

Aus der Orthopädischen Klinik
(Direktor: Prof. Dr. sc. med. Hellinger)
und dem Direktorat für Planung und Ökonomie
(Direktor: Dr. oec. Frank),
Abteilung Medizintechnik und Elektronik
(Leiter: Dr.-Ing. Güttler)
der Medizinischen Akademie „Carl Gustav Carus“ Dresden

Möglichkeiten der Beeinflussung der Knochenbruchheilung durch elektrische Ströme

Von J. HELLINGER, J. KLEDITZSCH und P. GÜTTLER

Zusammenfassung

Ausgehend von der Wirkungsphysiologie können zwei Verfahrensweisen der Elektrostimulation zur Anregung des Knochenwachstums unterschieden werden, einerseits die Umkehrung des piezoelektrischen Effektes und zum andern durch ein elektrisches Feld die Ausrichtung der sich bildenden Knochenfibrillen.

Technischerseits werden verschiedene Stimulationsmetho-

den beschrieben, wie z. B. die Magnetfeldmethoden, mono- bzw. bipolare Impulsströme oder das Interferenzverfahren. Erste positive klinische Erfahrungen mit dem versenkbaren bipolaren Elektrostimulator IES 2 werden erläutert.

Sachwörter

Knochenbruchheilung, Elektrostimulation, bipolare Rechteckimpulse, Interferenz, implantierbarer Elektrostimulator

Die Beschreibung des piezoelektrischen Effektes am Knochen durch die Japaner Fukada u. Yasuda 1957 gab den Anlaß zu Untersuchungen der Wirkung elektrischer Stimulation auf das Knochenwachstum. Dies zeigt sich auch in der seit 1967 jährlich beständig wachsenden Anzahl von Veröffentlichungen zu dieser Thematik. Dabei werden zahlreiche Verfahren der elektrischen Stimulation zur Anregung der Osteogenese beschrieben, die klinisch oder tierexperimentell die verschiedensten Resultate erbrachten.

Grundsätzlich zwei Verfahrensweisen der Elektrostimulation zur Anregung des Knochenwachstums können von der Wirkungsphysiologie her unterschieden werden. Das erste Verfahren beruht auf der Umkehrung des piezoelektrischen Effektes. Knochen, die statisch auf Biegung beansprucht werden, zeigen auf der Konkavseite ein negatives und auf der Konvexseite (Zugbelastung) ein positives Potential (Abb. 1).

Nach dem Transformationsgesetz von Wolff (1884) ändert der Knochen mit der elastischen Deformation seine Form, d.h. auf der Seite mit positivem Potential baut sich der Knochen ab, auf der Seite mit negativem Potential lagert sich Knochen an. Die Grundidee der Stimulation mit negativem Potential (Gleichspannung) ist die Umkehrung dieses Effektes. Negative Elektroden werden direkt im Fraktur- oder Osteotomiegebiet plaziert, um hier die Knochenneubildung zu beschleunigen. Die positive Elektrode wird als indifferente Elektrode ausgeführt.

