

**Zeitschrift:** Physiotherapie = Fisioterapia  
**Herausgeber:** Schweizerischer Physiotherapeuten-Verband  
**Band:** 34 (1998)  
**Heft:** 3

**Artikel:** Oszillator-Formationstraining : "ein Tetraplegiker lernt rennen" : Teil 1  
**Autor:** Schalow, Giselher  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-929262>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 31.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Oszillator- Formationstraining

## «Ein Tetraplegiker lernt rennen», Teil 1

Dr. med. habil., Dr. rer. nat., Dipl. Ing. Giselher Schalow,  
Physiotherapieschule am Universitätsspital Zürich, CH-8091 Zürich,  
Leitender Arzt für klinische Forschung, Schweizer Paraplegiker-Zentrum Nottwil,  
Klinikdirektor und Chefarzt Dr. med. Guido A. Zäch, CH-6207 Nottwil

Es wird gezeigt, dass rhythmisch feuernde prämotorische neuronale Teilnetzwerke nach Rückenmark- und Hirnverletzungen nicht mehr richtig rhythmisch schwingen und wahrscheinlich in Zusammenarbeit mit anderen Teilnetzwerken Anlass zu pathologischen Bewegungsmustern wie Spastizität geben. Mittels rhythmisch-dynamisch stereotyper symmetrischer Bewegungen wie Krabbeln, Gehen, Rennen und Springen auf einem Gerätesprungbrett, konnten bei Patienten die verletzten neuronalen Netzwerke des ZNS in ihrer Präformation derart verbessert werden (Oszillator-Formationstraining), dass zunehmend sinnvolle Funktionen bis hin zum Rennen, bei abnehmender Spastizität, wiedergewonnen werden konnten. Das neue Verständnis der Funktionen des menschlichen zentralen Nervensystems (ZNS) ist, dass sich präformierte neuronale Netzwerke mittels natürlicher adäquater Impulsmuster selbst organisieren und dass die Präformation mittels der Netzwerkplastizität veränderbar ist, was bedeutet, dass das verletzte ZNS umorganisierbar und damit reparierbar ist. Rhythmisch-dynamisch stereotype symmetrische Bewegungen sind zur Wiederherstellung sinnvoller Funktionen besonders geeignet, weil sie der Organisationsform des ZNS auf unterster Stufe entsprechen (Rhythmuskopplung), im Rückenmark genetisch angelegt sind, wenig supraspinale Willkürbahnen benötigen, die Muskeln physiologisch aktivieren und über Oszillatorkopplungen ein «schlecht» funktionierendes Bein vom «besseren» Bein entsprechend seiner Bewegung «mitbewegt» werden kann (Symmetrieverbesserung).

Diese Neurorehabilitation deckt sich mit der aus der theoretischen Physik und der Robotik kommenden Entwicklung von der Selbstorganisation neuronaler Netzwerke des ZNS und der Netzwerkplastizität. Speziell das Springen auf dem Gerätesprungbrett in «Gegenphase» und «in Phase» findet im Haken-Kelso-Bunz-Modell vertiefendes Verständnis bei der Umorganisation des ZNS durch Einführung von Nichtsymmetrie,

Intention und Lernen in Nervensystemzustandspotentialen. Somit wird theoretisch verständlich, dass durch rhythmisch-dynamisch stereotype symmetrische Bewegungen die Spastik zurückgedrängt werden kann, weil das gesamte ZNS am Umlernprozess beteiligt ist und somit bestimmte Netzwerkzustände gestärkt (z.B. Gehen) und andere abgeschwächt werden (z.B. Spastik).

### Schlüsselwörter

Neurorehabilitation – Neuronale Netzwerke – Selbstorganisation – Spinale Oszillatoren – Rhythmuskopplung – ZNS-Verletzung – Plastizität – HKB Modell



Obiger Fortschritt in der Neurorehabilitation wurde ermöglicht durch eine human-neurophysiologische Entwicklung, die ausgehend von einer neuen Messtechnik integrative Funktionen des ZNS ausmessen kann. Afferente und efferente Einzelnerfenz-Aktionspotentiale konnten von menschlichen unverletzten sakralen Nervenwurzeln abgeleitet werden. Einzelnerfenz-Fortleitungsgeschwindigkeiten und Nervenfaserdurchmesser konnten gemessen und ein Klassifikationsschema für das periphere Nervensystem des Menschen aufgestellt werden, in welchem Nervenfaserguppen durch Gruppen-Leitungsgeschwindigkeiten und Gruppen-Durchmesser charakterisiert sind. Damit wurde eine Basis geschaffen, um neurophysiologische Funktionen in einem Teil des menschlichen Nervensystems zu erforschen. Mit Hilfe von gleichzeitig gemessenen natürlichen Impulsmustern einzelner afferenter und efferenter Nervenfasern konnten Funktionen des ZNS des Menschen analysiert und das rhythmische Feuern von  $\alpha$ -Motoneuronen gefunden werden. Die prämotorischen neuronalen Teilnetzwerke, welche die Motoneurone aktivieren, feuern bei starker Erregung rhythmisch mit Impulspulsen entsprechend dem Nervenfasertyp und werden hier als Oszillatoren bezeichnet. Aus der pathologischen Funktion dieser Oszillatoren nach ZNS-Verletzungen wurden dann obige Trainingsmethoden gefolgert.

## Einleitung

Durch Ableitung der Erregung einzelner Nervenfasern (Einzelnerfenz-Aktionspotentiale) von Nervenwurzeln der Cauda equina und der Registrierung der Aktivität einzelner motorischer Einheiten mittels der Oberflächen-Elektromyographie konnten Funktionen des ZNS beim gesunden Menschen und nach Rückenmarkverletzung analysiert werden. Dabei zeigte sich, dass Motoneurone bei hoher Erregung rhythmisch mit Impulspulsen feuern (z.B. alle 160ms mit 3 Aktionspotentialen) [7, 12] und dass das rhythmische Feuern der Motoneurone oder der motorischen Einheiten wechselnden Rhythmuskopplungen unterliegt. Es müssen sich also im Rückenmark aufgrund des afferenten Inputs von der Peripherie und von supraspinalen Zentren neuronale Teilnetzwerke zu rhythmisch schwingenden Systemen organisiert haben (Oszillatoren). Diese prämotorischen Oszillatoren erzeugen dann in Zusammenarbeit mit propriospinalen Oszillatoren und supraspinalen Willkürinfluss durch wechselnde Rhythmuskopplung makroskopische Funktionen, wie z.B. das Gehen oder das Rennen. Da nach Verletzung des Rückenmarks die neuronalen Teilnetzwerke nicht mehr rhythmisch schwingen, wurde bei Patienten mit

Rückenmarkverletzung ein Rhythustraining durchgeführt, wodurch sich die Rhythmisität verbessern sollte. Unter Zurückdrängung der Spastik konnten dabei Patienten bis zum Rennen hin wieder alte Funktionen erlernen. Die Veränderung der Präformation neuronaler Netzwerke des gesamten geschädigten ZNS mit veränderter Organisation zur Wiedererlangung sinnvoller Funktionen ist klinisch von Bedeutung, weil durch die Verbesserung der Erstversorgung wie sachgerechter Transport und Methylprednisolongabe in hoher Dosis [1] die ZNS-Verletzungen weniger ausgedehnt sind. Dadurch sind jetzt mehr Rückenmarkverletzungen paraparetisch, so dass bei diesen eine Umorganisation des ZNS sinnvoll ist. Für eine adäquate Therapie muss die Funktionsweise des menschlichen ZNS bekannt sein, wie sie sich nach Verletzung verändert und mit welchen therapeutischen Massnahmen die physiologische Funktionen (z.B. Gehen) durch Umorganisation des ZNS wiedergewonnen werden können.

Historisch sind Rhythmen und Rhythmuskopplungen beim Menschen nichts Neues. Aus einer früheren Hochburg deutscher klinischer Forschung in Breslau kamen Ludwig Guttmann, O. Foerster und Kurt Wacholder. Guttmann verbesserte wesentlich die Rehabilitation von Rückenmarkverletzten, Foerster führte die Dermatombestimmung ein und Wacholder veröffentlichte 1928 die optimalen Frequenzen leistungseffektiver rhythmischer Bewegungen [20].

