

**2. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
25. bis 26. Feb. 1999 in
Darmstadt**



**„Funktionelle Magnetstimulation in einer closed-loop
Regelung zur Erzeugung von Arm- und
Fingerbewegungen“**

P. Havel, A. Struppler
Forschungsgruppe Sensomotorik im Klinikum Rechts der Isar der TU München, München,
Deutschland

ISBN: 318318317x
Pages: 73-74

Funktionelle Magnetstimulation in einer Closed-Loop-Regelung zur Erzeugung von Arm- und Fingerbewegungen

P. Havel, A. Struppler

Forschungsgruppe Sensomotorik im Klinikum Rechts der Isar der TU München
Ismaningerstraße 22, 81675 München

Medizinisches Konzept

Zur Rehabilitation von zentralen (spastischen) Lähmungen (z. B. nach Schlaganfall) entwickeln wir eine Methode, mit der die verlorene Bewegungen von Arm, Hand und Fingerbewegungen neu erlernt und somit wiederhergestellt werden können [Str96], [Str97]. Funktionelle und morphologische Untersuchungen, haben gezeigt, daß der sensomotorische Kortex eine erstaunlich hohe Reorganisationstendenz besitzt, wenn nach einer kortikalen Läsion der sensorische Zustrom aus den gelähmten Extremitäten reaktiviert wird. In der Physiotherapie werden hierzu passive Gelenkbewegungen eingesetzt. Dabei sind jedoch die beteiligten Muskelgruppen gar nicht bzw. nicht entsprechend der Bewegung aktiviert.

In unserem Rehabilitationsverfahren erzeugt man kontinuierliche Bewegungen mittels lagegeregelter funktioneller Magnetstimulation (FMS) der gelähmten Muskeln. Es entsteht hierdurch ein wesentlich höherer sensorischer Zustrom, da die im angespannten Muskel enthaltenen Sensoren (z. B. Muskelspindeln) adäquat aktiviert und zusätzlich die sensorische Nervenleitungen inadäquat mitstimuliert werden. Die Magnetstimulation ist für dieses Verfahren besonders geeignet, da sie schmerzfrei ist. Zusätzlich wird der Rehabilitationserfolg durch die Einbindung der gezielten Aufmerksamkeit („local attention“) des Patienten auf die Bewegung der gelähmten Finger bzw. des Armes verbessert. Für die technische Realisierung ergeben sich hierdurch folgende Anforderungen:

1. Erzeugung eines Stimulationsmusters, das dem physiologischen Einstrom (Pulsfrequenzen zw. 15-40 Hz) aus normalen willkürlichen Zielbewegungen entspricht
2. Auslösung von entsprechenden lagegeregelten Bewegungen
3. Einbeziehung der vorhandenen Restfähigkeiten des Patienten zur Bewegungsdurchführung
4. Kontrolle des Therapieerfolges

Technischer Aufbau

Je nachdem, über welchen Muskel die Magnetspule plziert wird, können Arm-, Hand- oder Fingerbewegungen ausgelöst werden.

In diesem Ansatz wird eine lagegeregelte Zeigefingerstreckung durch funktionelle Magnetstimulation über der Innervationszone des Zeigefingerstreckers (M.

extensor indicis proprius) im „closed-loop“ vorgestellt (siehe Abb. 1). Für die Erfassung der Streckung wird der Winkel des Fingerend- bzw. Mittelgliedes mit einem eigenentwickelten, hochpräzisen Goniometer erfaßt und die elektromyographische Aktivität des Muskels und seiner antagonistischen Fingerbeuger abgeleitet. Mit Hilfe eines Kommandointerpreters wird die Restfähigkeit des Patienten zu einer isolierten Bewegung des paretischen (teilgelähmten) Fingers zur Auslösung der Regelung miteinbezogen.

