Elektromagnetische Verfahren bei Knochenheilungsstörungen

Evidenz dieser additiven Maßnahme

Der Zusammenhang von elektrischen Potenzialen zur Unterstützung der Knochenheilung wurde erstmalig im 19. Jahrhundert beschrieben [34, 44]. Dieser Effekt ist jedoch erst wiederentdeckt worden mit der Entdeckung der piezoelektrischen Eigenschaften von Knochen sowie Kollagen [66, 75] und den bioelektrischen Eigenschaften von vitalem Knochen [5]. Das Wolff-Gesetz des deutschen Anatoms und Chirurgen Julius Wolff (1835–1902) beschreibt die Eigenschaft von Knochen, sich unter Druckbelastung auf- und unter Zugbelastung abzubauen. Die Übertragung von mechanischen Reizen in elektrische Impulse auf zellulärer Ebene wird als elektromechanische Kopplung bezeichnet und ist der Schlüssel zur Umbaufähigkeit des Knochens z. B. nach Verletzungen [7, 67]. An diesem Punkt setzten die verschiedenen Techniken der Elektrostimulation zur Unterstützung der Knochenheilung an.

In der klinischen Anwendung finden sich 3 verschiedene Techniken der Elektrostimulation:

Direkte Stromapplikation mit implantierbaren Elektroden und meist subkutan implantierbarer Stromquelle. Sie wird auch als DC-Verfahren (DC: „direct current“) bezeichnet. Sie findet v. a. bei Spondylodeseoperationen der Wirbelsäule Anwendung. Eine Knochenneubildung ist bei Gleichstromgeräten lediglich an der Kathode (Pluspol) zu beobachten.

Perkutane Elektrostimulation mittels Klebeelektroden und externem Steuerungsgerät. Sie wird auch als CC-Verfahren (CC: „capacitive coupling“) bezeichnet. Die perkutane Stromzuleitung hat den Nachteil der begrenzten Eindringtiefe und möglichen lokalen Reaktion.

Induktive Verfahren (IC-Verfahren, IC: „inductive coupling“). Hier haben sich v. a. die pulsierenden elektromagnetischen Felder (PEMF) etabliert. Bei ihnen werden Magnetfelder über externe Magnetfeldspulen appliziert, die in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude des Signals elektromagnetische Felder induzieren.

Die zuletzt genannten elektromagnetischen Verfahren werden im Folgenden genauer betrachtet.

Experimentelle Daten

Mittels nichtthermischen niederfrequenten Magnetfeldern über das Transformatorprinzip wurden erstmals 1968 Struktur bildende Wechselfelder am Knochen induziert und in der Folge systematisch untersucht. Eine Vielzahl älterer experimenteller Untersuchungen wurde von Bassett [6] zusammengefasst und eine andere Übersichtsarbeit der Wirkmechanismen von Aaron et al. [1] veröffentlicht. Es wurden In-vitro-Auswirkungen auf die Proteoglykansynthese beschrieben, den Kalziumstoffwechsel, die Kollagensynthese und die zellulären Signalwege. In neueren Arbeiten wurden diese Mechanismen im Hinblick auf die Zelldifferenzie-

rung von Osteoblasten weiter untersucht und bestätigt [64, 74, 76]. Der Einfluss von PEMF auf die Genexpression von *c-fos* und *c-myc* in Osteoblasten konnte nachgewiesen werden [18], ebenso die Eigenschaft von PEMF, die Zellaktivität von Osteoblasten zu erhöhen und die Synthese von extrazellulärer Matrix zu stimulieren [49]. Ähnliche Effekte wurden für Chondrozyten beschrieben [16]. Bei Osteoklasten konnten dagegen eine Beschleunigung der Apoptoserate nachgewiesen werden [15] sowie die Modulation von Zytokinen in der Entwicklung von Osteoklasten [14]. In einer Untersuchung von Li et al. [47] wurde der Effekt von Ultraschall und PEMF verglichen, und es wurde gezeigt, dass beide Verfahren den intrazellulären Kalziumgehalt erhöhen und den intrazellulären Botenstoff Calmodulin aktivieren. An einem In-vitro-Modell mit Zellen aus humanen Pseudarthrosen konnte eine Stimulation der parakrinen Faktoren für Knochenwachstum mit PEMF-Behandlung aufgezeigt werden [32].

In älteren tierexperimentellen Studien wurden die Grundlage gebildet und der Effekt von PEMF nachgewiesen [10, 29, 33, 42]. In neueren In-vivo-Studien konnte die Wirkung von PEMF auf eine Beschleunigung der Frakturheilung nachgewiesen werden, so z. B. bei Fibulaosteotomie der Ratte [38, 56] oder am Modell der Kallusdistraction beim Hasen [25, 26] und Kaninchen [39].