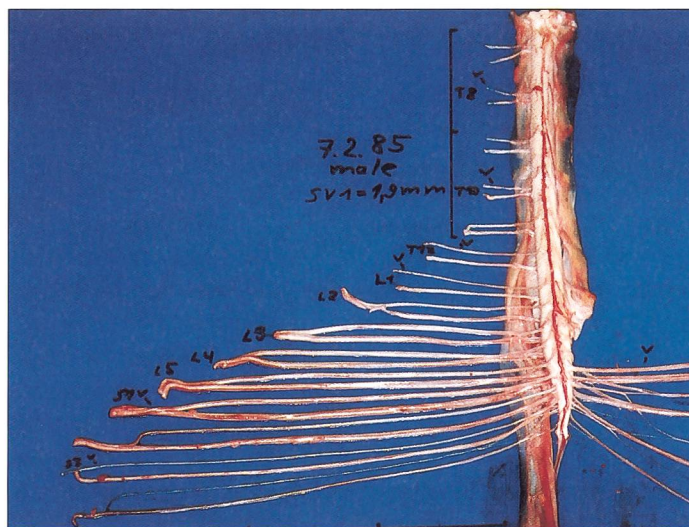
Schon früher war das Durchschlagen rhythmisch schwingender neuronaler Teilnetzwerke bei den verschiedenen Zitterformen des Menschen bemerkt worden, wie z.B. Kältezittern und Tremor. Descartes arbeitete 1649 am Tremor. R. Jung zog 1941 [4] aus Messungen des Tremors und Klonus ähnliche Folgerungen wie der Autor dieser Arbeit über die Selbstorganisation neuronaler Netzwerke. Jung nannte die Summe der prämotorischen neuronalen Netzwerke den Schaltzel-

lenapparat, welcher für die Koordination der neuronalen Teilnetzwerke auf unterster Stufe zuständig ist, das heisst, welcher die Motoneurone selbst ansteuert. E. v. Holst setzte sich mit seiner «relativen Koordination» [3] der verschiedenen Rhythmen im ZNS in Opposition zur Schulmeinung Sherringtons, die mehr oder weniger annahm, dass der Mensch eine Reflexmaschine sei. Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiet der theoretischen Physik unterstützen den Paradigmenwechsel zur Selbstorganisation neuronaler Netzwerke mittels relativer Koordination von Rhythmen [5]. Das 1985 vorgestellte theoretische Koordinationsmodell von Haken, Kelso und Bunz [5] beschreibt experimentelle Ergebnisse von rhythmischen Zeigefingerbewegungen in «Gegenphase» und «in Phase» und wird hier auf Beibewegungen in «Gegenphase» und «in Phase» beim Springen auf einer Sprungeinrichtung angewendet. Durch Einführen von Nichtsymmetrie, Intention und Lernen kann im Modell verstanden werden, wie sich die integrativen ZNS-Funktionen durch das Training verändern, so dass physiologische Bewegungen wieder erlernt werden.

## Grundlagen

### Anatomische Gegebenheit gibt Anlass zur Einzelnerfenz-Aktionspotential-Messmethode

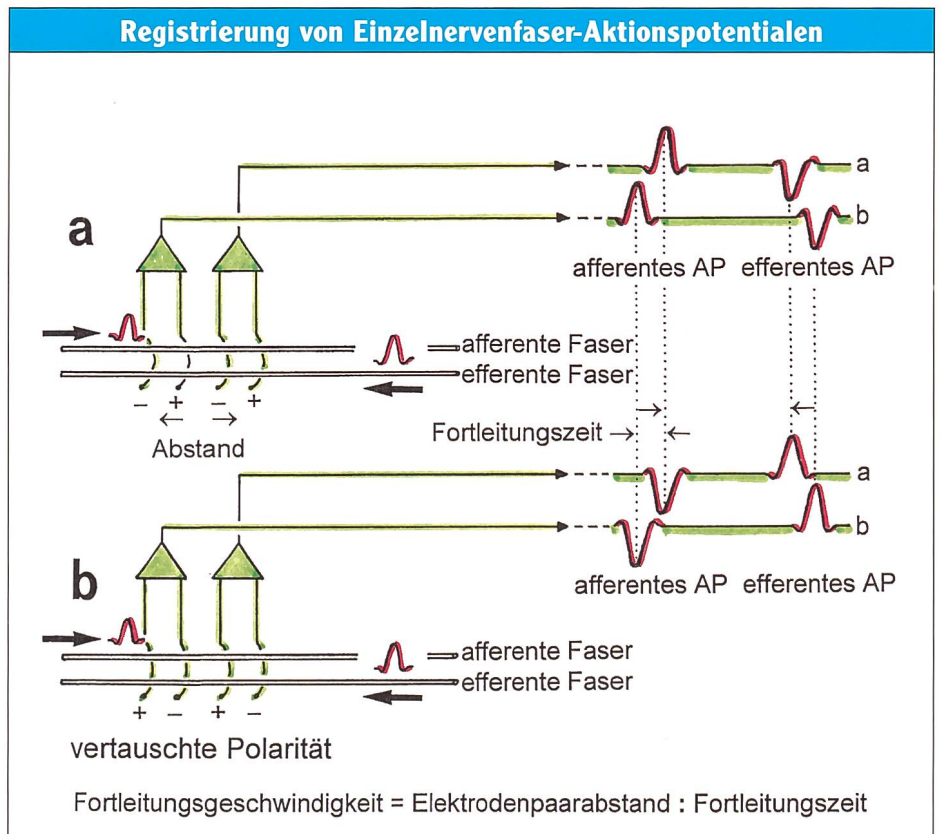
Im Spinalkanal des Menschen liegt eine einmalige anatomische Gegebenheit vor. Durch den Aszensus des Rückenmarks endet der Conus medullaris etwa beim Wirbel L1, so dass im lumbosakralen Spinalkanal nur die bis zu 20 cm langen Nervenwurzeln der Cauda equina liegen (Abb. 1). Bei Ratte, Katze und Hund z.B. erstreckt sich das Rückenmark über den ganzen Rückenmarkskanal. Unter sehr guten Sichtverhältnissen kann beim Menschen intradural operiert, können Elektroden implantiert und Einzelnerfenz-Aktionspotentiale von unverletzten Nervenwurzeln extrazel-



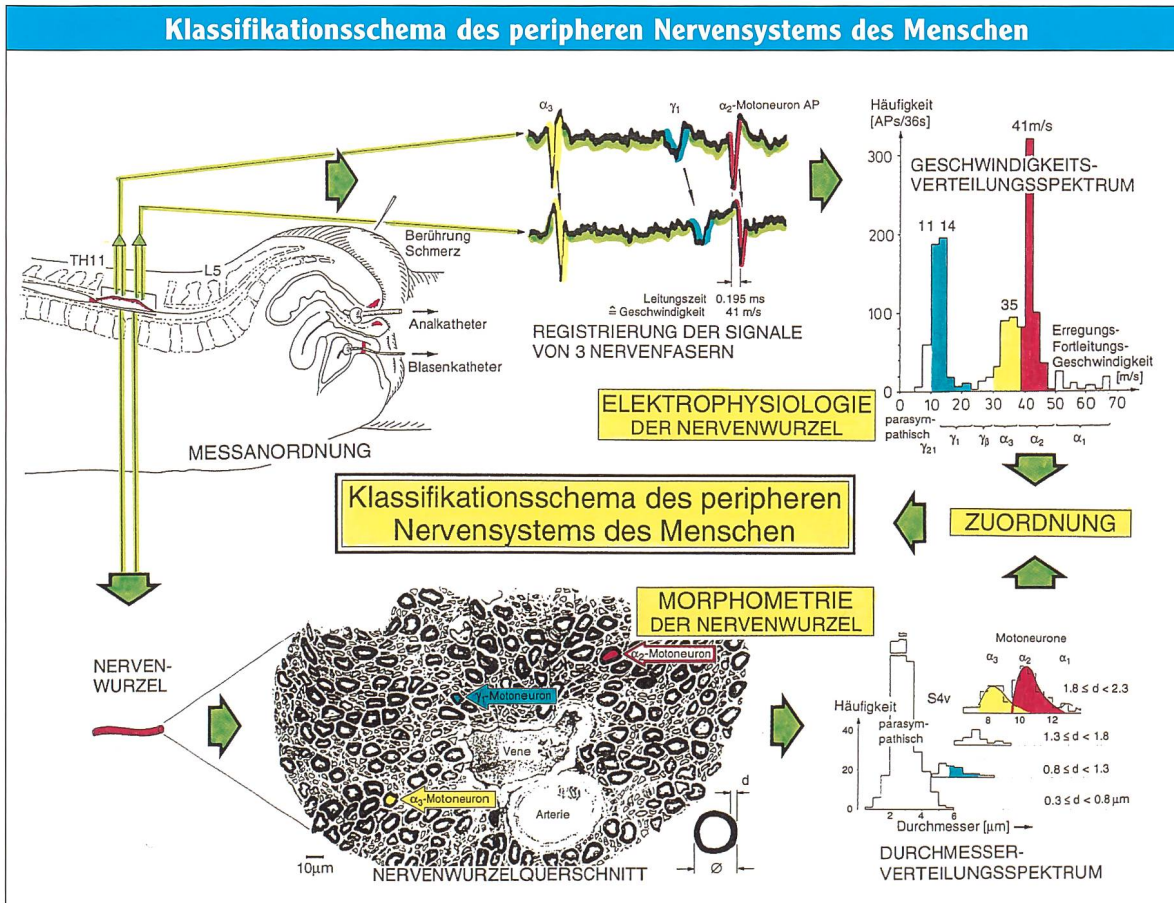
**Abb. 1:** Rückenmark mit Nervenwurzeln der Cauda equina. Die dünnen langen sacralen Wurzeln eignen sich für die Ableitung von Einzelnerfenz-Aktionspotentialen.

lulär abgeleitet werden. Beim Menschen liegen im Conus medullaris im wesentlichen nur die Kontinenzfunktionen. Einige Motoneurone, welche die Fussmuskeln innervieren, ziehen aber auch durch caudale sakrale Nervenwurzeln. Einzelfaser-Aktionspotentialmessungen von caudalen Nervenwurzeln von Hund und Katze sind weniger aussagekräftig, weil in den vergleichbaren Nervenwurzeln die Funktionen der Kontinenz mit denen der Schwanzbewegung überlagert sind. Die caudalen Sakralwurzeln beim Menschen sind dünn (z.B. S4-Wurzel (ventral und dorsal)  $\approx 0,3$  mm) und besitzen statt Epi- und Perineurium nur eine dünne Zellage, so dass beim Registrieren mit zwei Platindrahtelektrodenpaaren (10 mm Abstand) Einzelfaser-Aktionspotentiale an zwei Punkten mit Amplituden bis zu  $200\mu\text{V}$  gemessen werden können (Abb. 2). Damit ist mit der Einzelfaser-Aktionspotential-Ableitmethode von unverletzten dünnen Nervenwurzeln eine human-neurophysiologische Messmethode mit klinischer Konsequenz entwickelt worden [7–16].

