

(Aus dem Ungarischen Biologischen Forschungsinstitut Tihany  
[Vorstand: Prof. G. Entz.]

## Die Bedeutung des Knorpelcallus.

Von

Stefan Krompecher, Tihany, Ungarn.

Mit 1 Abbildung im Text.

(Eingegangen am 23. August 1939.)

Das Vorkommen des Knorpelgewebes im Callus ist den Pathologen seit jeher bekannt. Wenn man auch lange Zeit mit seiner Bedeutung nicht im reinen war, so galt das Erscheinen dieses Gewebes bei der Knochenneubildung doch als ganz natürlich. Auch die besonders ausgedehnten Arbeiten der letzten Jahre, auf die ich noch zurückkommen werde, haben die Bedeutung des Knorpelcallus betont, sogar hervorgehoben. Es war auch vor einem jeden Morphologen klar, daß der Knorpel in der Präformation der Knochen (Epiphysenknorpel) während der Embryonalentwicklung und des normalen Wachstums eine ganz bedeutende Rolle spielt, und daß ihm eine solche auch bei der regenerativen Knochenbildung (Callusbildung) zukommt, was ein *Befund*, der mit der obigen *Tatsache* in vollem Einklang stand. Aus jedem *histologischen und anatomischen Lehrbuch* ist ja bekannt, daß die knorpelig vorgebildete, chondrale (enchondrale) Knochenbildung ein ganz wesentlicher normaler Bildungsvorgang ist, der der desmalen Knochenbildung nicht nachgesetzt, noch weniger aber ganz überschritten werden darf. *Um so mehr ist zu verwundern, wenn Lauche bei der regenerativen Knochenbildung das Auftreten des präformativen Knorpels in einer Kategorie mit den „infizierten Knochenbrüchen“ usw. als eine „störende“ Erscheinung bezeichnet und für die ungestörte Bruchheilung nur die bindegewebig vorgebildete Bildungsart zuläßt.* Leider veröffentlicht *Lauche* (keine einzige Veröffentlichung über Knochenpathologie ist mir von ihm bekannt, auch im Literaturverzeichnis seines Beitrages ist keine solche angeführt) diese mit allen bisherigen Angaben im Gegensatz stehende Stellungnahme gleich in einem Handbuchbeitrag, begründet aber sein seltsames Urteil über die störende Wirkung des Knorpelcallus fast garnicht.

Es ist angezeigt, vor allem einen Überblick zu gewinnen, wie die Callusbildung vor sich geht, und welche Bedeutung dabei dem Knorpel zukommt. Wenn ich mich dabei kurz fasse, so kann dies darum geschehen, weil ich hinsichtlich der ganz ausführlichen Begründung und Besprechung einiger Tatsachen auf meine kürzlich erschienene Monographie<sup>1</sup> Bezug

<sup>1</sup> Krompecher, Stefan: Die Knochenbildung (Histogenese und Histologie der Knochenbildung und mechanische Inanspruchnahme, regenerative Knochenbildung, pathologische Knochenbildung usw.), 150 Seiten, 101 Abb., 5 Tafeln. Jena: Gustav Fischer 1937.

nehmen kann. Trotzdem will ich mich bemühen, den Vorgang an sich klar darzustellen und die Bedeutung des Knorpelcallus mit einigen neueren Angaben zu beleuchten.

Als Wegweiser soll uns die Betrachtung des normalen Wachstums eines Röhrenknochens dienen.

Betrachten wir Femur, Humerus, Tibia oder einen anderen Röhrenknochen in seiner Wachstumsperiode und wenden wir unser Augenmerk auf einen Teil jenes Knochens, auf das Mittelstück, auf die Diaphyse. Diese ist — wohlbekannt — durch die Epiphysenknorpel von der proximalen und distalen Epiphyse getrennt. An der Diaphyse können wir hinsichtlich *der Art des Wachstums* zweierlei Oberflächen unterscheiden: eine äußere, periostale, die durch Bindegewebe (Periost) begrenzt ist, wo die appositionelle Dickenzunahme des Knochens vor sich geht, und proximal und distal je eine *epiphysäre*, wo der zuwachsende Knochen an Knorpel grenzt, und wo das Längenwachstum des Knochens stattfindet. Histogenetisch betrachtet wächst also die Diaphyse der Dicke nach bindegewebig (periostal), d. h. *desmal* vorgebildet, und der Länge nach knorpelig, d. h. *chondral*. Im histologischen Schnitt sind diese zwei Bilder grundverschieden. Bei dem *desmalen* Bildungsvorgang an der Diaphysenoberfläche finden sich die kollagenen Faserbündel des präformativen Bindegewebes; die Reservezellen des Periostes werden unter Knochengrundsubstanzbildung zu Osteoblasten, bauen neuere und wieder neuere Cystosteone (Cytoosteon = eine Knochenzelle mit der durch sie gebildeten Knochengrundsubstanz), wobei das präformative Bindegewebe in den Knochen eingebaut wird. Der hier entstehende Knochen enthält also reichlich eingebaute kollagene Faserbündel, deren gröbere Fasern als Sharpeysche Fasern wohl bekannt sind. — Der chondrale Bildungsvorgang der Epiphysenenden ist unter dem Namen „enchondrale Ossifikation“ mit Säulenknorpelbildung usw. aus den histologischen Lehrbüchern gut bekannt. Zu betonen ist vielleicht noch, daß der dort entstandene neue Knochen spongiöser Knochen ist, und daß darin — wie bei dem desmalen das Bindegewebe, hier — die Knorpelreste als Richtungsbalken oder, besser bezeichnet, Stützbalken enthalten sind.