Tab. 1 Klinischen Studien zur Unterstützung der Knochenheilung nach Frakturen und Osteotomien durch elektromagnetische Verfahren							
Zitat	Jahr	Indikation	Zusätzliche Therapie	PEMF-Parameter	Behandlungsparameter	Therapie-/Kontrollgruppe (n)	EBM-Level
Borsalino et al. [11]	1988	Intertrochantäre Osteotomie	Keine	75 Hz 2,5 mV 1,8 mT (Fa. IGEA)	8 h/Tag 90 Tage	16/16 0,8 vs. 0,31 Punkte Kallus Tag 40 1,9 vs. 1,4 Punkte Kallus Tag 90	I
Capanna et al. [13]	1994	Autologe Knochen- transplantation	Osteosynthese Platten, im Nagel	75 Hz 3,0 mV (Fa. IGEA)	4 h/Tag –360 Tage	24/23 54 vs. 56% Konsolidierung 8,5 vs. 9,4 Monate	I
Eyres et al. [22]	1996	Kallusdistraktion	Keine	15 Hz 1,6 mT (Fa. ElectroBiology)	4 h/Tag	7/6 13 vs. 54% Abnahme der Knochendichte	(I) IV
Fontanesi et al. [24]	1986	Frakturheilung Tibia	Gips	75 Hz 2,5 mV 2 mT (Fa. IGEA, Howmedica)	8–10 h/Tag 70–210 Tage	20/20 Konsolidierung	III
Gonzales et al. [30]	2005	Kallusdistraktion	Keine	75 Hz 3,5 mV (Fa. IGEA)	8 h/Tag ??	30 Extremitätenpaare Therapie>Kontrolle Knochendichte Kallus	III
Mammi et al. [51]	1993	Tibiaosteotomie	Keine	75 Hz 3 mV (Fa. IGEA)	8 h/Tag 60 Tage	20/20 Therapie >Kontrolle Konsolidierung	I
Dhawan et al. [19]	2004	Arthrodesen talonavikular (tn), subtalar (st) und kalkaneokuboid (cc)	Keine	?? (Fa. ElectroBiology)	12 h/Tag ~ 91 Tage	st 33+4/22+5 12,9 vs. 14,5 Wochen Konsolidierung tn 19/23 12,2 vs. 17,6 Wochen Konsolidierung cc 21/19 13,1 vs. 17,7 Wochen Konsolidierung	(I) III?
Saltzman et al. [61]	2004	Fuß- und Sprung- gelenkarthrodesen	Keine	? (Fa. ElectroBiology)	? 150–810 Tage	19/keine 26% Durchbau	IV

Unterstützung der Knochenheilung bei Frakturen, Operationen mit Kallusdistraktion, Arthrodesen, Osteotomien und autologer Knochen-
transplantation

Klinische Studien

Die PEMF sind seit 1979 von der amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) als additives Verfahren zur Unterstützung der Knochenheilung bei Pseudarthrosen und Arthrodesen zugelassen. Seit 1970 kommen in Deutschland elektromagnetische Verfahren in der Therapie von Pseudarthrosen und verzögerten Knochenheilung zur klinischen Anwendung [43, 45]. Seither wurden eine Vielzahl von klinischen Studien publiziert, die eine Therapie mit PEMF propagieren, jedoch sind diese, gemessen an den heutigen Standards der evidenzbasierten Medizin, z. T. von sehr unterschiedlicher Qualität (<http://www.cebm.net>). Im Folgenden werden die klinischen Studien nach ihren Anwendungsgebieten der PEMF-Therapie zur Unterstützung der Knochenheilung, Behandlung von Pseu-

darthrosen oder Verbesserung operativer Ergebnisse nach Knocheneingriffen aufgeteilt. Es werden nur Publikationen berücksichtigt, die in „peer reviewed“-Zeitschriften veröffentlicht wurden, und nur die Sprachen Englisch, Deutsch und Französisch. Veröffentlichungen im Rahmen von Kongressen, Buchveröffentlichungen usw. wurden nicht mit einbezogen.

Die knöcherne Heilung nach Frakturen und Osteotomien stellt nur in einem geringen Prozentsatz der Patienten ein Problem dar. Die große Zahl der Patienten macht hieraus aber einen relevanten Faktor. Es gibt 2 ältere Studien mit zufrieden stellenden Designs von Borsalino et al. [11] und Mammi et al. [51], in denen die Frakturheilung nach Osteotomien an der unteren Extremität untersucht wurde (■ Tab. 1). Die PEMF-Therapie wurde auch zur Unterstützung der knöchernen Heilung nach Versteifungsoperati-

on angewendet. Die Arbeit von Dhawan et al. [19] wurde zwar als Level I eingestuft [41], es wurden jedoch nicht die Patienten (n=64), sondern die einzelnen Gelenke (n=144) als Fall gezählt und somit bei einem Patienten mehrere Gelenke in die Auswertung einbezogen. Damit können mehrere Ergebnisse abhängig von einem Patienten sein, und das Studiendesign entspricht somit nicht den Anforderungen einer Level-I-Studie.

In der Behandlung von verzögerten Knochenbrüchen und Pseudarthrosen gibt es eine Vielzahl von klinischen Studien (■ Tab. 2). Als Level I werden 2 davon gehandelt. Vom Studiendesign und der Anzahl der Patienten ist die Studie von Sharrard [68] mit Vorbehalt als Level-I-Studie zu werten, da nicht klar hervor-
geht, wie die Anzahl der Gruppen errechnet wurde und ob die Patienten randomisiert wurden. Der Studie von Barker et al.