Anmerkung zu Abb. 2a: Das AP der afferenten Faser trifft die Elektroden in der Reihenfolge minus-plus und das AP der efferenten Faser die Elektroden in der Reihenfolge plus-minus. Die Hauptamplitude des dreiphasischen APs zeigt daher bei der afferenten Faser eine entgegengesetzte Richtung als bei der efferenten Faser. Die Richtung der Fortleitungszeiten ist bei den afferenten und efferenten APs auch gegensätzlich.



**Abb. 2:**  
**a.** Prinzip der Ableitung von extrazellulären Aktionspotentialen (APs) einzelner Nervenfasern von einer Nervenwurzel, bestehend hier aus einer afferenten und einer efferenten Nervenfasern.  
**b.** Eine Vertauschung der Polarität der Ableitungselektroden vertauscht zwar die Richtung der AP-Amplituden der afferenten und efferenten Fasern, verändert aber nicht ihre Gegensätzlichkeit und damit ihre Unterscheidbarkeit.



**Abb. 3:** Die Zuordnung von Spitzen in Verteilungen von Einzelfaser-Fortleitungsgeschwindigkeiten zu Spitzen in Verteilungen von Einzelfaser-Durchmesser führt zur Charakterisierung einer Nervenfaserguppe durch die Gruppenleitungs-geschwindigkeit und den Gruppendurchmesser für myelinisierte Nervenfasern dicker als  $3,5\mu\text{m}$ . Thionin-Akridinorange-Färbung. Durchmesser-Verteilungen nach 4 Myelinscheidendickenbereichen weiter unterteilt zur besseren Erkennung von Verteilungsspitzen.

# New!

- ✓ top-modernes Design
- ✓ leicht und wendig
- ✓ müheloses Aufstehen
- ✓ Qualität im Stehen und Sitzen
- ✓ steigert die Unabhängigkeit
- ✓ Integration in den Alltag

LEVO AG DOTTIKON  
CH-5605 Dottikon  
Tel. 056/624 37 82  
Fax 056/624 31 15

Vertrieben durch:

Bimeda AG Bachenbülach  
01/860 97 97, Fax 01/860 95 45

Theo Frey AG Bern  
031/991 88 33, Fax 031/992 20 21

Gelbart Reha-Center Luzern  
041/360 00 12, Fax 041/360 16 30

Gelbart Reha-Center Adliswil  
01/771 29 92, Fax 01/771 29 94

Meditec J. Dubuis Bercher  
021/887 80 67, Fax 021/887 81 34

dt

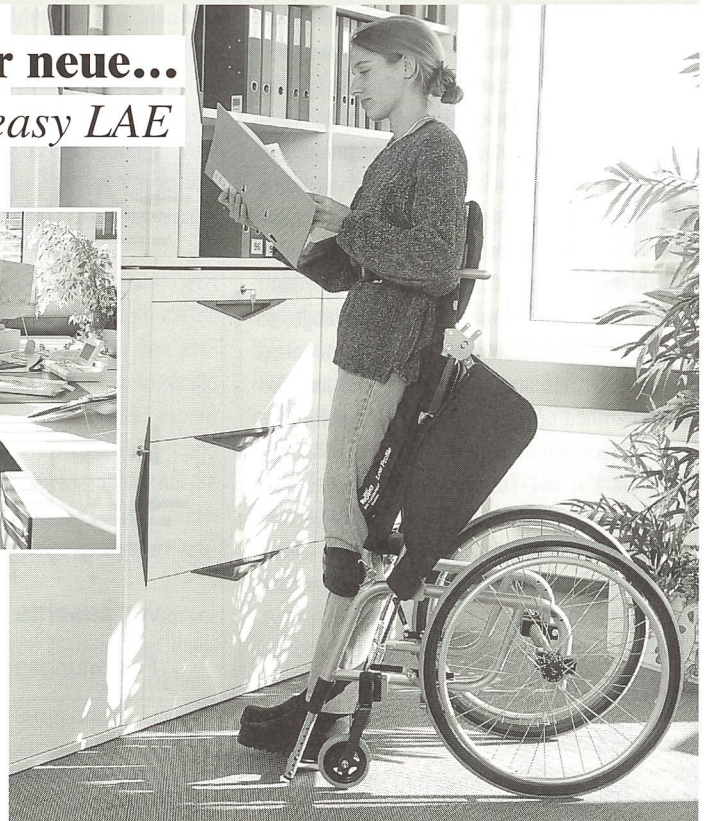
M.J. REHAB Colombier  
032/841 22 90, Fax 032/841 42 90

Reha Hilfen AG Zofingen  
062/751 43 33, Fax 062/751 43 36

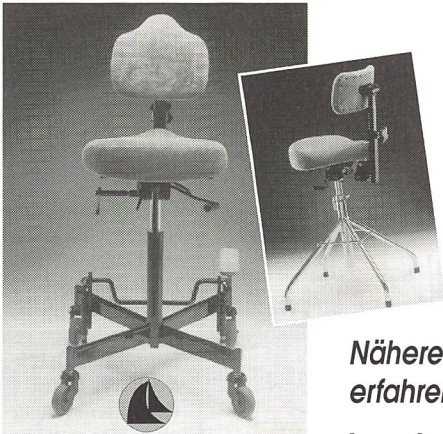
Roll-Star Sementina  
091/857 67 33, Fax 091/857 68 00

Trend Reha AG, Wännwil  
026/497 92 10, Fax 026/497 92 14

Sooo easy, der neue...  
**LEVO active-easy LAE**



## Die Arbeitsstühle REAL 2000



**INVATEC** GmbH

**MERCADO  
MEDIC**

**Der Arbeitsstuhl der Ihnen  
beim Arbeiten hilft!**

Näheres über die vielfältige Modelauswahl  
erfahren Sie bei:

**Invatec GmbH**  
Rehabilitationsmittel / Rollstühle  
Felsenrainstrasse 1, CH - 8052 Zürich-Seebach  
Tel. 01 302 52 80

insetrate-  
schluss

heisst nicht,  
dass Sie Ihr Inserat  
nicht auch früher  
aufgeben dürfen!

### Muskeldehnung

warum und wie?

Olaf Evjenth und Jern Hamberg

Eine erfolgreiche Behandlungsmethode bei Schmerzen  
und beschränkter Beweglichkeit

**Teil I** Die Extremitäten. 178 Seiten mit mehr als 260 Bildern,  
Muskelregister und 16 Tabellen mit Schema über die  
bewegungshindernde Funktion verschiedener Muskeln. **SFr. 70.-**

**Teil II** Die Wirbelsäule. 132 Seiten mit mehr als 190 Bildern,  
Muskelregister und 15 Tabellen mit Schema über die  
bewegungshindernde Funktion verschiedener Muskeln. **SFr. 55.-**

Beide Teile zusammen **SFr. 105.-**

### Bück dich nicht!

Ärztliche Anleitung für die richtige Haltung und Bewegung  
der Wirbelsäule

Dr. Peter Schleuter

Broschüre mit 40 Seiten Inhalt.  
In dieser Broschüre wird deutlich gemacht, dass vor allem Belastungen  
des Alltags und banale Alltagsbewegungen in ihrer Summation zu  
Rückenbeschwerden führen.