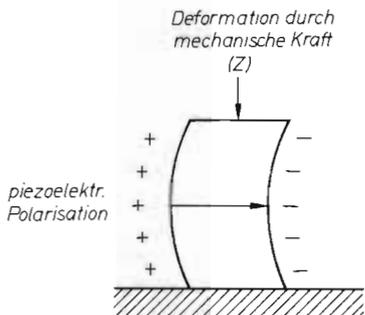


Abb. 1 Piezoelektrischer Effekt am Knochen

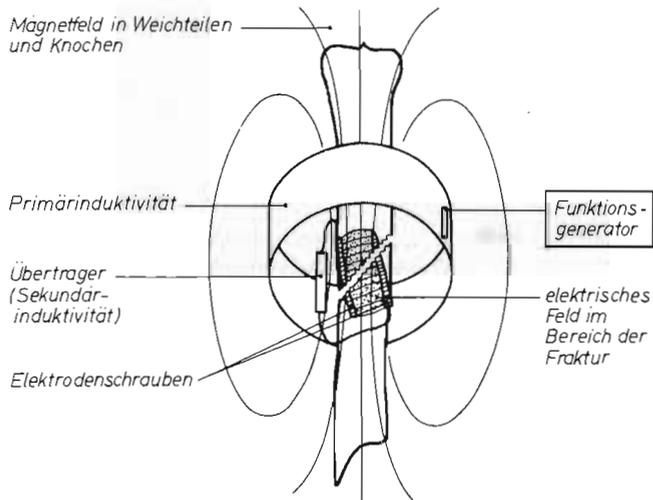


Abb. 2 Elektro-dynamische Potentiale nach der Methode Kraus-Lechner

Das zweite Verfahren hat nach Bassett (1962) bzw. Cieszynski (1963 u. 1967) das Ziel, durch ein elektrisches Feld im Gebiet der Fraktur oder Osteotomie eine Ausrichtung der sich bildenden Knochenfibrillen zu bewirken. Bassett (1977) gibt diesem „orientierenden“ Prinzip den Vorzug vor dem rein stimulatorischen mit Gleichspannung. Die Elektrodenanlage ist symmetrisch zum stimulierenden Gebiet gewählt, und im Gegensatz zum ersten Verfahren soll keine bevorzugte Polarität entstehen. Technischerseits können verschiedene Stimulationsmethoden unterschieden werden:

1. Magnetfeld-Methode

1.1. Direktwirkendes Magnetfeld

Dieses direktwirkende Magnetfeld hat nach Detlavs (1979) den Vorteil, daß keine direkte Elektrodenanlage notwendig ist. Durch den notwendigen großen Energieaufwand und der dadurch nur stationär möglichen Applikation ist die Anwendung dieses Verfahrens deutlich eingeschränkt.

1.2. „Elektrodynamische Potentiale“ — Methode Kraus-Lechner

Im Prinzip handelt es sich um eine induktive Übertragung eines schwingenden sinusförmig verlaufenden Magnetfeldes, das durch einen implantierten Überträger in ein elektrisches Potential umgewandelt wird (Abb. 2).

Nach Kraus (1976) und Lechner (1974) soll die Wirkung u. a. in einer verstärkten Vaskularisation und Bindegewebssynthese bestehen. Kraus (1973) erklärt dies mit einer Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und molekularem Sauerstoff.

Die vorliegenden Ergebnisse sind nicht einheitlich, wie neuere Arbeiten der Arbeitsgruppe um Blümlein, Mc Daniel, Ziegler u. Perren (1978) aussagen. Stürmer, Kehr u. Schmit-Neuerburg (1978) erzielten tierexperimentell bei der Behandlung avitaler Pseudarthrosen nur durch die gleichzeitige Kombination mit Spongiosaplastik positive Ergebnisse.

2. Stimulation mit dem elektrischen Feld

2.1. Gleichstrom

Infolge Ionentransportes und Elektrolysevorgängen werden unter der Kathode Ossifikationsvorgänge (Cieszynski, 1967 u. 1978; Klems, 1978) und unter der Anode Osteolysen beobachtet (Bauer, Kinzel u. Wolter, 1974).

2.2. Periodische nichtsinusförmige Ströme (Impulsströme)

2.2.1. Unipolarer Impulsstrom

Die Polarität ist nur in einer Richtung, positiv oder negativ, vorhanden. Die aus der Literatur vorliegenden Ergebnisse sind sehr verschieden hinsichtlich Frequenz, Elektrodenmaterial, Elektrodenanlagen bzw. Isolation (Weigert u. Werhahn, 1978). Nicht nur die methodischen Unterschiede, sondern auch die Zusammensetzung des Patientenkollektivs bzw. die unterschiedlichen Versuchstiere sind ursächlich. Trotz alledem werden positive Ergebnisse hinsichtlich Anregung der Knochenheilung mittels unipolarer Impulsströme beschrieben. Es ist anzunehmen, daß bei den unipolaren Impulsströmen die Ergebnisse durch die bestehenden Nebenwirkungen des Gleichanteils ungünstig beeinflusst werden.

2.2.2. Bipolare Impulsströme

Die Polarität wechselt von einer Stromrichtung in die andere. Ist beim bipolaren Impuls der Mittelwert gleich „Null“, so sind — anders als beim Gleichstrom — keine Elektrolyse- oder Gasbildungen an den Elektroden zu erwarten.