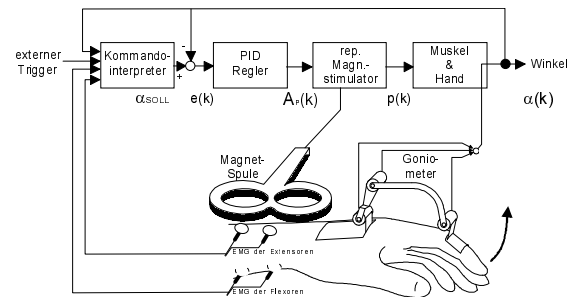


Abb. 1

Schematisches Bild der amplitudenmodulierten Regelung zusammen mit dem Versuchsaufbau

Die Ausprägung der Parese kann von einer kompletten Lähmung über die Aktivierbarkeit nur weniger für die Bewegung nicht ausreichender motorischer Einheiten bis zur willkürlichen Auslösbarkeit von kleinen Bewegungen reichen. Der Regelvorgang kann deshalb auf drei Arten gestartet werden: a) per Knopfdruck, b) durch Überschreitung der EMG-Amplitude über eine voreingestellte Schwelle, c) durch eine leichte Bewegung des zu stimulierenden Fingers.

Für die Realisierung des Reglers und des Kommandointerpreters wird ein programmierbares DSP - Modul mit variablem Regelalgorithmus verwendet. Als Stimulator dient derzeit der optimierte LEMG-Stimulator [Sch93]. Die Lageregelung erfolgt Amplitudenmoduliert, wobei die Stimulationsfrequenz auf 20 Hz festgelegt ist. Die hierbei eingesetzten Intensitäten können bis zu 100% des vergleichbaren Einzelstimulus des Stimulators der Fa. Magstim (700 J) erreichen.

Nach Auslösung der Stimulation durch den Kommando-Interpreter wird der Zeigefinger in die Position a_{soll} geregelt und dort gehalten. Der PID-Regelalgorithmus ist wie folgt gewählt:

$$A_p(k) = A_p(k-1) + K_R \left[\left(1 + \frac{T_V}{T} \right) \cdot e(k) - \left(1 - \frac{T}{T_N} + 2 \frac{T_V}{T} \right) \cdot e(k-1) + \frac{T_V}{T} \cdot e(k-2) \right]$$

Die Regeldifferenz $e(k)$ ist die Differenz der Vorgabe des Kommandointerpreters a_{soll} und dem gemessenen Winkel des Goniometers $a(k)$. T ist hierbei die Abtastzeit. K_R , T_N , T_V entsprechen den adäquaten Parametern eines kontinuierlichen PID-Reglers in Parallelform:

$$A_p = K_R \left[e(t) + \frac{1}{T_N} \int e(t) dt + T_V \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Im vorliegenden Ansatz werden die Reglerparameter noch patientenindividuell im Experiment angepaßt. Die Dämpfung des Systems wird ausreichend hoch eingestellt, so daß eine nicht überschießende kontinuierliche Bewegung erzeugt wird. Um den algorithmischen Aufwand zunächst möglichst gering zu halten, entspricht die Abtastzeit T der Stimulationsfrequenz. Das Abtasttheorem ist zwar hierdurch verletzt, der Regler arbeitet jedoch bei geeigneter Dämpfung stabil. Mit dieser Stimulationsstrategie ist z. Zt. für $1/T=20$ Hz der beste Therapieerfolg zu erreichen.

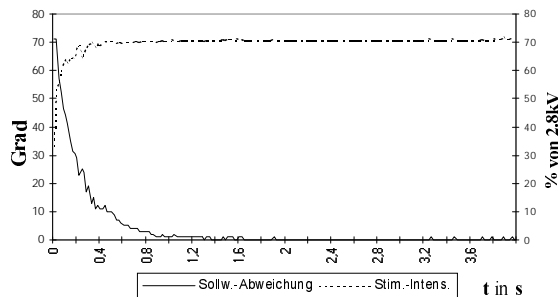


Abb. 2

Aufnahme der Regelabweichung $e(k)$ des Zeigefingers und der geregelten Stimulationsintensität $A(k)$ einer Stimulationsserie

Zur weiteren Angleichung des Impulsmusters an physiologische Impulsmuster wird die Abtastzeit T und somit auch die Pulsfrequenz als Funktion der Anzahl der abgegebenen Stimuli gesetzt $T(k)=1/f(k)$. In den derzeitigen klinischen Studien werden unterschiedliche Impulsmuster $f(k)$ hinsichtlich ihres therapeutischen Erfolgs verglichen.