Anhand von Beispielen werden falsche Bewegungen erklärt und die  
richtigen Bewegungen aufgezeigt. **SFr. 21.50**

Einsenden an:

Remed Verlags AG, Postfach 2017, CH-6302 Zug/CH

Anzahl  Teil I, SFr. 70.- (+ Verpackung und Versandkosten)

Anzahl  Teil II, SFr. 55.- (+ Verpackung und Versandkosten)

Anzahl  Teil I und II, SFr. 105.- (+ Verpackung und Versandkosten)

Anzahl  Bück dich nicht! SFr. 21.50 (+ Verpackung und Versandkosten)

Name: \_\_\_\_\_

Strasse: \_\_\_\_\_ Nr.: \_\_\_\_\_

PLZ/Ort: \_\_\_\_\_

Land: \_\_\_\_\_

### Klassifikationsschema für das periphere Nervensystem des Menschen

Bei Hirntoten (bezüglich des peripheren Nervensystems «normalen Menschen») konnten nach der Eröffnung des Spinalkanals und der Dura Einzelnerfener-Aktionpotentiale abgeleitet und Einzelnerfener-Fortleitungsgeschwindigkeiten aus Elektrodenabstand und Leitungszeit zwischen den beiden Messpunkten bestimmt werden. Die Wurzeln wurden anschliessend entnommen, fixiert, eingebettet, angefärbt, mit dem Lichtmikroskop bei einer 1000fachen Vergrösserung photographiert und Nervenfaserdurchmesser und Myelinscheidendicken gemessen. Es konnten die Verteilungen der Fortleitungsgeschwindigkeit und der Nervenfaserdurchmesser von der gleichen Nervenwurzel erstellt werden und die Spitzen in den Verteilungen einander zugeordnet werden. Eine Nervenfasern kann damit durch die Gruppenfortleitungsgeschwindigkeit (Spitzenwert der nichtsymmetrischen Verteilung) und den Gruppendurchmesser charakterisiert werden (Abb. 3 und 4) [12]. Die mittelschnellen Sphinktermotoneurone (FR) besitzen z.B. einen Durchmesser von 10,2 µm und leiten die Erregung mit 50 m/s bei 36° C fort (Abb. 4).

Durch intraoperative Messungen beim Einbau eines elektrischen Blasenstimulators bei Patienten mit Rückenmarkverletzung konnte gezeigt werden, dass die Fortleitungsgeschwindigkeiten und Durchmesser der Nervenfasern nach Rückenmarkverletzungen sich nicht änderten und somit das Klassifikationsschema für das periphere Nervensystem des Menschen auch nach Rückenmarkverletzung gültig bleibt [13].

### Abspalten von Einzelfaserimpulsmustern von der Summenaktivität dünner Nervenwurzeln

Durch das Erkennen wiederkehrender Aktionspotentialformen und deren Leitungszeiten können von vielleicht 50 aktiven Nervenfasern der annähernd 250 Fasern dicker als 3,5 µm (andere Fasern sind zum Zeitpunkt der Messung nicht aktiv) die natürlichen Impulsmuster einzelner identifizierter afferenter und efferenter Nervenfasern von der Summenaktivität einer dünnen Nervenwurzel abgespalten werden (Abb. 5) [16].

Damit kann gemessen werden, welche Erregungsimpulsmuster von Rezeptoren der Peripherie (Haut, Muskelspindeln, Harnblase...) ins Rückenmark hineingeleitet werden und welche Impulsmuster gleichzeitig mittels der α- und γ-Motoneurone herausgeleitet werden (Abb. 5). Durch Erstellen gleichzeitiger Impulsabstands- und Phasenverteilungen werden die Funktionen des caudalen Rückenmarks analysiert.

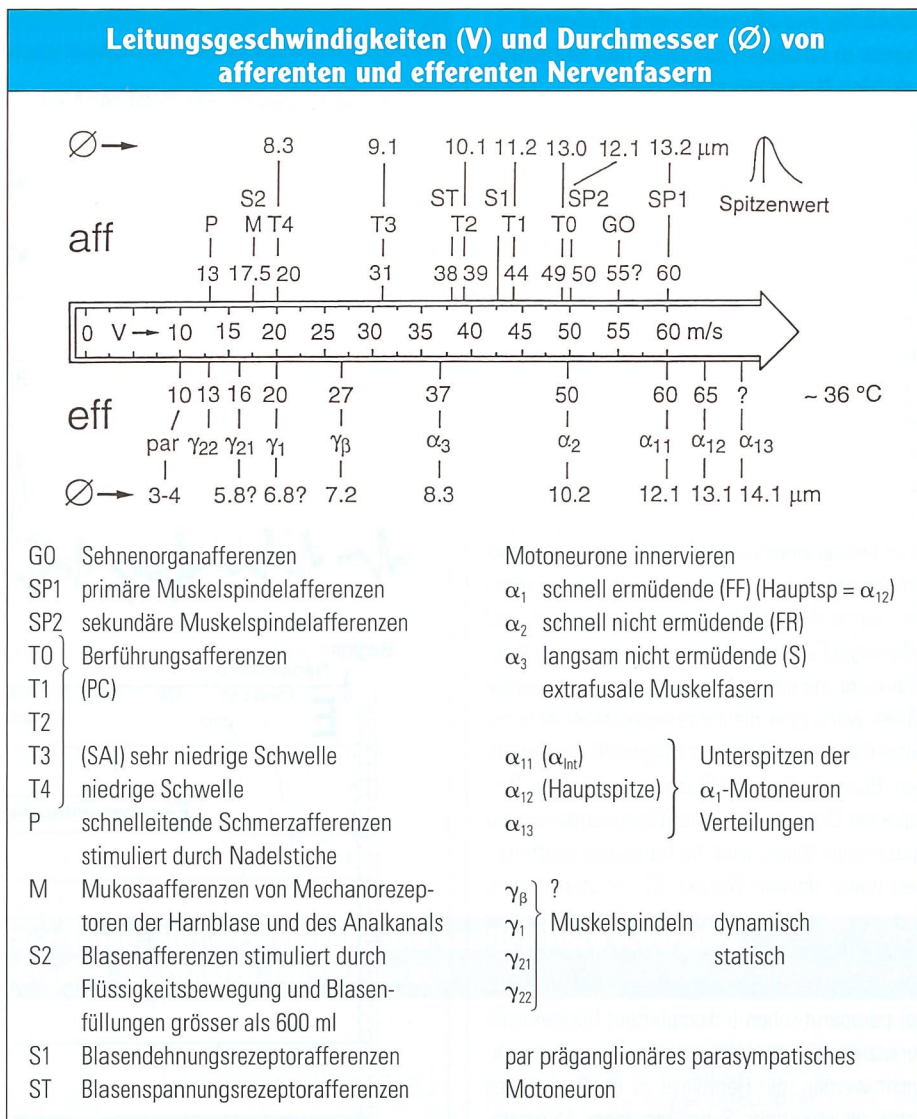


Abb. 4: Klassifikationsschema für das periphere Nervensystem des Menschen; für myelinisierte Nervenfasern dicker als 3,5 µm, Schema noch unvollständig.

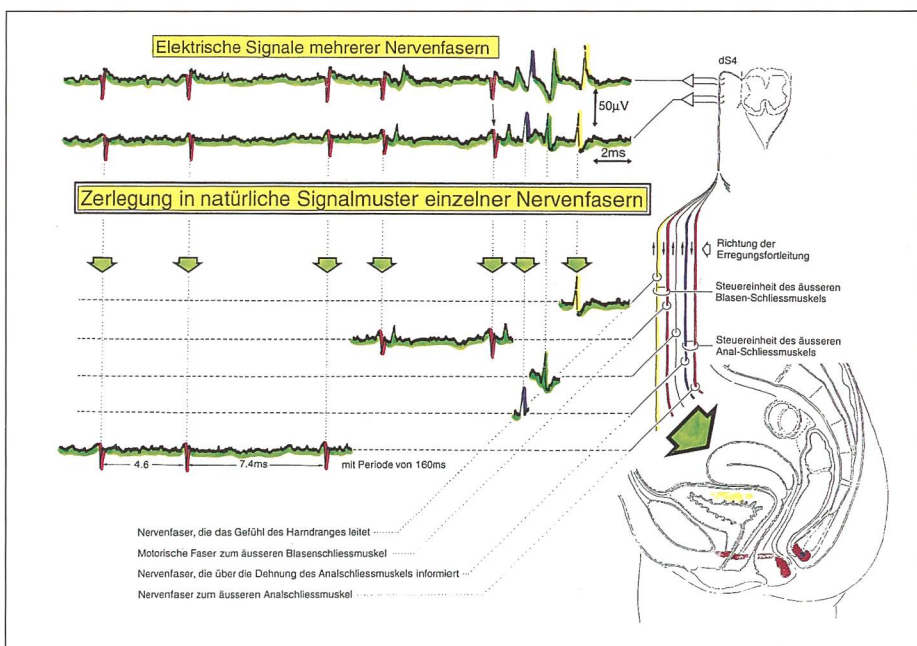
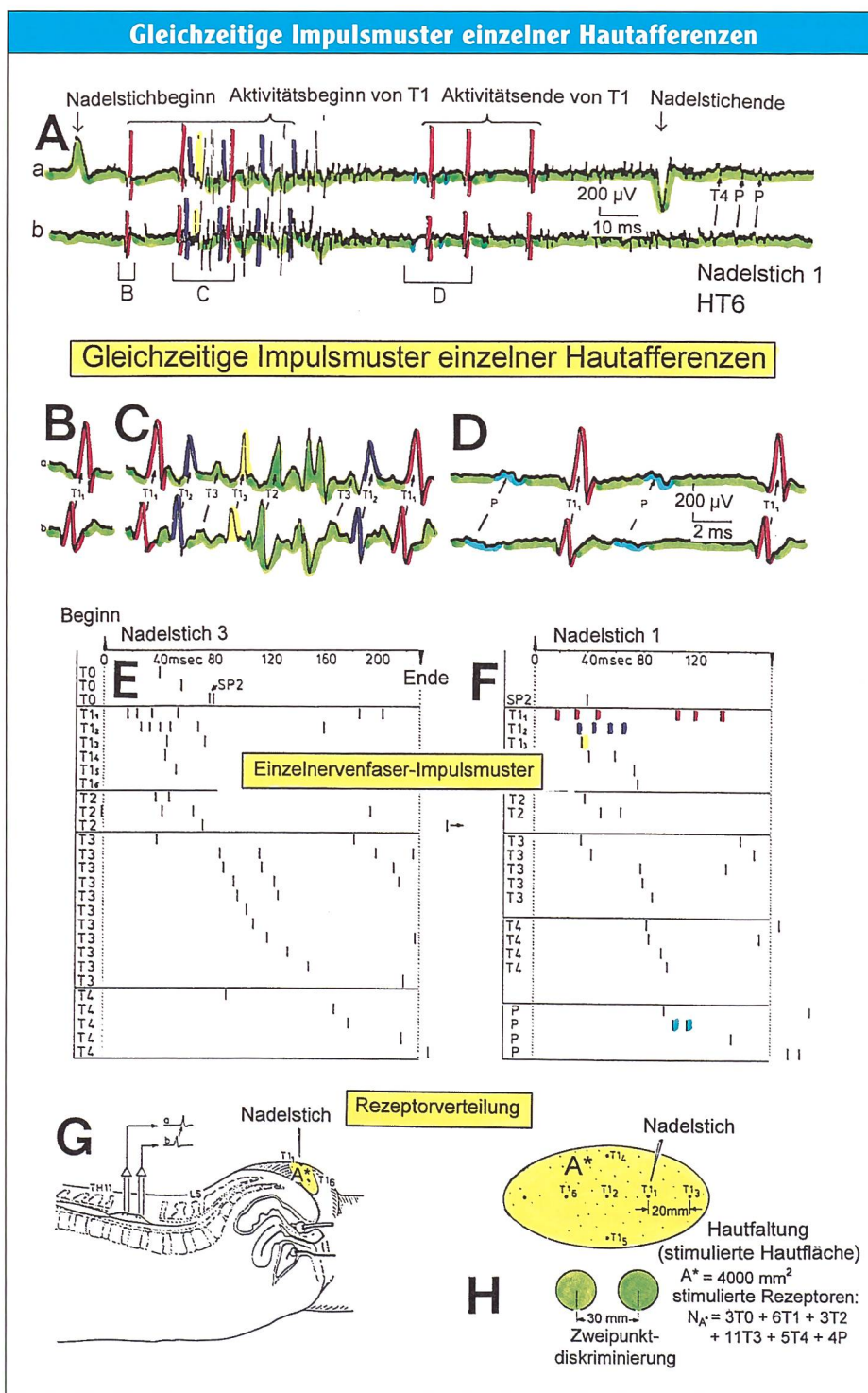