[4] ermangelt es ebenfalls an dem klaren Studiendesign, und sie muss daher – bei einer Gesamtzahl von 9 behandelten Patienten – eher als Level-IV-Studie angesehen werden.

Ein weiteres Feld der PEMF-Verfahren ist die Unterstützung der knöchernen Konsolidierung nach Fusionsoperationen an der Wirbelsäule (■ Tab. 3). 2 Übersichtsarbeiten beschäftigten sich jeweils mit dieser Applikation [3, 28] und versuchten aus der gesamten Bandbreite der elektrischen Stimulationsmöglichkeiten Schlüsse über die Effizienz dieser additiven Therapieformen zu ziehen. Es finden sich jedoch 2 Studien zur PEMF-Therapie nach Spondylodeseoperationen mit Studiendesign, die dem EBM-Level I entsprechen und von den Patientenzahlen ausreichend erscheinen. In der Arbeit von Linovitz et al. [48] wurde eine Erfolgsrate der knöchernen Konsolidierung von 64% vs. 43% berichtet, Mooney [57] beschrieb eine Erfolgsrate von 92% vs. 65% gegenüber der Kontrollgruppe.

Angrenzende Gebiete zur Unterstützung der Knochenneubildung sind die aseptische Hüftkopfnekrose oder aseptische Prothesenlockerung. Massari et al. [54] untersuchten die Wirkung von PEMF auf die Hüftkopfnekrose, und in dieser Level-IV-Studie wurde ein positiver Effekt von PEMF in den Stadien Ficat I und II beschrieben. In einer Level-IV-Studie konnten Kennedy et al. [40] mit PEMF-Therapie eine Revision einer gelockerten Hüftprothese in 53% der Fälle (n=19) hinauszögern im Vergleich zur Placebokontrolle mit 11% der Fälle (n=18).

Diskussion

Mit 3 Veröffentlichungen wurde in den letzten Jahren versucht, die elektrische und elektromagnetische Stimulation in Form von Metaanalysen zusammenzufassen, um eine Aussage über die Wirksamkeit treffen zu können [2, 3, 31]. Damit wurden die eingangs erwähnten Techniken der Stimulation (DC, CC, IC) als gleichwertig angesehen. Eine Zusammenfassung in dieser Art ist sicherlich kritisch zu sehen, obwohl diese Arbeiten eine gute Übersicht über die klinischen Studien geben. Abgesehen von der Vergleichbarkeit der oben genannten Verfahren (DC, CC,

Trauma Berufskrankh 2008 · 10[Suppl 2]:219–225 DOI 10.1007/s10039-007-1321-5
© Springer Medizin Verlag 2008

S. Hungerer · P. Augat · V. Bühren

Elektromagnetische Verfahren bei Knochenheilungsstörungen. Evidenz dieser additiven Maßnahme

Zusammenfassung

Elektromagnetisch induzierte Wechselfelder („pulsed electromagnetic fields“, PEMF) finden als adjuvantes Verfahren zur Stimulation der Knochenheilung bereits seit Jahrzehnten Anwendung. In einer Vielzahl von experimentellen Studien konnten eine Reihe möglicher Wirkmechanismen aufgezeigt werden. Im klinischen Alltag fanden PEMF Anwendung in der Unterstützung der Knochenbruchheilung, bei Osteotomien, Kallusdistraktionen, Spondylodesenoperationen, Arthrodesen oder der Therapie von verzögerter Knochenbruchheilung bzw. Pseudarthrosen langer Röhrenknochen. Die Vorteile der PEMF-Therapie bestehen im Fehlen von Nebenwirkungen sowie der Möglichkeit, diese nichtinvasive Technik als zusätzliches Verfahren ein-

zusetzen, um bei Problempatienten die Heilungschancen zu erhöhen. Wie alle klinischen Therapieverfahren müssen sich auch die elektromagnetischen Verfahren an den Kriterien evidenzbasierter Medizin messen lassen. Im folgenden Artikel werden die „peer reviewed“-Publikationen zur Knochenheilung und PEMF-Therapie der letzten Jahre aufgelistet und entsprechend den Kriterien der evidenzbasierten Medizin eingestuft und bewertet.

Schlüsselwörter

Stimulation der Knochenheilung · Elektromagnetische Stimulation · PEMF („pulsed electromagnetic fields“) · Elektrostimulation · Evidenzbasierte Medizin

Electromagnetic procedure for impaired bone healing. Evidence relating to this additive method

Abstract

Pulsed electromagnetic fields (PEMFs) have been used for decades to stimulate bone healing. Numerous experimental studies have highlighted a variety of possible mechanisms of effect. In daily clinical routine, PEMFs have been used to accelerate bone healing after fractures, after osteotomies, for callus distraction, and after arthrodesis and spondylodesis operations. PEMFs have also been used as an alternative to revision surgery in the treatment of delayed union and pseudarthrosis of long bones. The advantages of PEMFs are the almost complete lack of any known adverse effects and the option of applying this noninvasive therapy to promote

the osseous consolidation in problem cases. Nevertheless, these therapeutic electromagnetic field procedures need to prove their efficacy when measured against evidence-based criteria. In the present paper, the peer-reviewed articles on bone healing and the efficacy of PEMFs are summarized and then classified and evaluated in terms of level of evidence.