Neben der Art der Knochenbildung können wir auch der Verschiedenheit der *mechanischen Innenspruchnahme* nach zweierlei Oberflächen unterscheiden. An der äußeren periostalen Oberfläche der Diaphyse setzen Muskel und Bänder an, die eine Zugwirkung auf die *desmal* wachsende Oberfläche ausüben. Andererseits erfährt die Diaphyse von dem Knorpel der Epiphysen her einen *Druck*, bewirkt durch die Körperlast und die synergetische Wirkung der Muskulatur.

Außer dem histologischen Unterschied und dem der mechanischen Beanspruchung zeigt sich noch ein dritter, und zwar in der *Form der Knochenzellen*. Wenn die mechanischen Einwirkungen durch die statischen Einwirkungen auch größtenteils auf die schon fest gewordenen

Abschnitte des Knochens überliefert werden, so wirken sich diese Kräfte in geringem Maße doch auch auf die in Entwicklung begriffenen Knochenzellen aus, die diese Spuren dann an sich tragen. Von diesen so entstandenen Veränderungen der Knochenzellen kann von einem Sachverständigen auf die *in statu nascendi* obwaltenden mechanischen Verhältnisse gefolgert werden<sup>1</sup>.

Wollen wir diese Gegensätze noch etwas ergänzt gegenüberstellen, so können wir sagen:

1. An der äußeren *periostalen* Fläche wächst der Knochen *desmal*, *enthält Bindegewebsbestandteile*, und ist während des Wachstums einer *Zugwirkung* ausgesetzt, die sich auch an der *langgezogenen Form der Knochenzellen* ausprägt. Dieser Knochen ist *zugfest*.

2. An den *epiphysären* Flächen wächst der Knochen *chondral*, *enthält Knorpelreste*, und ist während des Wachstums einer *Druckwirkung* ausgesetzt, die sich an der *gedrückten Form der Knochenzellen* ausprägt. Dieser Knochen ist *druckfest*.

Eine genaue Durchprüfung der verschiedenen Arten der Knochenbildung lies es uns dann als selbstverständlich erkennen, daß eine *unter Druck* befindliche Knochenfläche *nur chondral* wachsen kann, und eine *unter Zug* befindliche *nur desmal* (Krompecher: Knochenbildung, Kap. 4).

Hierauf werden Experimente<sup>2</sup> angesetzt, durch die die prinzipielle Bedeutung der im normalen Wachstum gefundenen Gesetzmäßigkeit erwiesen wurde: Zersägte Beine des Hundes wurden unter sonst ganz gleichen Verhältnissen in einem Falle unter Zugwirkung, im anderen Falle unter Druckwirkung geheilt.

Im Falle einer Anwendung von *Zugwirkung* entstand ein desmaler Callus mit folgender histologischer Reihenfolge: Bluterguß — Indifferentes Granulationsgewebe — Bindegewebiger (desmaler) Callus — Desmaler Knochencallus. (Wobei die Zugwirkung im zweiten Stadium wirkungsvoll ist.)

Im Falle einer Anwendung von *Druck* entstand ein Knorpelcallus: Bluterguß — Indifferentes Granulationsgewebe — Knorpeliger (chondraler) Callus — chondraler Knochencallus. (Wobei der Druck ebenfalls im zweiten Stadium wirken wird).

Zur Bestärkung der Richtigkeit des Gesagten, das auf Grund einer eindeutiger embryologischer, histogenetischer, histologischer, anatomischer, pathohistologischer und chirurgischer Ergebnisse gewonnen wurde (Krompecher 1934—37), möge auf oben zitiertes Buch und auf die gleichbedeutenden Angaben bzw. zustimmenden Äußerungen und Befunde von Roux Benninghoff, Moskoff, Pernyéssz, Stieve, Richter, Pauwels, Passarge usw.