Abb. 5: Schematische Abspaltung einzelner afferenter und efferenter Nervenfasern von der Summenaktivität der Nervenfasern der Wurzel durch Wiedererkennung von gleichen wiederkehrenden Aktionspotentialformen und Leitungszeiten.

**Mischung aus afferenten und efferenten Fasern in caudalen dorsalen und ventralen sakralen Nervenwurzeln**

Bei Messungen an dorsalen Wurzeln fanden sich entgegen der Lehrmeinung auch Aktionspotentiale von Efferenzen und in ventralen (motorischen) Wurzeln auch Afferenzen. Das Dalesche Prinzip, nämlich die Trennung von Afferenzen und Efferenzen in dorsalen und ventralen Wurzeln, ist in den Wurzeln S2 bis S5 nur bedingt gültig. Wegen der Nähe ventraler und dorsaler Wurzelaustritte im Conus medullaris wuchsen wahrscheinlich während der Ontogenese einige Nervenfasern durch den «falschen» Wurzelaustritt. Nervenwurzelvariationen (und Gefäßvariationen) sind im Conusbereich häufig. Deafferentierungen beim Einbau eines elektrischen Blasenstimulators können daher in einzelnen Fällen Probleme bereiten, wenn die Mischungen aus afferenten und efferenten Fasern in dorsalen und ventralen Wurzeln mehr als einige Prozent betragen. In diesen Fällen wird dann die Einzelnervenfaser-Aktionspotentialmessmethode zur Diagnostik herangezogen. Beim elektrischen Blasenstimulator, zur Therapie der Detrusor-Sphinkter-Dyssynergie und der spastischen Blase, wird die Harnblase deafferentiert (meist dorsale Wurzeln S2–S5 durchtrennt) und die ventralen Wurzeln (S2–S4) später zwecks Blasenentleerung elektrisch gereizt. Soll der Vorderwurzel-Blasenstimulator [14,15] auch bei paraparetischen (inkompletten) Rückenmarkverletzungen eingesetzt werden, dann muss versucht werden, die Harnblase zu deafferentieren unter gleichzeitiger Schonung jener Nervenfasern, welche das sexuelle Empfinden leiten. Die

Anmerkung zu Abb. 6: Durch zwei Nadelstiche in das Gesäss eines Hirntoten (HT6) ausgelöste afferente Summenaktivität einer coxygealen Nervenwurzel. Bei Nadelstich 1 (A,F) wird Schmerz ausgelöst (Schmerzafferenzen feuern), bei Nadelstich 3 (E) wahrscheinlich nicht (Nadel berührt nur die Haut, verfehlt die Schmerzrezeptoren oder Schmerzafferenzen führen durch eine andere Wurzel). In «G» ist die Nadelstich- und AP-Messanordnung schematisch dargestellt. In «A» wird in einer Originalregistrierung die Summenaktivität von vielen Hautafferenzen auf den beiden Strahlen der beiden Ableitungselektrodenpaare gezeigt. Wie zu sehen ist, überdauert die Aktivität der Schmerzfasern (P) den Nadelstich. In «B», «C» und «D» sind Aktivitätsausschnitte der Ableitung in «A» zur AP-Wellenformerkennung zeitlich gestreckt dargestellt. Durch AP-Wellenformvergleiche auf den Registrierstrahlen «a» und «b» und Leitungszeiten-Vergleiche wurde die Nervenwurzel-Summenaktivität der gereizten Afferenzen aus «A» schematisch zerlegt in die Aktionspotentialmuster der einzelnen Hautafferenzen (F); APs werden schematisch dargestellt durch Striche. Bei Nadelstich 3 (E) feuerten keine Schmerzafferenzen (keine Originalregistrierung gezeigt). In «H» ist eine mögliche Rezeptorenverteilung der T1-Hautafferenzen dargestellt. Zum Vergleich ist eine Zweipunkt-diskriminierung von 30 mm eingezeichnet. SP2 = AP von sekundären Muskelspindelafferenzen, T1–T4 = APs von Hautafferenzen (T1 wahrscheinlich von Pacini-Körper), P = AP von Schmerzafferenz, T0 = AP von nicht identifizierter Hautafferenz. A\* = stimulierte Hautfläche.



**Abb. 6: Aufspaltung afferenter Summenimpulsmuster in die gleichzeitigen Impulsmuster einzelner Hautafferenzen.**

intraoperative Harnblasendiagnostik, einschliesslich der Urodynamik, ist möglich, weil die Narkose extrem flach gehalten werden kann, da der Patient aufgrund der Rückenmarkverletzung keinen Schmerz empfindet. Der Patient muss gerade schlafen und den Tubus in der Trachea tolerieren. Im Prinzip könnte der Patient auch ohne Narkose operiert werden; nur die lange Operationszeit in ungünstiger Lage spricht dagegen. Auch von Katzenexperimenten ist bekannt, dass Reflexe und Automatismen bei sehr flacher

Narkose in abgeschwächter Form vorhanden sind. Es ist zwar zurzeit schon möglich, die Harnblasenafferenzen forschungsmässig zu identifizieren [13] (d.h. nach der Operation), aber die sichere intraoperative Diagnostik bereitet noch Schwierigkeiten. In der Tierphysiologie konnten die einzelnen Harnblasen-Afferenzgruppen bisher noch nicht ausreichend identifiziert werden. Bei einer möglichen Reinnervation der Harnblase durch Interkostalnerven [8–10] wird es ebenfalls entscheidend sein, intraoperativ zu diagnostizie-

ren, welche Nervenfaserguppen durch welche Wurzeln ziehen, um Fehlanpassungen bei der Reinnervation zu vermindern.

**Natürliche Impulsmuster und Elektrostimulation**

Natürliche Impulsmuster von 28 und 22 Hautrezeptoren, welche durch Nadelstiche ausgelöst wurden, sind in *Abb. 6* schematisch dargestellt. Solche gleichzeitige afferente Impulsmuster von Haut- und anderen Rezeptoren geben Anlass zur Selbstorganisation neuronaler Netzwerke des ZNS im allgemeinen und des Rückenmarkes im speziellen. Bei der Elektrostimulation von Nerven (z.B. N.phrenicus) können solche ort- und zeitabhängige Impulsmuster weder bei Afferenzen noch bei Efferenzen simuliert werden. Die elektrisch ausgelöste (rhythmische) gleichzeitige Erregung vieler oder aller Fasern der Nerven gibt daher Anlass zu einer unnatürlichen Netzwerkorganisation. Bei der Elektrostimulation eines Patienten sollte daher bedacht werden, welche Auswirkungen solche unnatürlichen Impulsmuster auf die Gesundheit des Patienten haben können. Bei der elektrischen Reizung efferenter Nerven-

fasern muss versucht werden, die natürliche Aktivität von  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneuronen so weit wie möglich zu simulieren, damit die Muskelfasern nicht überlastet werden. Bei der direkten Muskelreizung, um zum Beispiel einer Muskelinaktivitätsatrophie vorzubeugen, sollte möglichst mit natürlichen Mustern (siehe unten) gereizt werden. Ferner sollte bedacht werden, dass auch afferente Fasern in Muskel und Haut, einschliesslich Muskelspindelafferenzen und Schmerzfasern, gereizt werden.