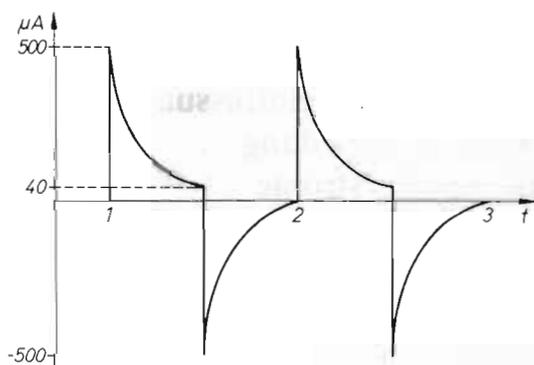


Abb. 3 Bipolarer Impulsstrom bei cv-Schaltung nach der Methode Jørgensen

¹ Berndt, Dipl.-Ing., Bezirkskrankenhaus Suhl

2.2.2.1. Bipolarer Impulsstrom mit einer konstanten Spannungsquelle

Jørgensen (1972 u. 1977) konnte bei frischen Tibiafrakturen, die mit einem äußeren Fixateur (Typ Hoffmann-Vidal) versorgt wurden, durch bipolare Impulse bei einer cv-Schaltung eine Verkürzung der Heilungszeit erzielen. Er stimulierte mit einer Frequenz von 1 Hz und erreichte Stromspitzen von $500 \mu\text{A}$ (Abb. 3).

2.2.2.2. Bipolare Rechteckimpulsfolgen mit Konstantstromquellen

Hellinger u. Kleditzsch (1980) arbeiten seit 1974 mit einem Stimulator von Hellinger u. Berndt erfolgreich am Patienten zur Anregung des Heilungsverlaufes bei Verlängerungsosteotomien bzw. Pseudarthrosen.

Die Ergebnisse und damit der effektive Wirkungsgrad einer Konstantspannungsquelle sind nicht mit einer Konstantstromquelle aufgrund der unbekanntenen Stimulationsenergie vergleichbar.

Der bipolare Rechteckimpuls (Abb. 4) erscheint in der Bildungsphase besonders wirkungsvoll, da er eine deutliche Mineralisation bewirkt.

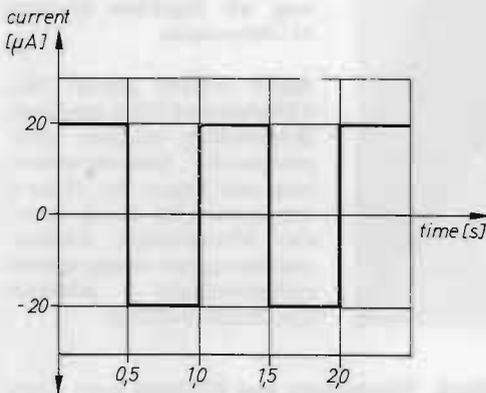


Abb. 4 Bipolare Rechteckimpulsfolgen nach Berndt u. Hellinger (1974)

Auch tritt unter dem Einfluß bipolarer Rechteckimpulsfolgen eine deutliche Längsausrichtung der Struktur ein, wie die Abbildung 5 im Vergleich zur Abbildung 6 ausweist.

Umfangreiche tierexperimentelle Untersuchungen rechtfertigen den Einsatz bipolarer Rechteckimpulsfolgen am Patienten. Anhand von 82 mit niederfrequenten (1 Hz u. 10 Hz) bipolaren Rechteckimpulsfolgen unter Dauerstimulation behandelten Kaninchenbastarden beiderlei Geschlechts konnte statistisch gesichert werden, daß diese Form der Elektrostimulation sich günstig auf die Anregung der Knochenneubildung auswirkt. Besonders eindrucksvoll waren dabei die Ergebnisse der 1 Hz-Stimulation. So konnte die Knochenheilung nach einer Osteotomie um nahezu eine Woche verkürzt werden. Die Mineralanalyse zeigte im Osteotomiegebiet eine signifikante Erhöhung des Hydroxylapatitgehaltes. Der Mineralgehalt der nichtstimulierten Tiere erhöht sich deutlich langsamer. Diese Ergebnisse konnten u. a. durch knochenszintigraphische Verlaufsuntersuchungen² nach Auswertung von Flächenimpulsdichten angefertigter ROI gesichert werden. Die gemessene Aktivität war im Osteotomiegebiet höher als bei Tieren ohne Elektrostimulation (Kleditzsch, 1980).