<sup>1</sup> Näheres siehe Krompecher: Die Knochenbildung, S. 70—73 und Abb. 54—58.

<sup>2</sup> Krompecher, Stefan: Verh. der anat. Ges. 1935 und ausführlicher in der früher zitierten Monographie.

hingedeutet werden. Auch meine letzteren Versuche, wodurch es gelang, auf Grund dieser Erkenntnisse einen experimentell entstandenen Faserknorpel am Anatomenkongreß in Königsberg zu demonstrieren, können die Richtigkeit dieses Zusammenhanges bestätigen; Ergebnisse, mit denen Naucks ebendort vorgeführte einschlägige Versuche aufs klarste übereinstimmen.

Somit können wir für die *Bedeutung des Knorpelcallus* folgendes ermitteln: Seine Entstehungsbedingungen und seine Bedeutung ist ähnlich denjenigen des präformativen Knorpels normalen Knochenwachstums. Wenn wir den epiphysären Fugenknorpel als eine „normale“ Erscheinung betrachten — und das tun wir mit Recht —, der den noch aus Teilen bestehenden Röhrenknochen vereinigen soll, so müssen wir mit demselben Recht auch den *knorpeligen Callus für die Bruchheilung* als „normal“ bezeichnen, ebenso wie wir natürlich auch den bindegewebigen Callus als eine Wiederholung der desmalen Knochenbildung als „normal“ betrachten (vorausgesetzt, daß ein Knochenbruch gegeben ist). Die *auslösende Ursache der Knorpelbildung* ist dabei der *Druck*, ebenso wie jener der *Bindegewebsbildung* der *Zug* ist (wobei unter Bindegewebe das reife Bindegewebe, hier vorwiegend kollagene Faserbündel gemeint werden und ja nicht das Granulationsgewebe!). Wir können also sagen, daß das *Vorhandensein eines Knorpelcallus auf eine während der Bruchheilung aufgetretene Druckwirkung deutet*. Diese konnte auch eine sehr mäßige gewesen sein. Die Druckwirkung ist bedingt durch die Kontraktion der Muskulatur, namentlich durch die synergetische Wirkung der Flexoren und Extensoren. Ein Streckverband wird das Vorhandensein einer Druckwirkung nicht unbedingt ausschließen. Wenn nämlich bei dem Streckverband kein zu starker, sondern nur ein mäßiger Zug angewendet wird, so wird dieser die stärkere Kontraktionskraft der Muskulatur nur schwächen, aber nicht beheben. *Technisch* mag also ein Zugverband mit geringeren Gewicht angewandt sein, und die Bruchflächen sind biologisch trotzdem unter Druck, nur eben unter einem geschwächten Druck. Eine Tatsache, die meiner Erfahrung nach bei einer oberflächlichen Betrachtung der Umstände nicht allen ohne weiteres einleuchtend erschien. Wird aber ein Zugverband stark belastet, und werden dadurch die Bruchflächen voneinander entfernt und das dazwischen liegende Granulationsgewebe einer Zugwirkung ausgesetzt, entsteht ein desmaler Callus. Nun soll aber die Frage nach dem Maße der einwirkenden Kräfte berührt werden. Gramme oder Kilogramme können sicherlich nicht angegeben werden, um so mehr da es sich um Körperteile verschieden starker Muskulatur handelt. So viel kann aber gesagt werden, daß der untere Grenzwert ein sehr geringer ist, also daß schon ein ganz schwacher Druck und ein ganz schwacher Zug wirksam sind. Die Receptoren sind ja Zellen des Granulationsgewebes, und diese sind sehr empfindlich und werden in ihrem Differenzierungsweg durch mechanische Kräfte beeinflußt, die

ihren mikroskopischen Dimensionen entsprechen. Zwischen den Bruchflächen sind solche Kräfte praktisch immer vorhanden.

Wer die Dynamik eines solchen Milieus kennt, wird zugeben müssen, daß ein mechanischer Ruhestand nur zwischen gewissen umschriebenen, aneinander gestützten Flächen, namentlich bei Splitterbrüchen vorkommt, aber bei gewöhnlichen Diaphysenbrüchen, die auch bei Gipsverbänden so viele nicht erwünschte Verschiebungen aufweisen, im allgemeinen *nicht*. Diese, meistens nur an einzelnen Flächen zur Beobachtung gelangende, unter mechanisch neutralen Verhältnissen vorkommende Knochenbildung — die aber von der zugbedingten „desminalen“ ebenso wie von der druckbedingten „chondralen“ scharf zu trennen ist — hat eine untergeordnete Bedeutung, und deshalb genügt es, dies bezüglich auf die entsprechenden Kapitel (3 und 8, F) meiner „Knochenbildung“ hinzuweisen.