Keywords

Stimulation of bone healing · Electromagnetic stimulation · PEMF (pulsed electromagnetic fields) · Electrical stimulation · Evidence-based medicine

Tab. 2 Klinische Studien zu elektromagnetischen Verfahren in der Therapie von verzögerter Knochenheilung und Pseudarthrosen							
Zitat	Jahr	Indikation	Zusätzliche Therapie	PEMF-Parameter	Behandlungsparameter	Therapie-/Kontrollgruppe (n) Ergebnis Therapie vs. Kontrolle [%]	EBM-Level
Barker et al. [4]	1984	Pseudarthrosen	Gips	15 Hz 1,5 mT (NN)	12–16 h (Minimum 1 h) 168 Tage	9/7 55% vs. 71% Konsolidierung	(I)IV
Bassett et al. [8]	1981	Pseudarthrosen	Gips	15 Hz 0,2 mT (Fa. ElectroBiology)	10 h/Tag ~ 150 Tage	125/keine 87% Konsolidierung	IV
Bassett et al. [9]	1982	Pseudarthrosen	Spongiosa	15 Hz 0,2 mT (Fa. ElectroBiology)	10 h/Tag ~ 120 Tage	83/keine 87% Konsolidierung	IV
De Haas et al. [17]	1980	Pseudarthrose	Keine	1 Hz 15–30 mT	20 h/Tag 28–56 Tage	17/23 83 vs. 88% Konsolidierung	III
Dunn u. Rush [21]	1984	Pseudarthrosen- osteotomie	Spongiosa	? (NN)	10 h/Tag 60–360 Tage	35/keine 81% Konsolidierung	IV
Fontanesi et al. [23]	1983	Delayed union Pseudarthrosen	Gips Fixateur externe Platte	75 Hz (Fa. Biostim)	12 h/Tag 60–180 Tage	35/keine 88,5% Konsolidierung	IV
Freedman [27]	1985	Delayed union	Gips	75 Hz (Fa. ElectroBiology)	12 h/Tag 60–300 Tage	12/keine 17% Konsolidierung (n=2)	IV
Heckman et al. [35]	1981	Pseudarthrose	Spongiosa Gips	15 Hz (Fa. ElectroBiology)	12 h/Tag 90–120 Tage	149/keine 64% Konsolidierung	IV
Hinsenkamp et al. [36]	1985	Pseudarthrosen	Keine	15 Hz (Fa. ElectroBiology)	12 h/Tag ?	267 (308)/keine 72% Konsolidierung	IV
Holmes [37]	1994	Pseudarthrose Delayed union	Gips	15 Hz 0–2 mT (NN)	8–10 h/Tag	9/keine 100% Konsolidierung	IV
Lechner [46]	1981	Pseudarthrose	Spongiosa Invasiver Überträger	22–30 Hz 3–5 mT	3 h/Tag 42–?? Tage	319/keine 93,6% Konsolidierung	IV
Lynch u. Mac Auley [50]	1985	Pseudarthrosen	Gips	1,0–1,5 mV	10 h/Tag 56–252 Tage	26/keine 88,5% Konsolidierung	IV
Marcet et al. [52]	1984	Pseudarthrosen	Fixateur externe	15 Hz 15 mV (Fa. ElectroBiology)	10 h/Tag	147/keine 73% Konsolidierung	IV
O'Connor [58]	1985	Pseudarthrosen	Gips 5 Patienten mit Operation	15 Hz 1,0–1,5 mV (Fa. ElectroBiology)	12 h/Tag	30/keine 88% Konsolidierung	IV
Schmidt-Neuerburg [63]	2001	Pseudarthrosen	Spongiosaplastik	20 Hz 700 mV 3–5 mT (Fa. GEOT)	2,25–3 h/Tag 180 Tage	61/keine 95% Konsolidierung	IV
Sedel et al. [65]	1982	Pseudarthrosen, z. T. kongenital	?	? (Fa. ElectroBiology)	30–180 Tage	37/keine 84% Konsolidierung	IV
Sharrard et al. [69]	1982	Pseudarthrosen	Gips	15 Hz 1,5 mV (NN)	12–16 h/Tag 90–?? Tage	53/keine 72% Konsolidierung	IV
Sharrard [68]	1990	Pseudarthrosen	Gips	15 Hz (NN)	12 h/Tag ~ 84 Tage	20/25 40 vs. 14% Konsolidierung	(I)
Simonis et al. [72]	1984	Pseudarthrosen	Fixateur externe	23 Hz 1,4 mT (St. Thomas Hosp.)	12–16 h/Tag 90–240 Tage	15/keine 87% Konsolidierung	IV
Simonis et al. [73]	2003	Pseudarthrosen	Fixateur externe	23 Hz 1,4 mT (NN)	>14 h/Tag 180 Tage	18/16 89 vs. 50% Konsolidierung	I

Tab. 3 Klinische Studien zu elektromagnetischen Verfahren und der Unterstützung der knöchernen Konsolidierung bei Spondylodesoperationen an der Wirbelsäule