2.3. Interferenzstimulation

Im Mittelfrequenzbereich werden zwei Ströme etwa um

² Nuklearmedizinische Abteilung (Leiter: Prof. Dr. sc. med. Franke) der Medizinischen Akademie „Carl Gustav Carus“ Dresden

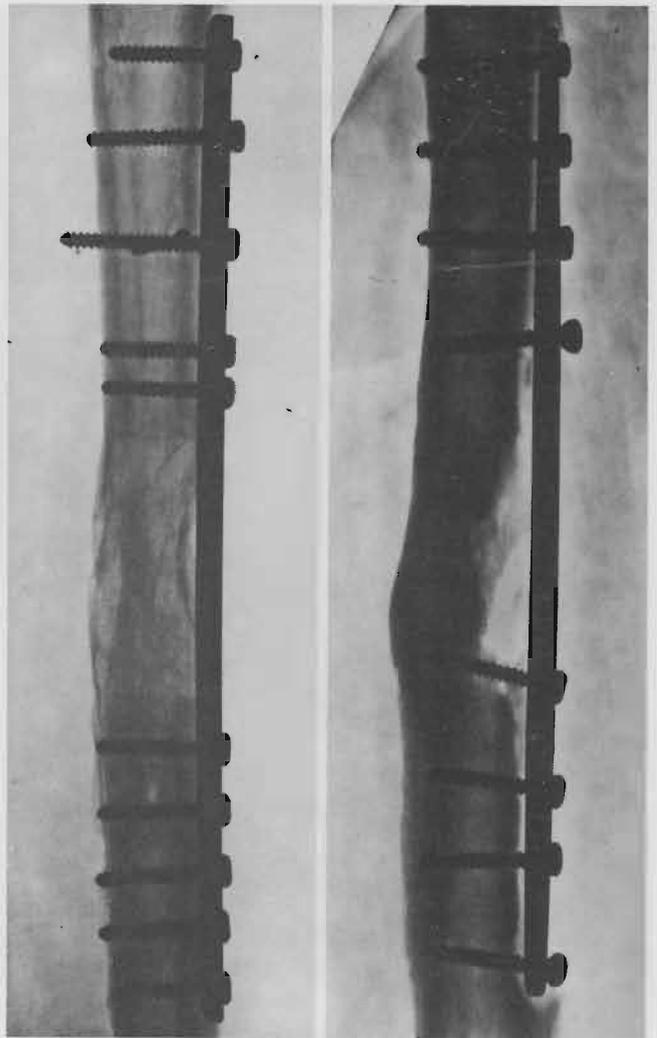


Abb. 5 (links) Pat. J.G., männl., 23 Jahre: 49. Woche nach Distraktionsverplattung und Femurverlängerung um 6,5 cm und autogener Spongiosaplastik bei 36 Wochen Elektrostimulation mit äußerer Kabelzuführung, knöcherne Konsolidierung, Knochenbildung bis fast an die Platte und gute Strukturausrichtung

Abb. 6 (rechts) Pat. Je. F., männl., 22 Jahre: 56. Woche nach Distraktionsverplattung, Femurverlängerung um 5 cm und autogene Spongiosaplastik, keine Elektrostimulation, Bild der „Stress-Protection“ unter der Platte mit Defektbildung