Es gibt aber zwischen deutlichem Zug und Druck eine Zone, wo die Intensität der mechanischen Einwirkungen die Reizschwelle der Zellen zu einer Differenzierung zu Knorpel oder Bindegewebe nicht erreicht, da sie zu gering ist. In bezug auf die *Histogenese* ist diese Zone *neutral* zu bezeichnen. Über diese Stellen soll hier nur so viel gesagt werden, daß ein in physikalischem Sinne genommener Ruhestand natürlich auch hier nicht vorhanden ist. Wer das Leben der Gewebe, z. B. die mechanischen Kräfte, die bei einer Zellteilung walten, auch nur einigermaßen kennt, wird sich so eine Vorstellung niemals machen. Ganz subtile Kräfte können aber die undifferenzierten Mesenchymzellen in ihrer direkten Ausbildung zu Knochenzellen nicht verhindern, sondern nur geringfügige Formveränderungen an den Osteoblasten hervorrufen (*Krompecher: Die Knochenbildung*, Abb. 54—58) oder auf die Anordnung der Knochengrundsubstanz einwirken (auf diese Momente soll in einer besonderen Arbeit eingegangen werden).

Der Klarheit wegen soll hier noch darauf hingewiesen werden, daß es sich bei der Besprechung der Art des Knochenwachstums immer um Knochenflächen handelt (und nicht etwa um Knochenteile). Knochenflächen dürfen also mit Knochenteilen nicht verwechselt werden. Eine Tatsache, die bei näherer Überlegung klar einleuchtet. Eine Kenntnis dieser Grundbegriffe wird vorausgesetzt. Es kann nämlich ein und derselbe Knochen (oder Knochenteil) an seinen verschiedenen Flächen mechanisch verschieden in Anspruch genommen sein und demgemäß auch auf verschiedene Art wachsen.

Wir haben gesehen, daß im Laufe der normalen Entwicklung auf die überwiegend meisten Knochenflächen gut definierbare mechanische Kräfte wirken, und daß der Organismus über Einrichtungen (präform. Knorpel und Bindegewebe) verfügt, die diese durchaus normalen (und wie wir es von anderen Ergebnissen wissen, sogar formativen) Reize im Bauplan des Menschen verwendet.

Es soll sich aber hier nicht um Worte handeln, was wir „gestört“ und was „ungestört“ bezeichnen, sondern um das Erkennen dessen, daß mechanische Wirkungen, d. h. Zug oder Druck, bei der Bruchheilung praktisch immer vorhanden sind, und daß die Heilung je nachdem bindegewebig oder knorpelig verläuft, wobei beide Bildungsarten ihr embryonales Vorbild haben.

Eine andere Frage ist jene der Bewertung dieser verschiedenen Formen vom Standpunkte des Klinikers oder, allgemeiner betrachtet, vom praktischen Standpunkte aus. Hier wollen wir wieder möglichst behutsam anfassen, indem wir feststellen, daß ein in statu nascendi unter Zug entstandener *desmaler Callus zugfest* ist, eine Druckfestigkeit aber strukturell entbehrt und eine solche nur durch die Kalkeinlagerung erfährt. Der *chondrale Callus* ist dagegen mit einer strukturell bedingten Druckfestigkeit versehen, wobei ihm mittels seines periostalen Belages auch eine Zugfestigkeit zukommt (s. die Abb. 1). Das zeigt schon einen Vorteil für den chondralen Callus. Ein zweiter Unterschied läßt sich vom Vergleiche der gewöhnlichen Gestaltung erforschen, daß nämlich bei dem chondralen Callus der präformative Knorpel bis auf die Stützbalken abgebaut und der Knochen aus einer zweiten, von der Diaphyse herkommenden Zellgeneration, den mechanischen Einwirkungen entsprechend, aufgebaut wird, während bei dem desmalen Callus das ganze Bindegewebsgerüst eingebaut wird; man dürfte fast sagen, daß hier der provisorische Callus verknöchert, indem die Reservezellen zu Osteoblasten werden und das Bindegewebe in eine Knochengrundsubstanz einbauen. Wieder ein Vorteil für den Knorpelcallus. Und diese zwei Vorteile sind *strukturelle* Vorteile. Für die Diaphysenbrüche und wohl auch für viele andere Brüche gibt es noch einen dritten, ganz wesentlichen Vorteil zu gunsten des Knorpelcallus. Die Diaphysen sind bekanntlich von den zwei Enden her einer Druckwirkung ausgesetzt. Man denke bloß an einen frisch geheilten Schenkeldiaphysenbruch, der nicht nur seitens der Muskulatur einen Druck zu ertragen hat, sondern auch durch das Körpergewicht gedrückt wird. Ein solcher Bruch muß demnach mit einem druckfesten, knorpeligen Callus heilen. So einer entsteht aber nur unter einem in statu nascendi einwirkenden Drucke. Wird aber während der Heilung ein Streckverband angesetzt, der nicht bloß den übermäßig starken Druck der Muskeln mildert, sondern die Bruchenden voneinander entfernt, d. h. das die Bruchenden

