER: *Experientia (Basel)* **19**, 593 (1963).
- WAGNER, H.: *Langenbecks Arch. klin. Chir.* **305**, 28 (1963).

WILLENEGGER, H., R. SCHENK, F. STRAUMANN, M. MÜLLER, M. ALLGÖWER u. H. KRÜGER: Langenbecks Arch. klin. Chir. **301**, 846 (1962).
YAMAGISHI, M., and Y. YOSHIMURA: J. Bone Jt Surg. **37**, 1035 (1935).

Präsident: Ich danke Herrn SCHENK für diese außergewöhnlich schönen Untersuchungen, die, so scheint es mir wenigstens, eine wertvolle Erweiterung dessen darstellen, was wir über die Mikroskopie der Knochenheilung wissen.

Ich bitte jetzt Herrn KÜNTSCHER, die Diskussion einzuleiten.

84. Primäre Knochenheilung

Von

G. KÜNTSCHER-Hamburg

Mit 3 Abbildungen

Die Frage der Knochenheilung ist ein außerordentlich interessantes und vor allem auch ungeheuer wichtiges Problem, stellt es doch die Grundlage für unsere Arbeit nicht nur in der Behandlung der Knochenbrüche, sondern in der gesamten Knochenchirurgie dar. Der Ausdruck „primäre Knochenheilung“ ist nun nicht im Sinne wie „primäre und sekundäre Wundheilung“ zu verstehen, vielmehr ist etwas ganz anderes damit gemeint. Bei der Behandlung eines Bruches im Gips- oder Streckverband bildet sich bekanntlich zunächst ein *provisorischer Callus* im Bruchspalt. Dieser wandelt sich dann *sekundär in knöchernen Callus* um. *Primäre Knochenheilung* bedeutet nun die *sofortige knöcherne Überbrückung* des Bruchspaltes *ohne Auftreten eines Vorstadiums*. Die Callusbildung geht dabei von der Knochensubstanz selbst aus, hauptsächlich von den Haversschen Kanälen. Es handelt sich also um einen intermediären Callus. Der periostale und endostale Callus spielen dabei nicht wie sonst die Hauptrolle.

Um diese *primäre Knochenheilung* zu erreichen, sind *zwei unerläßliche Bedingungen* zu erfüllen. Erstens: der *Bruchspalt* muß durch ideale Reposition auf ein *Minimum* reduziert werden. Zweitens: Dieses Repositionsergebnis muß für die *ganze Dauer der Bruchheilung* ganz exakt bis in den mikroskopischen Bereich hinein aufrechterhalten werden. Das heißt, es darf auch nicht die feinste Wackelbewegung auftreten. Beides ist durch einen starken und konstanten Druck zu erreichen. Wenn man die Bruchstücke mit einer kräftigen Schraube zusammenpreßt, lassen sich sehr hohe Drucke im Bruchspalt erzeugen, und DANIS hat als erster dieses Prinzip verwirklicht und damit auch die primäre Knochenheilung entdeckt.

Ein *kontinuierlicher Druck* kann dabei *nur durch die Elastizität der Knochensubstanz zustande kommen*. Sie wird durch die Schraube zusammengepreßt, sie wird also deformiert und sucht sich nun infolge ihrer Elastizität wieder auszudehnen.