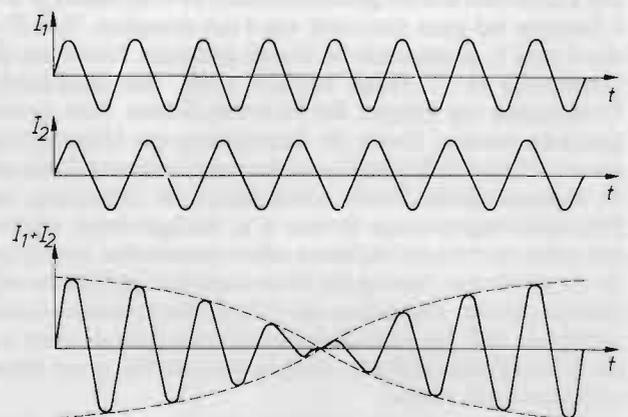


Abb. 7 Prinzip der Superposition zweier frequenzdifferenter Ströme

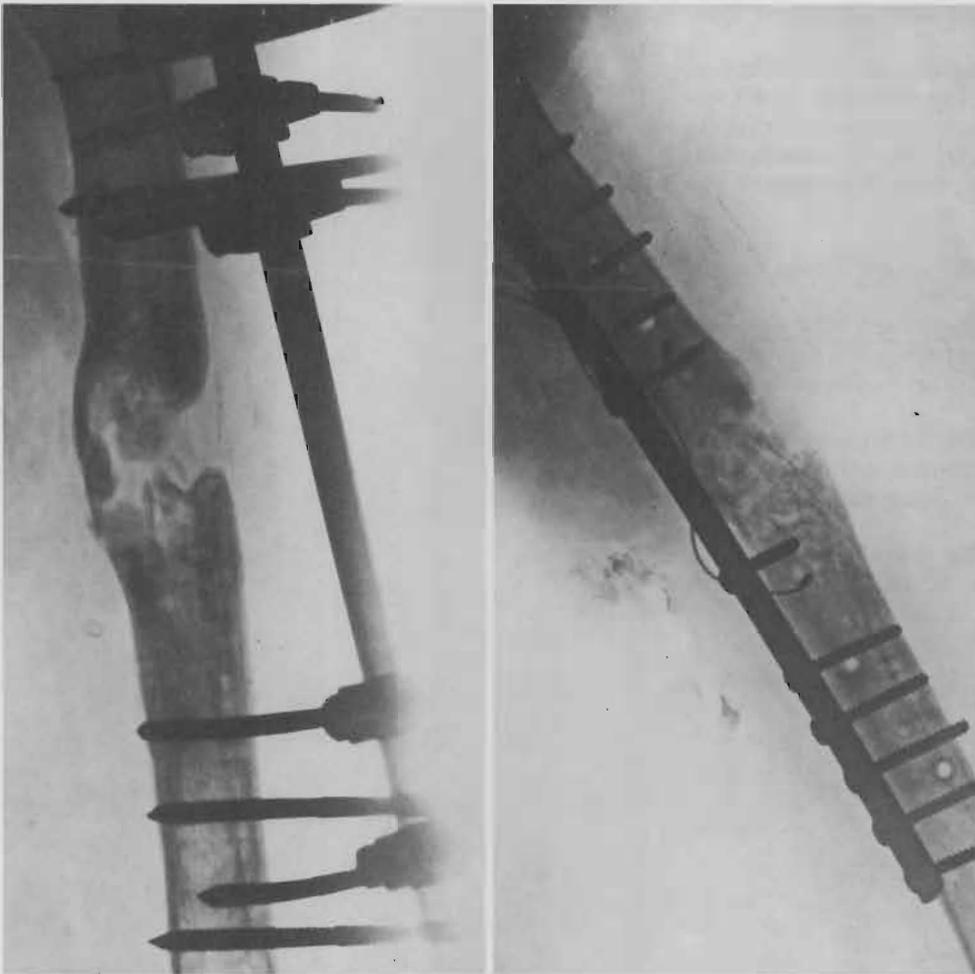


Abb. 8 (links) Pat. H.G., 27 Jahre, weibl.: blande infizierte Femurpseudarthrose links nach Pseudarthrosendistraktion um 4,5 cm und Sekundärverplattung mit liegendem externem AO-Rohrsystem

Abb. 9 (rechts) gleiche Pat., 6 Wochen nach KDA-Abnahme, Dekortikation, autogene Spongiosaplastik, Sekundärverplattung und Beginn der Elektrostimulation (JES 2) mit deutlicher Mineralisation, Struktur- ausrichtung und szintigraphisch nachgewiesenem erhöhtem Knochenstoffwechsel