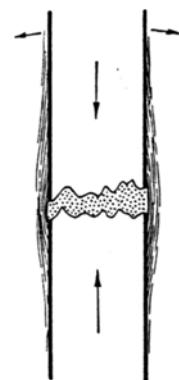


Abb. 1. Druck- und zugfester Knorpelcallus. Unter der Druckwirkung entsteht zwischen den Bruchenden ein druckfester Knorpelcallus. Sobald aber nur geringste Schwankungen auftreten (mit den kleinen Pfeilen ange deutet) gelangen die seitlichen Abschnitte unter Zug, folglich wird der Callus in der Periostzone bindegewebig, und verliert so dem Callus auch eine Zugfestigkeit.

verbindende Granulationsgewebe unter Zug setzt, so entsteht ein desmaler Callus, der wohl zugfest sein wird, der späteren physiologischen Belastung aber strukturell durchaus nicht gewachsen ist.

Wie wir hieraus ersehen können, sind desmaler und chondraler Callus — in Anbetracht ihrer präformativen, embryologischen und mechanischen Bedeutung — theoretisch betrachtet als normale Erscheinungen gleichzustellen, praktisch aber ist der unter Druck entstandene chondrale Callus qualitativ-mechanisch leistungsfähiger, strukturell hochwertiger (zug- und druckfest) und in vielen Fällen der Bruchheilungen (Stellen mit einer Druckbeanspruchung) der allein günstige Heilungsweg, wogegen an manchen anderen Brüchen, namentlich an denen der rein zugbeanspruchten Apophysenteile theoretisch ein zugfester Bindegewebs-callus angebracht ist.

Nach diesem Überblick der Vorgänge während der Callusbildung wollen wir einen kritischen Blick auf den Handbuchbeitrag *Lauches* werfen:

Von der *Präformation* der Knochen und ihrer Bedeutung steht im Beitrag so gut wie nichts geschrieben. An sich wäre das bloß ein kleiner Mangel. Aus dem Aufbau und Inhalt ist aber ersichtlich, daß diese normal-anatomischen und embryologischen Einzelheiten überhaupt nicht berücksichtigt worden sind. In seinen Folgen führte das zu gewissen Irrtümern (z. B. Knorpel als „störende Erscheinung“).

Was die *cytologischen* Beziehungen anbetrifft, so geht der Verfasser hinsichtlich seiner eigenen Erfahrungen nicht weit. Vielmehr folgt ein etwas einseitiger Bericht über die Literatur, wozu er — hinsichtlich der Grundsubstanzbildung — sich dahin äußert, daß alle seine eigenen Beobachtungen darauf hindeuten, daß die „Ausfällung des Osteoids, ähnlich wie die des Amyloids, in den Maschenräumen des mesenchymalen Netzwerkes, also extracellulär, zustande kommt“ (S. 225). Im Späteren schließt er sich sogar direkt der Anschauung der *zellenlosen* Entstehung des Osteoids an, die seines Erachtens am besten den *histologischen Befunden* entsprechen soll. Allerdings soll hier zugegeben werden, daß solche *Meinungen* in der Literatur vorkommen, die aber als *Befunde* nicht bewertet werden dürfen.

Die *Histologie* der Knochenbildung läßt sich von der Cytologie derselben nur schwer trennen. Der *bindegewebig* vorgebildete Knochen wird in seiner Entstehung nach *Weidenreichs* Theorie dargestellt, daß nämlich nach „Einlagerung von osteoider Grundsubstanz“ nach der Verkalkung die vorher vorhandenen „Bindegewebsszellen“ als „Knochenzellen“ eingeschlossen werden. Diese Anschauung ist meines Erachtens überholt und widerlegt. Daß sich die präformativen Bindegewebfasern der Zugrichtung entsprechend anordnen, ist von seinen Abbildungen zu erkennen, und wird — nicht ohne Berufung auf meine früheren Ausführungen — für manche Fälle zugegeben. Daß sie „in anderen Fällen keine Beziehungen zu ‚richtenden‘ Zugkräften erkennen lassen“, bezieht

sich wohl auf jene Fälle, wo die Fasern nicht in der Schnittebene verlaufen und so in dieser bloß als ein „Flechtwerk“ erscheinen.