Zitat	Jahr	Indikation	Zusätzliche Therapie	PEMF-Parameter	Behandlungsparameter	Therapie-/Kontrollgruppe (n)	EBM-Level
Bose [12]	2001	Spondylodese lumbal PLIF	Korsett	? (Fa. Orthofix)	4 h/Tag ?	48/keine 98% Fusion	IV
Di Silvestre u. Savini [20]	1992	Spondylodese lumbosakral	Gipskorsett	75 Hz 3,5 mV (Fa. IGEA)	10–12 h/Tag 55 Tage	31/keine 96% Fusion	IV
Linovitz et al. [48]	2002	Spondylodese lumbal PLIF	Keine	77 Hz 0,02–0,04 mT (Fa. Orthologic)	0,5 h/Tag 270 Tage	104/97 64 vs. 43% Fusion	I
Marks [53]	2000	Spondylodese lumbal	Korsett	? (Fa. Orthofix)	4 h/Tag ?	42/19 98% vs. 53% Fusion	(III) IV
Mooney [57]	1990	Spondylodese lumbal	Korsett	1,5 Hz 0,18 mT (NN)	8 h/Tag ?	98/95 92 vs. 65% Fusion	I
Savini et al. [62]	1990	Spondylodese lumbal	Gipskorsett	75 Hz 2,5 mV (Fa. IGEA)	10 h/Tag 60 Tage	15/keine 93% Fusion	IV
Simmons et al. [71]	2004	Pseudarthrose nach lumbaler Fusion	Keine	16–585 μ T (Fa. Orthofix)	2 h/Tag 90 Tage	100/keine 67% Fusion	IV
Simmons [70]	1985	Spondylodese lumbal PLIF	Keine	2 Hz 0,4 mT (Fa. ElectroBiology)	8–10 h/Tag	13/keine 77% Fusion	IV

IC) leiden bereits die PEMF-Studien für sich unter der Vielzahl der verschiedenen Stimulationsparameter und unterschiedlichen Behandlungszeiten. Vielen der angegebenen Literaturstellen ermangelt es an der exakten Angabe von Stimulationsparametern, und es ist oft nicht nachvollziehbar, welche Flussdichten, Frequenzen und Amplituden verwendet wurden. In **Tab. 4** sind beispielhaft Stimulationsgeräte aufgelistet, die zurzeit auf dem Markt erhältlich sind, mit den begleitenden technischen Parametern. Aus diesen geht hervor, dass sich diese um mehrere Zehnerpotenzen unterscheiden, so sind z. B. bei den Frequenzen Unterschiede um den Faktor 10^6 möglich, die Magnetfelddichten unterscheiden sich um den Faktor von 10^5 . 3 Arbeiten beschäftigten sich speziell mit dem Einfluss der Feldgrößen auf die Wirksamkeit von elektromagnetischen Verfahren und beschrieben v. a. die niederfrequenten kontinuierlich sinusförmigen Signale im Frequenzbereich von unter 120 Hz als wirksam mit einem Maximum bei 15–30 Hz [55, 59, 60].

Entsprechend den Anwendungsgebieten sind einige Studien mit einem EBM-Level I vorhanden und zahlreiche weitere Studien mit niedrigeren EBM-Leveln. Obwohl die Literatur zahlreich ist

Tab. 4 Technische Charakteristika verschiedener Magnetfeldgeräte auf dem deutschen Markt

Hersteller	Frequenzbereich [Hz]	Stromstärke [A]	Maximale Magnetfelddichte [mT]
1	1–60	0–17	0,001–0,02
2	1–25		3–5
3			0,5–5
4	0,5–300	0,001–1,2	4,5
5	0,1–40	0–3,5	0,001–10
6	0,5–20		2–20
7	0,001–38.000		15
8	1–10.000	0,00006–0,455	Bis 0,15
9	0,2–20	3–5	0,005–0,035
10	2–20	3–5	0–10
11	1–1000		100–180

Quelle ist eine Umfrage zu einem Gutachten von Prof. Gabriel zur magnetisch induzierten Elektrostimulation, Landessozialgericht NRW, Az L5KR 245/00

und sich mit anderen additiven Therapiekonzepten messen kann, wie der Stoßwelle, Ultraschall oder Bone-Matrix-Proteinen, überrascht es dennoch nicht, dass den elektromagnetischen Therapieformen der Durchbruch verwehrt blieb. Dem klinischen Anwender wird durch die Vielzahl der angebotenen Geräte mit ganz unterschiedlichen Parametern die Wahl des optimalen Geräts fast unmöglich gemacht.