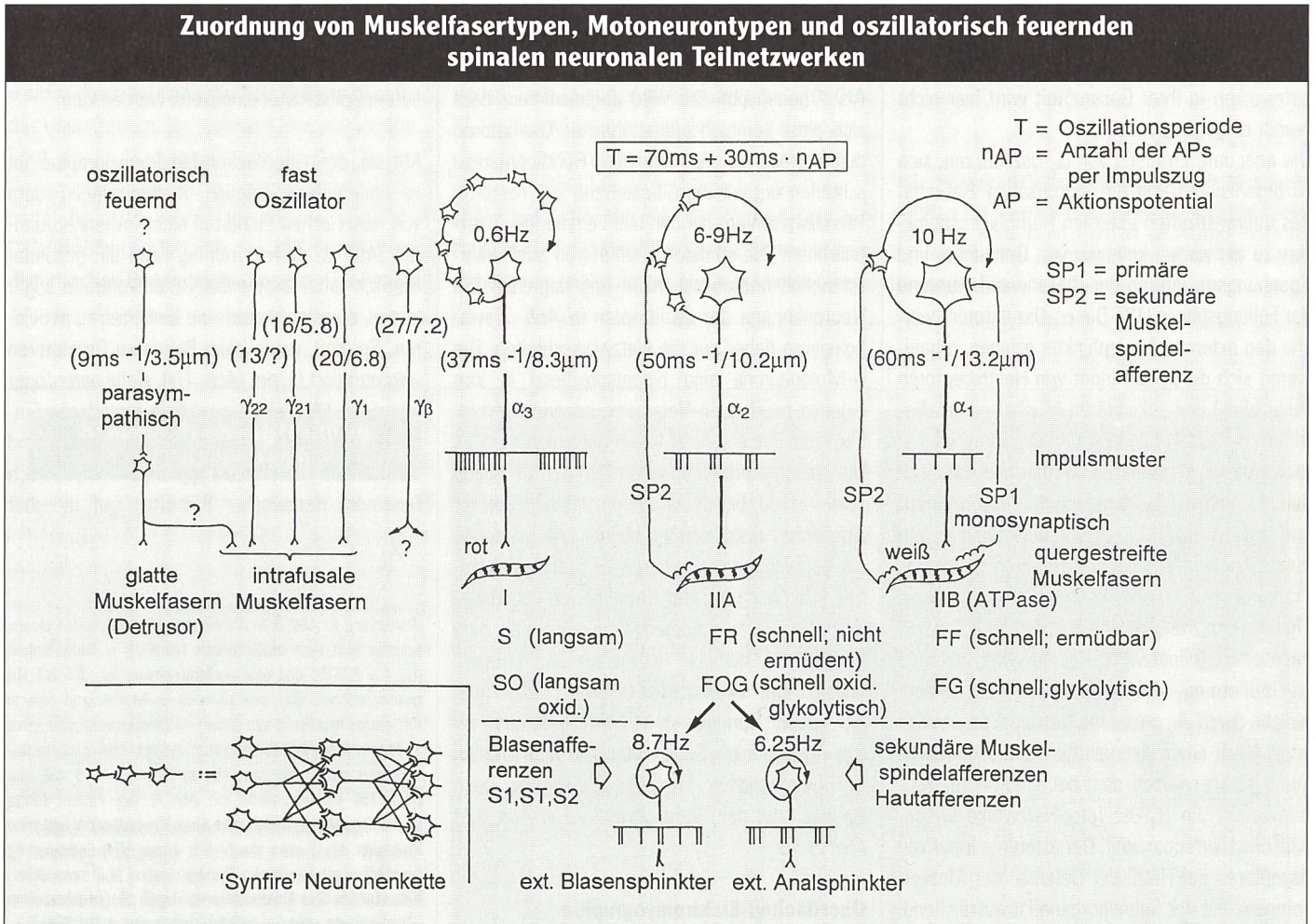
Ferner muss daran erinnert werden, dass mit unnatürlicher Impulsmusterreizung auch unnatürliche Netzwerkorganisationen erzeugt werden. Die Elektrostimulation ist daher nicht geeignet für die Erforschung von natürlichen integrativen Funktionen des ZNS.

**Rückenmarkoszillatoren und integrative Funktionen des menschlichen ZNS**

Mit der Analyse der natürlichen Impulsmuster afferenter und efferenter Nervenfasern wurde eine grundsätzliche Organisationsform des menschlichen Rückenmarks auf unterster horizontaler Ebene entdeckt: die prämotorischen spinalen

Oszillatoren (biologische schwingungsfähige Systeme) [7]. Die spinalen Oszillatoren sind prämotorische neuronale Teilnetzwerke, die sich aufgrund von adäquaten Impulsmustern adäquater Afferenzen (z.B. der Rezeptoren von Muskelspindeln, Haut und Harnblase) und/oder deszendierender Bahnen selbst organisieren und desorganisieren und die Motoneurone entsprechend ihres Fasertypes bei hoher Erregung zu rhythmischem Feuern anregen. Die Motoneurone sind höchst wahrscheinlich ein Teil dieser rhythmisch schwingenden Netzwerke (*Abb. 7*) [16]. Die spinalen Oszillatoren liegen im Rückenmark, da das

*Anmerkung zu Abb. 7:* Der Frequenzbereich der  $\alpha$ -Motoneurone (FF) ist etwa 7 bis 13 Hz.  $\alpha$  = Motoneuron;  $\gamma_1, \gamma_2$  = dynamische und statische Fusimotoren; parasympathisch = präganglionäres parasympathisches Motoneuron; S1, ST, S2 = Spannungs-, Dehnungs- und Flussrezeptorafferenzen der Harnblase. Die oscillatorisch feuernden Teilnetzwerke werden hier symbolisiert durch Neuronketten, wobei jedes Neuron oder jede Neurongruppe schematisch 30 ms verbraucht. Die Ersetzung der Neuronketten durch «Synfire-Ketten» (links unten im Bild) kommt der Realität schon näher. Warscheinlich aber wird das oscillatorische Feuern durch erregende und hemmende Netzwerkrückkopplungen erzeugt.

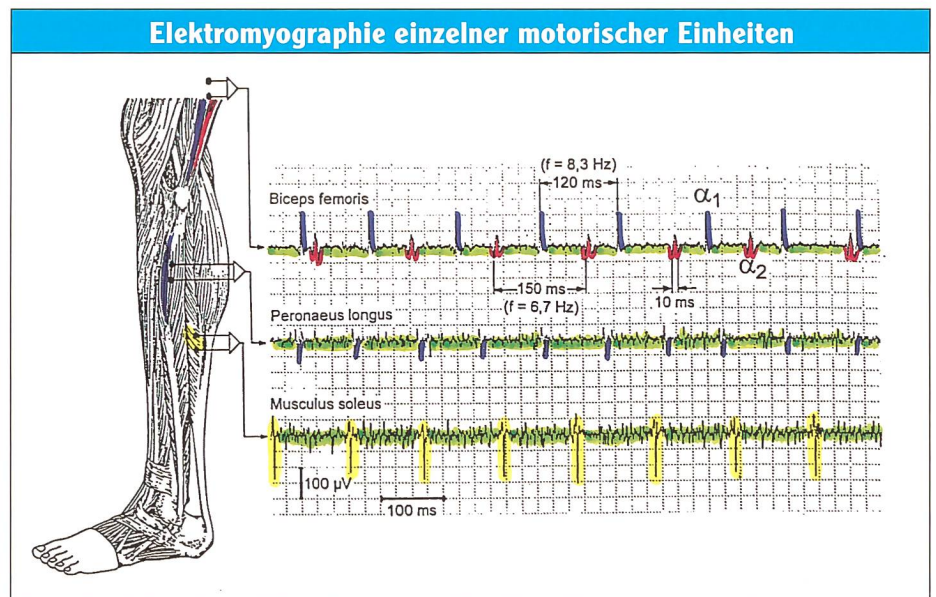


**Abb. 7:** Vereinfachte Zuordnung von Muskelfasertypen, Motoneurontypen und oszillatorisch feuernden spinalen neuronalen Teilnetzwerken, basierend auf biochemischen, morphologischen und physiologischen Eigenschaften.