Es ist vom Verfasser sehr richtig erkannt worden und sehr schön dargestellt, daß Blutgefäße die Achsen des körperlich schwammartig angeordneten Knochens bilden.

Über die *knorpelige* Callusbildung wurde schon einleitend gesagt, daß sie vom Verfasser als eine *Störung* der Bruchheilung betrachtet wird. Sucht man die Erklärung dafür, so muß man sich mit folgender unbegründeter Feststellung begnügen. „Ein genaueres Studium, vor allem der seltener zur Untersuchung kommenden, ungestört heilenden Knochenbrüche ergab jedoch, daß unter idealen Heilungsbedingungen kein Knorpel auftritt.“ Ja, zu diesem Satze muß sofort hinzugefügt werden, daß er etwas richtiges an sich hätte, wenn Verfasser die primär angio-gene, d. h. ohne Präformationsgewebe vor sich gehende Callusbildung (s. meine Abhandlungen) als ideale gekannt oder beschrieben hätte, der gegenüber das Auftreten eines präformativ zugfesten Bindegewebes oder eines druckfesten präformativen Knorpels vielleicht gegenübergestellt werden könnte, aber auch dann nicht als störender, sondern vielmehr als ein vermittelnder Vorgang. Verfasser hat aber das nicht getan, sondern er hat der Knorpeldifferenzierung das Auftreten des Bindegewebes (und zwar des derbfaserigen Bindegewebes und nicht des „unreifen“ Bindegewebes) gegenübergestellt, so muß diese Feststellung für *restlos unrichtig* bezeichnet werden, da sie mit allen unseren auf diesem Gebiete bisher gesammelten Angaben im Gegensatz steht (s. die Ausführungen in der ersten Hälfte der Arbeit). Obige Äußerung von Lauche ist die Folge des Fehlens der Berücksichtigung der früher angeführten anatomisch-embryologischen Einzelheiten. Ein knorpeliger Callus ist nicht nur *nicht störend*, sondern er ist theoretisch und auch praktisch eine *sehr erfreuliche* Erscheinung. Es soll an dieser Stelle noch ein Satz nicht unerwähnt gelassen werden, daß nämlich bei dem *weiteren Schicksal der Knorpelherde* Verfasser als *Novum* schreibt, daß der Knorpel nach Art der „enchondralen Ossifikation“ durch Knochen ersetzt wird: „Im Schrifttum fand ich allerdings keine einschlägigen Beobachtungen mitgeteilt, wie denn überhaupt die Umwandlung des provisorischen in den endgültigen Callus noch wenig studiert ist.“ Und dem folgt eine der „chondralen Ossifikation“ entsprechende Beschreibung. Diesbezüglich möchte ich von meiner Jenaer Arbeit (die vom Verfasser zitiert und behandelt wurde) folgenden Satz wiederholen: „So entsteht der provisorische *knorpelige Callus*. Von den Bruchenden her beginnt nun der Umbau in den *knöchernen Callus* durch die wohlbekannte chondrale Knochenbildung (s. Abb. 2)“. Wenn sich also Verfasser des Handbuchbeitrages ein wenig Mühe genommen hätte, so hätte er nicht im Jahre 1936 die Entdeckung machen müssen, daß bei der regenerativen Knochenbildung der präformativen Knorpel durch die Art der „chondralen Ossifikation“ durch Knochen ersetzt wird, sondern er hätte gesehen, daß das von anderen Forschern

schon früher als selbstverständlich und als Gemeingut erwähnt, beschrieben und abgebildet wurde.