Fazit

Es ist eine „Evidenz“ vorhanden, um die elektromagnetischen Verfahren in der Therapie von verzögerten Bruchheilung und Pseudarthrosen einzusetzen oder zur Unterstützung der Knochenheilung bei Arthrodesen des Fußes. Da kaum Nebenwirkungen bekannt sind, lassen sich diese Verfahren bei einem Compliance-fähigen Patienten gut anwenden. Es wird jedoch immer eine Einzelfallentscheidung von Arzt und Patient bleiben,

welcher Weg am besten einzuschlagen ist. Wünschenswert wäre die Behandlung dieser Patienten in entsprechenden kontrollierten klinischen Studien. Optimal wären placebokontrollierte EBM-Level-I-Studien, jedoch sind auch vergleichende Studien gegenüber anderen Therapieformen, wie Ultraschall, Stoßwelle oder Bone-Matrix-Protein denkbar. Falls sich die elektromagnetische Therapie in entsprechenden Kosten-Nutzen-Analysen (z. B. QUALY-Scores) als effizient behaupten würde, wäre die Entscheidung für den behandelnden Arzt wesentlich leichter, die elektromagnetischen Verfahren als additives Verfahren der Knochenheilung einzusetzen und gegenüber dem Kostenträger zu vertreten.

Korrespondenzadresse

Dr. S. Hungerer

BG-Unfallklinik Murnau,
Prof. Küntschers-Straße 8, 82418 Murnau
shungerer@bgu-murnau.de