4000 Hz im biologischen Objekt überlagert (Abb. 7). Es entsteht eine Interferenz. Dabei handelt es sich um reine Sinusströme ohne Gleichkomponente. Die Schwebung ist niederfrequent, wobei jedoch die Amplitude und die Schwebungstiefe vom Ort der Überlagerung abhängen (Güttler u. Kleditzsch, 1979; Kleditzsch, 1980). Durch gezielte Elektrodenanlage ist das Überlagerungsgebiet wählbar. Im Superpositionsbereich besteht durch die Überlagerungsfrequenz ein deutliches Reizpotential, und ohne wesentliche Energieverluste werden die Widerstände der peripheren Haut- und Gewebsschichten überwunden. Mit intraossärer Elektrodenanlage konnten überzeugende tierexperimentelle Ergebnisse gewonnen werden (Kleditzsch, 1980).

Die Kaninchen wurden gerätetechnisch bedingt täglich je Tier 4 Stunden bei einer Intensität von 1 mA stimuliert. Von 22 in der 4. und 5. postoperativen Woche getöteten Tieren war die Osteotomie in 17 Fällen klinisch stabil. Ein signifikanter Unterschied zur Gruppe der nichtstimulierten Tiere konnte gesichert werden. Durch die Bestimmung des Mineralgehaltes an definierten Meßstellen an der osteotomierten Tibia und an nichtoperierten Tieren sowie durch die Ermittlung von Polynomialregressionen konnte u. a. nachgewiesen werden, daß beim Interferenzverfahren schon unmittelbar postoperativ ein deutlicher Anstieg des Mineralgehaltes im Osteotomiebereich eintritt. Ergebnisse im 3-Punkt-Biegeversuch lassen vermuten, daß der Einfluß des Interferenzstromes nicht nur die Mineralbildungsphase, sondern auch die Phase der Strukturorganisation fördert.

Zahlreiche versenkbare Apparate zur Anregung des Knochenwachstums arbeiten auf Gleichstrombasis. Versenkbare Impulsgeber mit monophasischen Rechteckimpulsen ver-

wandten u. a. Black, Friedenberg und Brighton bzw. Levy (beide 1974).



Abb. 10 Gassterilisierbarer JES 2 zur Implantation

In unserer Klinik wird seit 1980 ein implantierbarer Elektrostimulator IES 2, der mit bipolaren Rechteckimpulsen arbeitet und erfolgreich tierexperimentell erprobt wurde, inzwischen mit ersten positiven klinischen Ergebnissen, wie die Abbildungen 8, 9 und 10 zeigen, angewandt (Hellinger, Kleditzsch, Güttler, 1981).

Резюме

Исходя из физиологических данных различают два метода электрической стимуляции для возбуждения процесса роста костей (изменение пьезоэлектрического эффекта и применение электрического поля для выправления образующихся костных фибрилл).

С технической точки зрения описываются различные методы стимуляции (метод применения магнитного поля, монополярный и биполярный импульсный ток, а также интерферентный метод). В работе описываются первые положительные клинические результаты при применении биполярного электростимулятора IES 2.

Summary

On the basis of physiology we may distinguish between two procedures of electric stimulation for enhancing bone growth. These are on the one hand the reversal of the piezo-electric effect and on the other hand straightening of the forming bone fibrils by means of an electro-magnetic field. Various methods of stimulation are described from a technical point of view, such as, the magnetic-field method, mono- and bipolar impulse currents, respectively and the method of interference. First positive clinical experience with IES 2, the bipolar insertable electric stimulator, are being discussed.