rhythmische Feuern der Motoneurone auch bei komplett Rückenmarkverletzten gemessen wurde [12]. Die  $\alpha_1$ -Motoneurone (FF) feuern mit Frequenzen um 10 Hz (Bereich 7–13 Hz) mit Impulszügen bestehend aus 1 Aktionspotential (AP);  $\alpha_2$ -Motoneurone (FR) feuern mit 6 bis 9 Hz mit 2 bis 5 APs je Impulszug und  $\alpha_3$ -Motoneurone (S) mit etwa 1 Hz und Impulszügen bestehend aus etwa 40 APs. Die Oszillationsperiode (T) ist näherungsweise proportional zur Anzahl der APs per Impulszug ( $n_{AP}$ ) und kann annähernd beschrieben werden durch die Formel  $T = 70 \text{ ms} + 30 \text{ ms} \cdot n_{AP}$ . Ein typischer  $\alpha_2$ -Oszillator, der mit 3 APs alle 160 ms feuert ( $T = 70 \text{ ms} + 30 \text{ ms} \cdot 3 = 160 \text{ ms}$ ), kann sein Impulsmuster ändern zu 2 APs alle 130 ms bei geringerer bzw. zu 4 APs alle 190 ms bei erhöhter Aktivierung. Bei sehr niedriger Aktivierung feuern die Motoneurone gelegentlich, d.h. etwa alle 3s (0,33 Hz). Die Oszillatoren haben sich im neuronalen Netzwerk nicht mehr ausgebildet, ein anderer Organisationszustand in den entsprechenden neuronalen Netzwerken des Rückenmarkes hat sich ausgebildet. Es ist wahrscheinlich, dass bei der Organisation der neuronalen Netzwerke des Rückenmarkes sich noch andere rhythmisch schwingende Teilnetzwerke ausbilden, welche nur aus Interneuronen aufgebaut sind (proprio-spinale Oszillatoren). Auf die komplexe Organisationsform von rhythmisch schwingenden Teilnetzwerken in ihrer Gesamtheit wird hier nicht weiter eingegangen.

Die adäquate Erregung von  $\alpha_2$ -Oszillatoren, sich zu organisieren und die motorischen Einheiten des quergestreiften externen Harnblasensphinkters zu aktivieren, kommen von Dehnungs- und Spannungsrezeptoren der Blasenwand während der Füllungsphase [13]. Die  $\alpha_2$ -Oszillatoren, welche den externen Analsphinkter erregen, organisieren sich durch den Input von Hautrezeptoren (Analreflex) und sekundären Muskelspindelafferenzen des Beckenbodens und externen Sphinkteren. Die  $\alpha_1$ -Oszillatoren werden hauptsächlich durch primäre Muskelspindelafferenzen erregt und organisiert [16].  $\alpha_3$ -Oszillatoren bilden sich durch einen polymodalen afferenten Input aus. Prämotorische  $\alpha_1$ -Oszillatoren zeigen wenig Eigenrhythmizität, welche wahrscheinlich durch ein kleines Teilnetzwerk erzeugt wird, während  $\alpha_3$ -Oszillatoren viel Eigenrhythmizität zeigen, welche durch ein grösseres Netzwerk organisiert wird. Nach einer inkompletten Querschnittslähmung ist zu erwarten, dass bei einer Reorganisation zuerst die  $\alpha_3$ -Oszillator-Netzwerke wieder willkürlich erregbar sind. Der afferente Input von Rezeptoren der Haut, der Gelenke, der Muskelspindeln und der Sehnenorgane ist ausreichend, um spinale Oszillatoren zu organisieren und sie durch sich ändernde Oszillatorkopplungen (Rhyth-



**Abb. 8:** Extrazelluläre elektrische Ableitungen (Elektrodenabstand = 15 mm) von einzelnen motorischen Einheiten der Muskeln Biceps femoris, Peroneus longus und Soleus des linken Beines des inkompletten Tetraplegikers (Abbildung 12, Verletzung sub C5).

muskopplungen) zu makroskopischen Funktionen wie z.B. Gehen oder Rennen zu rekrutieren. Andererseits können prämotorische Oszillatoren durch willkürliche rhythmische oder nicht-rhythmische Kontraktionen zum Schwingen angeregt werden, unterstützt durch den kontraktionsinduzierten re-afferenten Input.

Als Arbeitshypothese wird angenommen, dass sich diese spinalen prämotorischen Oszillatoren durch erregende und hemmende Rückkopplungsschleifen organisieren, bestehend aus netzartig verschalteten erregenden und hemmenden Interneuronen. Die spinalen Oszillatoren sind wahrscheinlich anatomisch nicht eng begrenzt. Die Neuronenringe der Oszillatoren in Abb. 7 symbolisieren daher nur die Netzwerkschleifen. Die  $\alpha$ -Motoneurone sind typentsprechend in ihre eigenen neuronalen Netzwerke integriert und innervieren ihre eigenen Muskelfasertypen (Abb. 7). Die spinalen prämotorischen Oszillatoren haben zwei Phasen, bei denen sie mittels somatischer Afferenzen erregt werden können und bei denen sie Kopplungen mit anderen Oszillatoren eingehen [16]. Auch bei der Koordination von rhythmischen Arm- und Beinbewegungen treten zwei Phasen auf, nämlich «in Phase» und «Gegenphase». Eine Beininkoordination «in Phase» liegt z.B. beim Springen mit beiden Beinen vor (Springen wie ein Spatz), und eine Koordination in «Gegenphase» liegt beispielsweise beim Springen auf dem Sprungbrett wie in Abb. 12A (Teil 2) vor.

#### Oberflächen-Elektromyographie

Die Einzelnervenfaser-Aktionspotential-Messmethode ist zur Erforschung von integrativen Funk-

tionen des ZNS geeignet, weil mit ihr gleichzeitig natürliche afferente und efferente Impulsmuster gemessen werden können und damit Regulationsfunktionen des Rückenmarkes und teilweise auch supraspinaler Zentren analysiert werden können. Der Nachteil dieser Messmethode ist, dass sie nur während der Operation bei geöffnetem Spinalkanal eingesetzt werden kann.

Mittels der Oberflächen-Elektromyographie ist es andererseits möglich, rhythmisches Feuern von motorischen Einheiten nicht invasiv abzuleiten (Abb. 8). Durch Training kann ein gesunder Mensch unter Biofeedback-Sichtkontrolle sogar lernen, einzelne motorische Einheiten zu aktivieren. Speziell, wenn beim Patienten Oszillatoren unkontrolliert feuern (Abb. 11A, siehe unten) oder wenn bei Muskeln nur wenige motorische Einheiten willkürlich aktiviert werden können, sind wechselnde Rhythmuskopplungen rhythmisch feuender motorischer Einheiten gut messbar

*Anmerkung zu Abb. 8:* In der Ableitung des Musculus biceps femoris sind eine oszillatorisch feuernde  $\alpha_1$ -Motoreinheit ( $\alpha_1$ ;  $f = 8,3 \text{ Hz}$ ) und eine  $\alpha_2$ -Motoreinheit ( $\alpha_2$ ;  $f = 6,7 \text{ Hz}$ ) gekennzeichnet. Das innervierende  $\alpha_1$ -Motoneuron feuerte mit einem Impulszug von einem Aktionspotential alle etwa 120 ms und das  $\alpha_2$ -Motoneuron mit einem Impulszug, bestehend aus zwei Aktionspotentialen (Intervall = 10 ms), alle etwa 150 ms (vergleiche mit Abb. 7). Der Patient führte willkürlich gegen Widerstand eine Plantarflexion und eine Pronation des Fusses durch. Bei dieser Willküraktivierung liegt keine offensichtliche Synchronisation von motorischen Einheiten vor. Die Ableitelektroden liegen aus zeichnerischen Gründen nicht an den wirklichen Ableitstellen. Die Registrierung entstand in Zusammenarbeit mit Dr. Yves Blanc, Laboratoire de Cinesiologie, Hôpital Cant. Universitaire, Genève.

[16]. Das Verhalten sogar einer einzelnen motorischen Einheit kann mit Oberflächenelektroden beim Patienten ausgemessen werden, wenn durch Zufall nur eine oberflächlich liegende motorische Einheit in einem Muskel vom Patienten willkürlich aktivierbar ist.

### Elektromyographische Kinesiologie

Mittels Oberflächenelektroden und Fusschaltern zur Bestimmung von Stand- und Schwungphasen kann das Aktivierungsmuster von bestimmten Muskeln von Patienten beim Gehen, Rennen und Springen gemessen werden und mit physiologischen motorischen Bewegungsmustern verglichen werden [16]. Durch Anbringen von Leuchtpunkten an den Beinen und Videoaufnahmen können mit dem Computer genaue Bewegungsabläufe dargestellt werden [16]. Die elektromyographische Kinesiologie (siehe z.B. [16]) ist somit in der Lage, uns genaue Geh- und Rennanalysen zu liefern. Sie gibt uns aber keine Information darüber, wie das Nervensystem umorganisiert werden kann, um wieder physiologisches Gehen zu erreichen. Dies sei an einem Beispiel hier erläutert. Der Patient der *Abb. 13C* mit Rückenmark- und Hirnverletzung (siehe unten) überstreckte beim Gehen (nicht beim Rennen in der Rennanlage!) immer das rechte Knie, was mittels der elektromyographischen Kinesiologie bestätigt wurde. Abhilfe konnte geschaffen werden durch eine angefertigte Schiene, welche das Überstrecken des rechten Knies verhinderte. Statt dieser mechanischen Denkweise, die zur Bewegungsverbesserung mechanische Hilfsmittel benutzte, wurde therapeutisch auf die Umorganisationsfähigkeit des ZNS, speziell bei rhythmischen Bewegungen, gesetzt. Der Patient

trainierte das Gehen mit gebeugten Knien, einer Art Entengang, bei welchem er das Knie nicht überstrecken konnte. In mehreren Wochen Training richtete er sich dann immer mehr und mehr beim schnellen Gehen auf, mit der Intention, nicht zu überstrecken. Jetzt, nach dreimonatigem Training, überstreckt der Patient das Knie nicht mehr, er benötigt also keine Schiene mehr, obwohl Streck- und Beugespastik und Störungen beim Balancehalten noch immer nicht ganz überwunden sind (22 Monate nach dem Autounfall).