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- Aaron RK, Boyan BD, Ciombor DM et al. (2004) Stimulation of growth factor synthesis by electric and electromagnetic fields. *Clin Orthop Relat Res* 419: 30–37
- Akai M, Hayashi K (2002) Effect of electrical stimulation on musculoskeletal systems; a meta-analysis of controlled clinical trials. *Bioelectromagnetics* 23: 132–143
- Akai M, Kawashima N, Kimura T et al. (2002) Electrical stimulation as an adjunct to spinal fusion: a meta-analysis of controlled clinical trials. *Bioelectromagnetics* 23: 496–504
- Barker AT, Dixon RA, Sharrard WJ et al. (1984) Pulsed magnetic field therapy for tibial non-union. Interim results of a double-blind trial. *Lancet* 1: 994–996
- Bassett CA (1968) Biologic significance of piezoelectricity. *Calcif Tissue Res* 1: 252–272
- Bassett CA (1984) [Biomedical and biophysical effects of pulsating electromagnetic fields.] *Orthopade* 13: 64–77
- Bassett CA, Becker RO (1962) Generation of electric potentials by bone in response to mechanical stress. *Science* 137: 1063–1064
- Bassett CA, Mitchell SN, Gaston SR (1981) Treatment of ununited tibial diaphyseal fractures with pulsing electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg Am* 63: 511–523
- Bassett CA, Mitchell SN, Schink MM (1982) Treatment of therapeutically resistant non-unions with bone grafts and pulsing electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg Am* 64: 1214–1220
- Bassett CA, Valdes MG, Hernandez E (1982) Modification of fracture repair with selected pulsing electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg Am* 64: 888–895
- Borsalino G, Bagnacani M, Bettati E et al. (1988) Electrical stimulation of human femoral intertrochanteric osteotomies. Double-blind study. *Clin Orthop Relat Res* 237: 256–263
- Bose B (2001) Outcomes after posterolateral lumbar fusion with instrumentation in patients treated with adjunctive pulsed electromagnetic field stimulation. *Adv Ther* 18: 12–20
- Capanna R, Donati D, Masetti C et al. (1994) Effect of electromagnetic fields on patients undergoing massive bone graft following bone tumor resection. A double blind study. *Clin Orthop Relat Res* 306: 213–221
- Chang K, Chang WH, Huang S et al. (2005) Pulsed electromagnetic fields stimulation affects osteoclast formation by modulation of osteoprotegerin, RANK ligand and macrophage colony-stimulating factor. *J Orthop Res* 23: 1308–1314
- Chang K, Chang WH, Tsai MT et al. (2006) Pulsed electromagnetic fields accelerate apoptotic rate in osteoclasts. *Connect Tissue Res* 47: 222–228
- Ciombor DM, Lester G, Aaron RK et al. (2002) Low frequency EMF regulates chondrocyte differentiation and expression of matrix proteins. *J Orthop Res* 20: 40–50
- De Haas WG, Watson J, Morrison DM (1980) Non-invasive treatment of ununited fractures of the tibia using electrical stimulation. *J Bone Joint Surg Br* 62-B: 465–470
- De Mattei M, Gagliano N, Moscheni C et al. (2005) Changes in polyamines, c-myc and c-fos gene expression in osteoblast-like cells exposed to pulsed electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 26: 207–214
- Dhawan SK, Conti SF, Towers J et al. (2004) The effect of pulsed electromagnetic fields on hindfoot arthrodesis: a prospective study. *J Foot Ankle Surg* 43: 93–96
- Di Silvestre M, Savini R (1992) Pulsing electromagnetic fields (PEMFs) in spinal fusion: preliminary clinical results. *Chir Organi Mov* 77: 289–294
- Dunn AW, Rush GA III (1984) Electrical stimulation in treatment of delayed union and nonunion of fractures and osteotomies. *South Med J* 77: 1530–1534
- Eyres KS, Saleh M, Kanis JA (1996) Effect of pulsed electromagnetic fields on bone formation and bone loss during limb lengthening. *Bone* 18: 505–509
- Fontanesi G, Giancetti F, Rotini R et al. (1983) Treatment of delayed union and pseudarthrosis by low frequency pulsing electromagnetic stimulation. Study of 35 cases. *Ital J Orthop Traumatol* 9: 305–318
- Fontanesi G, Traina GC, Giancetti F et al. (1986) Slow healing fractures: can they be prevented? (Results of electrical stimulation in fibular osteotomies in rats and in diaphyseal fractures of the tibia in humans). *Ital J Orthop Traumatol* 12: 371–385
- Fredericks DC, Nepola JV, Baker JT et al. (2000) Effects of pulsed electromagnetic fields on bone healing in a rabbit tibial osteotomy model. *J Orthop Trauma* 14: 93–100
- Fredericks DC, Piehl DJ, Baker JT et al. (2003) Effects of pulsed electromagnetic field stimulation on distraction osteogenesis in the rabbit tibial leg lengthening model. *J Pediatr Orthop* 23: 478–483
- Freedman LS (1985) Pulsating electromagnetic fields in the treatment of delayed and non-union of fractures: results from a district general hospital. *Injury* 16: 315–317
- Gan JC, Glazer PA (2006) Electrical stimulation therapies for spinal fusions: current concepts. *Eur Spine J* 15: 1301–1311
- Glazer PA, Heilmann MR, Lotz JC et al. (1997) Use of electromagnetic fields in a spinal fusion. A rabbit model. *Spine* 22: 2351–2356
- Gonzales FL, Arevalo RL, Coretti SM et al. (2005) Pulsed electromagnetic stimulation of regenerate bone in lengthening procedures. *Acta Orthop Belg* 71: 571–576
- Gossling HR, Bernstein RA, Abbott J (1992) Treatment of ununited tibial fractures: a comparison of surgery and pulsed electromagnetic fields (PEMF). *Orthopedics* 15: 711–719
- Guerkov HH, Lohmann CH, Liu Y et al. (2001) Pulsed electromagnetic fields increase growth factor release by nonunion cells. *Clin Orthop Relat Res* 384: 265–279
- Guizzardi S, Di SM, Govoni P et al. (1994) Pulsed electromagnetic field stimulation on posterior spinal fusions: a histological study in rats. *J Spinal Disord* 7: 36–40
- Hartshorne E (1841) On the causes and treatment of pseudarthrosis and especially that form of it sometimes called supernumerary joint. *Am J Med* 1841: 121–126
- Heckman JD, Ingram AJ, Loyd RD et al. (1981) Non-union treatment with pulsed electromagnetic fields. *Clin Orthop Relat Res* 161: 58–66
- Hinsenkamp M, Ryaby J, Burny F (1985) Treatment of non-union by pulsing electromagnetic field: European multicenter study of 308 cases. *Reconstr Surg Traumatol* 19: 147–151
- Holmes GB Jr (1994) Treatment of delayed unions and nonunions of the proximal fifth metatarsal with pulsed electromagnetic fields. *Foot Ankle Int* 15: 552–556
- Ibiwoye MO, Powell KA, Grabner MD et al. (2004) Bone mass is preserved in a critical-sized osteotomy by low energy pulsed electromagnetic fields as quantitated by in vivo micro-computed tomography. *J Orthop Res* 22: 1086–1093
- Inoue N, Ohnishi I, Chen D et al. (2002) Effect of pulsed electromagnetic fields (PEMF) on late-phase osteotomy gap healing in a canine tibial model. *J Orthop Res* 20: 1106–1114
- Kennedy WF, Roberts CG, Zuege RC et al. (1993) Use of pulsed electromagnetic fields in treatment of loosened cemented hip prostheses. A double-blind trial. *Clin Orthop Relat Res* 286: 198–205
- Kesani AK, Gandhi A, Lin SS (2006) Electrical bone stimulation devices in foot and ankle surgery: types of devices, scientific basis, and clinical indications for their use. *Foot Ankle Int* 27: 148–156
- Kold SE, Hickman J, Meisen F (1987) Preliminary study of quantitative aspects and the effect of pulsed electromagnetic field treatment on the incorporation of equine cancellous bone grafts. *Equine Vet J* 19: 120–124
- Kraus W, Lechner F (1972) [Healing of pseudoarthrosis and spontaneous fractures with structure-forming electrodynamic potentials]. *Munch Med Wochenschr* 114: 1814–1819
- Lante RW (1850) Cases of ununited fractures treated by electricity. *NY State J Med* 5: 317–319
- Lechner F (1973) Proceedings: influencing of impaired fracture healing through electromagnetic fields. *Hefte Unfallheilkd* 114: 325–327
- Lechner F, Ascherl R, Uraus W (1981) Treatment of pseudoarthroses with electrodynamic potentials of low frequency range. *Clin Orthop Relat Res* 161: 71–81
- Li JK, Lin JC, Liu HC et al. (2006) Comparison of ultrasound and electromagnetic field effects on osteoblast growth. *Ultrasound Med Biol* 32: 769–775