Die Bedeutung der *mechanischen* Einflüsse betreffend, behandelt der Verfasser auch den Druck bei der Erwägung, welcher Faktor wohl das Erscheinen des Knorpels verursacht. Mit Bezugnahme auf meinen Jenaer Kongreßvortrag 1935, wo die Entstehungsbedingungen des Knorpels usw. experimentell erwiesen wurden, sagt er folgendes: „Druckwirkung, die St. Krompecher neuerdings (1936) als auslösenden Faktor für die Bildung von knorpeligem Callus annimmt, kommt für die Rippenfrakturen kaum in Betracht“. Man fragt, ja warum nicht? Eine Begründung fehlt aber. Der Verfasser macht wieder lediglich eine Behauptung. Auf diese muß aber folgendes gesagt werden: Diese Gesetzmäßigkeit, daß nämlich die unter Druck befindlichen Knochenflächen auf knorpeliger Grundlage wachsen, ist embryologisch, auf Grund der Durchprüfung der Präformation der Knochen, histogenetisch, histologisch, anatomisch, in seiner Mechanik, vergleichend, bei regenerativen Vorgängen geprüft und entdeckt worden (und die Richtigkeit dieses Prinzips hat sich neuerdings auch an angrenzenden Gebieten, auch dort experimentell und weiterhin auch bei der Untersuchung anderer Forscher durchaus erwiesen). Wenn nun dem Verfasser des Handbuchbeitrages die Kenntnisse in diesen anatomisch-embryologisch-mechanischen Spezialgebieten — wie oben dargestellt wurde — nicht so geläufig sind als auf rein pathologisch-anatomischen Gebieten, sollte er sich hüten, ein solches Thema in dieser Art anzugeben, und erst recht, experimentellen Ergebnissen gegenüber — ohne zu begründen — sich kategorisch zu äußern. Es ist prinzipiell unrichtig, die allgemeinbiologische Gesetzmäßigkeit der Entstehungsfaktoren des Knorpels allein bei den Rippenbrüchen zu betrachten und prinzipielle Ergebnisse auf Grund der dort gemachten Wahrnehmungen leichterhand abzuweisen. Bei einer solchen einzelnen Betrachtung kann nämlich nur zu leicht ein Fehler vorkommen, wie dieses im gegebenen Falle auch besonders ins Auge springt. Bei den Rippenbrüchen sind nämlich die Bruchenden doch aufeinander gedrückt. Man braucht bloß an die Wirkung der Musculi pectorales-trapezius, der rhomboidei-serratus anterior usw. zu denken. — Was die abscherende Wirkung anbetrifft, die Verfasser auf Grund früherer literarischer Angaben für die Knorpelbildung verantwortlich macht, und für die er sich auch im Falle der Rippenbrüche einsetzt, so ist diese ein Problem, das noch manches ans Tageslicht bringen wird. Diesbezüglich möchte ich vor allem auf die mit dem Umberto-Preis (international der besten Arbeit auf orthopädischem Gebiete in den letzten 5 Jahren) belohnte Arbeit von Pauwels<sup>1</sup> deuten, die in dieser Beziehung dem Verfasser sehr eindrucksvoll hätte sein können. Leider ist er aber auch an diesen sehr exakt demonstrierten Angaben fast ganz vorbeigegangen; er hätte aber

<sup>1</sup> Pauwels, F.: Der Schenkelhalsbruch ein mechanisches Problem. Stuttgart: Ferdinand Enke 1935.

entnehmen sollen, daß eine reine Scherkraft durchaus zu *keiner* knorpeligen Vereinigung der Bruchenden führt, zweitens aber per analogiam auch das, daß bei Rippenbrüchen eine Abscherung nur in jenen seltenen Fällen entstehen kann, wenn die Bruchlinie schief steht und die Bruchenden wie die Klingen der Schere aneinander sich verschiebend abreiben. Liegt aber die Bruchlinie quer und ist das Periost erhalten, kommt es kaum zu einer Abscherung.

Seit dem Erscheinen der Arbeit *Lauches* sind diesen Punkt betreffend besondere Untersuchungen vollendet worden. Namentlich haben bereits meine früheren Experimente gezeigt, daß die auslösende Ursache der Knorpelbildung aus dem Granulationsgewebe der Druck ist, wogegen *Lauche* (wie erwähnt wurde), sich auf die älteren Angaben von *Roux* u. a. stützend, ohne aber in das Problem näher eingegangen zu sein, die *Abscherung* in den Vordergrund schiebt, indem er sagt, „daß sich Knorpel dann bildet, wenn die Bruchenden aufeinander reiben, wenn also abscherend wirkende Bewegungsreize in gewisser Stärke die Frakturstelle während der Bildung des Callus treffen“. Im Anatomischen Institut der Heidelberger Universität haben wir in gemeinschaftlicher Arbeit mit Herrn Prof. *K. Goettler* diese Frage experimentell zu einem gewissen Erfolg geführt. Wir haben experimentell<sup>1</sup> eine Gelenkfläche machen können, indem wir eine glatte, granulierende Spongiosafläche des abgesägten Femurendes (Kaninchen) an die gegenüberliegende Tibia-gelenkfläche drückten und durch Seitenverschiebung glätteten. Aus dieser Arbeit erhellt, daß die Ursache der Ausbildung der Gelenkfläche der *Druck und die Seitenverschiebung* ist. Für unser hiesiges Problem läßt sich aus diesem Versuchsergebnis folgender Schluß ziehen: *Druck allein brachte die Knorpelbildung herbei, die Seitenverschiebung dazu die glatt abgegrenzte Fläche*. Seitenverschiebung allein brachte zwar eine abgegrenzte Fläche, die aber an den drucklosen Stellen nicht knorpelig war. Und Druck allein, ohne Seitenverschiebung (Epiphysenknorpel, Knorpelcallus usw.) rufen Knorpelbildung hervor, ohne eine glatt abgegrenzte Oberfläche. Wenn wir nun den Bewegungsreiz, den *Lauche* als Abscherung bezeichnet, analysieren, stellt es sich heraus, daß er in zwei Komponenten aufzulösen ist: auf eine Druckkomponente und auf eine Seitenverschiebung; diese führen nach den Experimenten zu einer Gelenkflächenbildung, aber nicht zu einer knorpelig-knochernen Verheilung. Somit kann festgestellt werden, daß die Abscherung mit der Knorpelbildung wohl etwas zu tun hat, sie verursacht nämlich die Ausbildung einer knorpeligen Gelenkfläche: also mehr als Knorpel, d. h. einen *geformten* Knorpel. Es ist heute experimentell klar erwiesen, daß das Granulationsgewebe auf die *Druckkomponente* der Scherkraft zu *Knorpel*, und auf die Komponente der *Seitenverschiebung* zu einer *glatten Fläche* wird. Auch in diesem Sinne ist die im Handbuch veröffentlichte Meinung *Lauches* richtig zu stellen. Über experimentelle Gelenkbildung werden übrigens in nächster Zeit