Zur Evaluierung des Therapieerfolges wird derselbe Versuchsaufbau eingesetzt. Die während der Stimulation aufgenommenen Daten (EMG, $A(k)$, $a(k)$, a_{soll}) werden zur Beurteilung des Zustands des stimulierten Systems (z. B. Muskel- und Fingerdynamik, spastische Reflexerregbarkeit) verwendet (siehe Abb.2). Patienten mit einer Teillähmung werden jeweils vor und nach der Stimulation aufgefordert, den zu therapierenden Finger so schnell wie möglich zu strecken; dabei werden die EMG-Aktivitäten der beteiligten antagonistischen Muskeln gemessen.

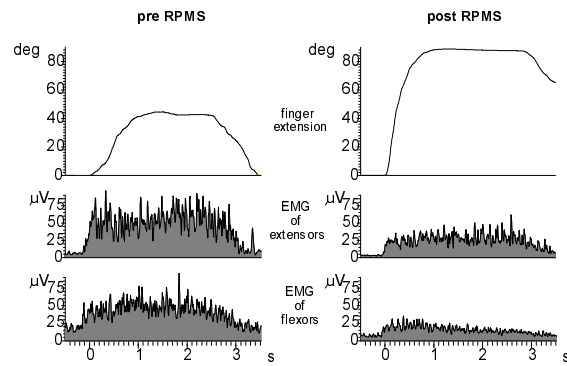


Abb. 4

- Oben: Winkelverlauf des Endglieds des rechten Zeigefingers bezüglich des Handrückens;
Mitte: rektifiziertes EMG, abgeleitet über den Strecker des Zeigefingers;
Unten: rektifiziertes EMG, abgeleitet über den Beuger des Zeigefingers

Abb. 4 zeigt, daß der Patient nach der therapeutischen Stimulation rasche Fingerstreckungen wesentlich schneller, weiter und mit weniger innervatorischem Aufwand durchführen konnte. Die begleitende spastische Aktivität der Antagonisten war wesentlich geringer als vor der Stimulation.

Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte einkanale FMS-System ist ein Ansatz, mit dem lagegeregelt Bewegungen von Arm, Hand und Fingern mit variablen Impulsmustern erzeugt werden können. Nach Abklärung der für die Therapie erfolgreichsten Stimulationsmuster wird dieses System durch weitere Stimulationskanäle erweitert. Es können dann geregelte zusammengesetzte Bewegungen induziert werden. Die Anforderung an den Regler wird dadurch größer. Um das dynamische Verhalten des stimulierten Systems und dessen Kopplungen zu erfassen, wird eine geeignete Strukturmodellierung und die Identifizierung der freien Parameter notwendig. Die Abtastzeit des Lagesignals muß dann entsprechend dem Abtasttheorem gewählt und von der Stimulationsrate entkoppelt sein. Durch die Induktion von zusammengesetzten Bewegungen wird der sensorische Zustrom potenziert. Das mehrkanalige Verfahren verspricht somit einen noch besseren Therapieerfolg.

Literatur

- [Sch93] Schmid M, Weyh T, Meyer BU: Entwicklung, Optimierung und Erprobung neuer Geräte für die magnetomotorische Stimulation. Biomed Technik 38;12 (1993) 317-324
- [Str96] Struppler A, Jakob C, Müller-Barna P, Schmid M, Lorenzen HW, Paulig M, Prosiel M: Eine neue Methode zur Frührehabilitation zentralbedingter Lähmungen von Arm und Hand mittels Magnetstimulation. Z EEG-EMG 27 (1996) 151-157
- [Str97] Struppler A, Havel P., Müller-Barna P., Lorenzen H.-W. Eine neue Methode zur Rehabilitation zentraler Lähmungen von Arm und Hand mittels peripherer Magnetstimulation. Neurol Rehabil 3, 1997, 145-158.