Literatur

1. Bauer, U., L. Kinzel und D. Wolter: Untersuchungen zur Knochenbruchheilung unter Einfluß von elektrischem Gleichstrom. *Z. Orthop.* 112 (1974), 402—407.
2. Bassett, C. A. L.: Current concepts of bone formation. *J. Bone & Jt. Surg.* 44 (1962), 1217—1244.
3. Black, J., Z. B. Friedenberg u. C. T. Brighton: Growth response of intact bone to direct current and pulsed current. *Proc. Conf. Eng. Med. Biol.* 16, 27 (1974), 250.
4. Blümlein, H., J. McDaniel, W. J. Ziegler u. S. M. Perren: Die Beeinflussung der Heilung von Pseudarthrosen durch niederfrequente Magnetfelder im Tierversuch. *Z. Orthop.* 116 (1978), 603—604.
5. Cieszynski, T.: Studies on the regeneration of osseal tissue. II. Treatment of bone fracture in experimental animals with electric energy. *Arch-Immunol. Exp. Ther.* 11 (1963), 199—215.
6. Cieszynski, T.: Electric factor in bone regeneration. Report on studies in vitro and in vivo. *Symp. Biol. Hung.* 7 (1967), 269—273.
7. Cieszynski, T.: Achievements and discrepancies in understanding bone electric phenomena. In: Burney, F., E. Herbst, M. Hiasenkamp (Hrsg.): *Electric stimulation of bone growth and repair.* Springer-Verlag, Berlin — Heidelberg — New York 1978, S. 25—27.
8. Detlavs, J. E.: Persönliche Mitteilung 1978.
9. Fukada, E., u. J. Yasuda: On the piezoelectric effect of bone. *J. Phys. Soc. Jap.* 12 (1957), 1158—1162.
10. Güttler, P., u. J. Kleditzsch: Die Anregung der Kallusbildung durch Interferenzströme. *Dt. Gesundh.-Wesen* 34 (1979), 91—94.
11. Hellinger, J., u. J. Kleditzsch: Electrical stimulation of the callus formation by means of bipolar rectangular pulse sequences. *Arch. Orthop. Traumat. Surg.* 96 (1980), 241—246.
12. Hellinger, J., J. Kleditzsch, P. Güttler u. A. Schieche: Implantierbarer Elektrostimulator zur Knochenbruchheilung — IES 2. Poster zum XIII. Kongreß der Gesellschaft für Chirurgie der

DDR, Berlin 23.—27. 3. 1981.

13. Jørgensen, T. E.: The effect of electrical current on the healing time of crural fractures. *Acta orthop. scand.* 43 (1972), 421—437.
14. Jørgensen, T. E.: Electrical stimulation of human fracture healing by means of a slow pulsating, asymmetrical direct current. *Clin. Orthop.* 124 (1977), 124—127.
15. Kleditzsch, J.: Die Knochenheilung im Tierexperiment unter Einfluß von bipolaren Rechteckimpulsfolgen und Interferenzstrom. *Med. Promotion B, Dresden* 1980.
16. Klems, H.: Anregung des Längenwachstums von Röhrenknochen durch elektrischen Gleichstrom. Untersuchungen an der Kaninchen Tibia. *Z. Orthop.* 116 (1978), 602—603.
17. Kraus, W.: Theorie und tierexperimentelle Ergebnisse der elektrodynamischen Knochenbruchheilung. *Nova Acta Leopoldina, Neue Folge* 44, 223 (1976), 119—126.
18. Lechner, F.: Die Behandlung der Knochenheilungsstörungen mit elektromagnetischen Potentialen. *Monatsschr. Unfallheilkd.* 77 (1974), 245—251.
19. Levy, D. D.: A pulsed stimulated electrical technique for inducing bone growth. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 238 (1974), 478—490.
20. Stürmer, K. M., H. Kehr u. K. P. Schmitt-Neuerburg: Fördern interferentes Magnetfeld und Wechselspannung die Knochenheilung? Experimentelle Untersuchungen zur Frage der Wirksamkeit. *Zbl. Chirurgie* 104 (1979), 777—790.
21. Weigert, M., u. C. Werhahn: Grundlagen und Methoden der elektrischen Stimulation der Knochenbildung am Menschen. *Zbl. Chirurgie* 103 (1978), 1495—1498.
22. Wolff, J.: Das Gesetz der Transformation der inneren Architektur der Knochen bei pathologischen Veränderungen der äußeren Knochenform. *Sitzungsbericht Königl.-Preuß. Akad. Wissenschaften, Berlin, physik.-math. Classe* 1884, S. 475—496.

Manuskriptannahme: 14. September 1981

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. sc. med. J. Hellinger, Orthopädische Klinik der Medizinischen Akademie „Carl Gustav Carus“ Dresden, DDR - 8019 Dresden, Fetscherstraße 74