<sup>1</sup> *Krompecher u. Goettler*: Verh. der anat. Ges. Leipzig 1938, 43.

meine im Ungarischen Biologischen Forschungsinstitut in Tihany durchgeführten erfolgreichen Untersuchungen (Bildung ganzer Gelenke) veröffentlicht, die unter anderem eine ganz weitgehende Bestätigung dieser hier kurz geschilderten Angaben liefern.

Auf eine weitere kritische Betrachtung des Beitrages will ich verzichten. Die bisherige habe ich mit Bedauern eben darum machen müssen, weil es sich um einen *Handbuchbeitrag* handelt, der eine längere Zeit als Ausgangspunkt weiterer wissenschaftlicher Betrachtungen zu dienen pflegt; diesmal nur mit einem entsprechenden Vorbehalt.

#### Zusammenfassung.

1. Der Knorpelcallus ist ein vorübergehendes Gebilde in dem Vorgang der knöchernen Vereinigung gebrochener Knochen. Aus dem indifferenten Granulationsgewebe (postembryonale pluripotente Mesenchymzellen) entsteht der Knorpelcallus auf Einwirkung des *Druckes*, und aus ihm wird durch den bekannten Vorgang der chondralen Ossifikation ein chondraler Knochencallus. *Das Erscheinen des Knorpelcallus ist also — entgegen dem Henke-Lubarschschen Handbuchbeitrage Lauches, der den Knorpelcallus als eine „Störung der Knochenbruchheilung“ betrachtet — eine durchaus normale Bildung*, ebenso, wie in der embryonalen und postembryonalen Entwicklung die *knorpelige Vorbildung* vieler unserer Skeletteile (also das Erscheinen der Epiphysenknorpel usw.) auch normal ist. Der Knorpelcallus, der durch die Druckwirkung hervorgerufen wird, kann dem Bindegewebscallus, der auf Zugwirkung entsteht, gewiß nicht nachgesetzt werden. Beide sind in ihrer Entstehung von mechanischen Kräften abhängig.

2. Der durch bindegewebige Vorbildung entstandene *desmale Knochen-callus* (den *Lauche* allein als „normal“ zuläßt) ist strukturell zugfest, entbehrt aber einer strukturellen Druckfestigkeit, er ist auch weniger porös, ziemlich massenhaft, und so nur an *zugbeanspruchten Stellen* entsprechend, an den zahlreicheren druckbeanspruchten Bruchheilungsstellen dagegen dem knorpeligen Callus gegenüber minderwertig.

3. Der durch *knorpelige Vorbildung* entstandene *chondrale Knochen-callus* (den *Lauche* als „störende“ Erscheinung bezeichnet) ist strukturell druckfest, besitzt aber durch die Periostlage auch eine erhebliche Zugfestigkeit. Auch ist er porös, leicht umzubauen, an Quantum gering, aber qualitativ hochwertig. So ist er bei hauptsächlich *druckbeanspruchten* Röhrenknochenbrüchen der allein richtige Weg der Knochenbruchheilung (s. die knorpeligen Ephyphsenfugen als Vorläufer und embryonale Vorbilder der knorpeligen Knochenvereinigung).