48. Linovitz RJ, Pathria M, Bernhardt M et al. (2002) Combined magnetic fields accelerate and increase spine fusion: a double-blind, randomized, placebo controlled study. *Spine* 27: 1383–1389
49. Lohmann CH, Schwartz Z, Liu Y et al. (2000) Pulsed electromagnetic field stimulation of MG63 osteoblast-like cells affects differentiation and local factor production. *J Orthop Res* 18: 637–646
50. Lynch AF, MacAuley P (1985) Treatment of bone non-union by electromagnetic therapy. *Ir J Med Sci* 154: 153–155
51. Mammi GI, Rocchi R, Cadossi R et al. (1993) The electrical stimulation of tibial osteotomies. Double-blind study. *Clin Orthop Relat Res* 288: 246–253
52. Marcer M, Musatti G, Bassett CA (1984) Results of pulsed electromagnetic fields (PEMFs) in ununited fractures after external skeletal fixation. *Clin Orthop Relat Res* 190: 260–265
53. Marks RA (2000) Spine fusion for discogenic low back pain: outcomes in patients treated with or without pulsed electromagnetic field stimulation. *Adv Ther* 17: 57–67
54. Massari L, Fini M, Cadossi R et al. (2006) Biophysical stimulation with pulsed electromagnetic fields in osteonecrosis of the femoral head. *J Bone Joint Surg Am [Suppl 3]* 88: 56–60
55. McLeod KJ, Donahue HJ, Levin PE et al. (1993) Electric fields modulate bone cell function in a density-dependent manner. *J Bone Miner Res* 8: 977–984
56. Midura RJ, Ibiwoye MO, Powell KA et al. (2005) Pulsed electromagnetic field treatments enhance the healing of fibular osteotomies. *J Orthop Res* 23: 1035–1046
57. Mooney V (1990) A randomized double-blind prospective study of the efficacy of pulsed electromagnetic fields for interbody lumbar fusions. *Spine* 15: 708–712
58. O'Connor BT (1985) Treatment of surgically resistant non-unions with pulsed electromagnetic fields. *Reconstr Surg Traumatol* 19: 123–132
59. Otter MW, McLeod KJ, Rubin CT (1998) Effects of electromagnetic fields in experimental fracture repair. *Clin Orthop Relat Res [Suppl]* 355: S90–104
60. Rubin CT, Donahue HJ, Rubin JE et al. (1993) Optimization of electric field parameters for the control of bone remodeling: exploitation of an indigenous mechanism for the prevention of osteopenia. *J Bone Miner Res [Suppl 2]* 8: S573–581
61. Saltzman C, Lightfoot A, Amendola A (2004) PEMF as treatment for delayed healing of foot and ankle arthrodesis. *Foot Ankle Int* 25: 771–773
62. Savini R, Di SM, Gargiulo G et al. (1990) The use of pulsing electromagnetic fields in posterolateral lumbosacral spinal fusion. *J Bioelectricity* 9: 9–17
63. Schmit-Neuerburg KP (2001) Indikation und klinische Ergebnisse der magnetfeldinduzierten Wechselstromstimulation verzögert verheilender Frakturen und Pseudarthrosen. *Trauma Berufskrankh* 3: S66–S72
64. Schnoke M, Midura RJ (2007) Pulsed electromagnetic fields rapidly modulate intracellular signaling events in osteoblastic cells: comparison to parathyroid hormone and insulin. *J Orthop Res* 25: 933–940
65. Sedel L, Christel P, Duriez J et al. (1982) Results of non unions treatment by pulsed electromagnetic field stimulation. *Acta Orthop Scand [Suppl]* 196: 81–91
66. Shamos MH, Lavine LS (1967) Piezoelectricity as a fundamental property of biological tissues. *Nature* 213: 267–269
67. Shamos MH, Lavine LS, Shamos MI (1963) Piezoelectric effect in bone. *Nature* 197: 81
68. Sharrard WJ (1990) A double-blind trial of pulsed electromagnetic fields for delayed union of tibial fractures. *J Bone Joint Surg Br* 72: 347–355
69. Sharrard WJ, Sutcliffe ML, Robson MJ et al. (1982) The treatment of fibrous non-union of fractures by pulsing electromagnetic stimulation. *J Bone Joint Surg Br* 64: 189–193
70. Simmons JW (1985) Treatment of failed posterior lumbar interbody fusion (PLIF) of the spine with pulsing electromagnetic fields. *Clin Orthop Relat Res* 193: 127–132
71. Simmons JW Jr, Mooney V, Thacker I (2004) Pseudarthrosis after lumbar spine fusion: nonoperative salvage with pulsed electromagnetic fields. *Am J Orthop* 33: 27–30
72. Simonis RB, Good C, Cowell TK (1984) The treatment of non-union by pulsed electromagnetic fields combined with a Denham external fixator. *Injury* 15: 255–260
73. Simonis RB, Parnell EJ, Ray PS et al. (2003) Electrical treatment of tibial non-union: a prospective, randomised, double-blind trial. *Injury* 34: 357–362
74. Tsai MT, Chang WH, Chang K et al. (2007) Pulsed electromagnetic fields affect osteoblast proliferation and differentiation in bone tissue engineering. *Bioelectromagnetics* 28: 519–528
75. Yasuda I, Naguahi K, Sata T (1955) Dynamic callus and electricity. *J Bone Joint Surg Am* 37A: 1292–1293
76. Zhang X, Zhang J, Qu X et al. (2007) Effects of different extremely low-frequency electromagnetic fields on osteoblasts. *Electromagn Biol Med* 26: 167–177