### Aussagekraft der Messung der prämotorischen Oszillatoren für eine Therapiebegündung

Mittels der Einzelnerfaser-Aktionspotentialmessmethode und der Oberflächenelektromyographie wurde das rhythmische Feuern von Axonen von verschiedenen Motoneuronentypen und das rhythmische Feuern von einzelnen motorischen Einheiten gemessen beim Gesunden und deren Veränderungen nach ZNS-Verletzungen [12]. Diese Messungen geben somit Information über die Organisation prämotorischer neuronaler Netzwerke, welche diese Rhythmen erzeugen. Sie geben uns keine direkte Information über mögliche mehr rostral liegende Netzwerke, welche mit diesen prämotorischen Oszillatoren vernetzt sind. Aber einerseits sind Rhythmen, relative Rhythmuskopplungen und Synchronisationen auch in supraspinalen Zentren zu finden [5, 17, 21] und andererseits gehen alle Bewegungen über diese prämotorischen neuronalen Netzwerke. Darüber hinaus scheinen bei der Organisation der prämotorischen Oszillatoren und der Organisation des visuellen Cortex Ähnlichkeiten zu bestehen (siehe unten). Diese prämotorischen

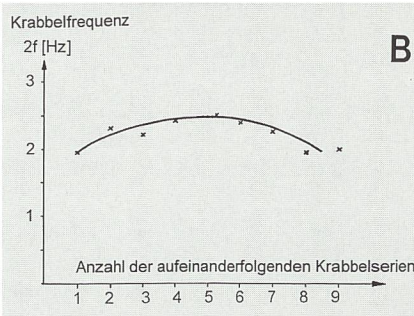
neuronalen Netzwerke sind daher eine wichtige ZNS-Struktur und sind aufgrund der besonderen Anatomie des Menschen mit den dünnen langen Nervenwurzeln in ihren Regelmechanismen ausmessbar (siehe oben).

### Gedächtnis des Rückenmarks

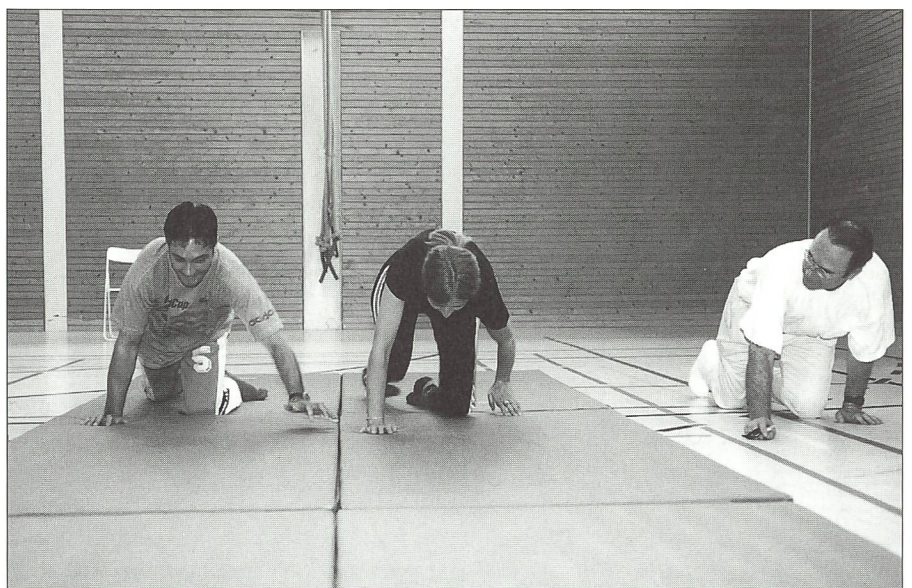
Es ist gemessen worden, dass Oszillatoren des Rückenmarkes nach wiederholter willkürlicher Muskelaktivierung wieder mit den gleichen Phasenrelationen zu anderen Oszillatoren schwingen können [16]. Die neuronalen Netzwerke hatten also über viele Sekunden den vorherigen Aktivierungszustand gespeichert. Das Gedächtnis des Rückenmarkes kann auch bei einem Intervalltraining klinisch gemessen werden mittels der Bewegungsverbesserung von einer Bewegungsserie zur nächsten. Die Verbesserung des gespeicherten Bewegungszustandes im Rückenmark (und supraspinaler Zentren) wird in *Abb. 9* bei gleichzeitiger Verbesserung der Bewegungsausführung durch die Krabbelfrequenz quantifiziert, welche sich mit aufeinanderfolgenden Krabbelserien erhöht (z.B. mit weniger Nachziehen des «schlechten» Beines). Mit aufkommender Erschöpfung sinkt dann die Frequenz wieder, und die Bewegungsausführung wird schlechter.

*Anmerkung zu Abb. 9:* Krabbelserienintervall = 1 min; Krabbelstanz = 5 m. Da annähernd etwa immer die gleiche Distanz gekrabbelt wurde (5 m), korreliert der Anstieg und Abfall der Frequenz mit dem Anstieg und Abfall der Krabbelgeschwindigkeit.

### Krabbel-Intervalltraining (Kurzzeitgedächtnis)



**Abb. 9:** Gedächtnis des Rückenmarkes. Rechts: Patientin krabbelt mit dem Trainer (Autor G.S.) und anderem Patienten (Wettkrabbeln). B. Typischer Anstieg und Abfall der Krabbelfrequenz in Abhängigkeit von den aufeinanderfolgenden Krabbelserien.



## Reflexe und Selbstorganisation neuronaler Netzwerke

W.R. Hess definierte den Reflex «als die Beantwortung eines sensiblen Reizes in Form einer gebahnten unwillkürlichen Betätigung bestimmter Erfolgsorgane». Der Reflex wird nach dem von ihm erfüllten Zweck benannt. Beim monosynaptischen Dehnungsreflex gibt der Reflex Information über eine ganz spezielle Verschaltung des Rückenmarkes, nämlich die monosynaptische Umschaltung von primären Muskelspindelafferenzen auf  $\alpha_1$ -Motoneurone (FF). Im allgemeinen aber ist ein Reflex eine spezielle zweckbedingte Reaktion (z.B. Schutzreflex) des zentralen Nervensystems (ZNS), welche keine oder nur wenig Information über die integrative Organisation des ZNS liefert. Heute ist man der Ansicht, dass das Rückenmark im allgemeinen nicht durch Neuronketten fest verschaltet ist, sondern dass sich präformierte neuronale Netzwerke entsprechend den Impulsmustern adäquater Afferenzen und supraspinaler Zentren z.B. zu makroskopischen Bewegungsgeneratoren organisieren und so zu natürlichen Bewegungsmustern Anlass geben (siehe unten). Bei der Erzeugung unnatürlicher Impulsmuster im Nervensystem, wie z.B. bei der Elektrostimulation, werden sich dagegen im allgemeinen unnatürliche Netzwerkorganisationen ausbilden.

## Fehlorganisation neuronaler Netzwerke nach Rückenmarkverletzung

Nach Rückenmarkverletzung organisieren sich die neuronalen Netzwerke anders, was an vier Veränderungen der Organisation von prämotorischen Oszillatoren quantifiziert wurde [12, 16]:

1. Nach Rückenmarkverletzung erweitert sich das Frequenzband der Oszillatoren stark (Abb. 10). Die Oszillatoren schwingen jetzt mehr oder weniger unrythmisch.
2. Die Phasenrelationen zwischen den schwingenden Oszillatoren und zwischen den Oszillator-Impulszügen und den antreibenden Aktionspotentialen der adäquaten Afferenzen (z.B. Muskelspindelafferenzen) sind sehr instabil geworden (Seite 15 in [16]). Die neuronalen Teilnetzwerke (die Oszillatoren) des Rückenmarkes unterhalb der Verletzungsstelle sind in ihrer Zusammenarbeit instabil geworden.
3. Die spinalen Oszillatoren können teilweise vom Patienten nicht mehr ganz kontrolliert werden. Para- und tetraparetische Patienten können manchmal die Motoneurone zu oszillatorischem Feuern «anschieben», aber sie können das Feuern nicht mehr «abschalten» (Abb. 11).

## Verteilung von $\alpha_2$ -Oszillationsfrequenzen beim gesunden, hirntoten und rückenmarkverletzten Menschen

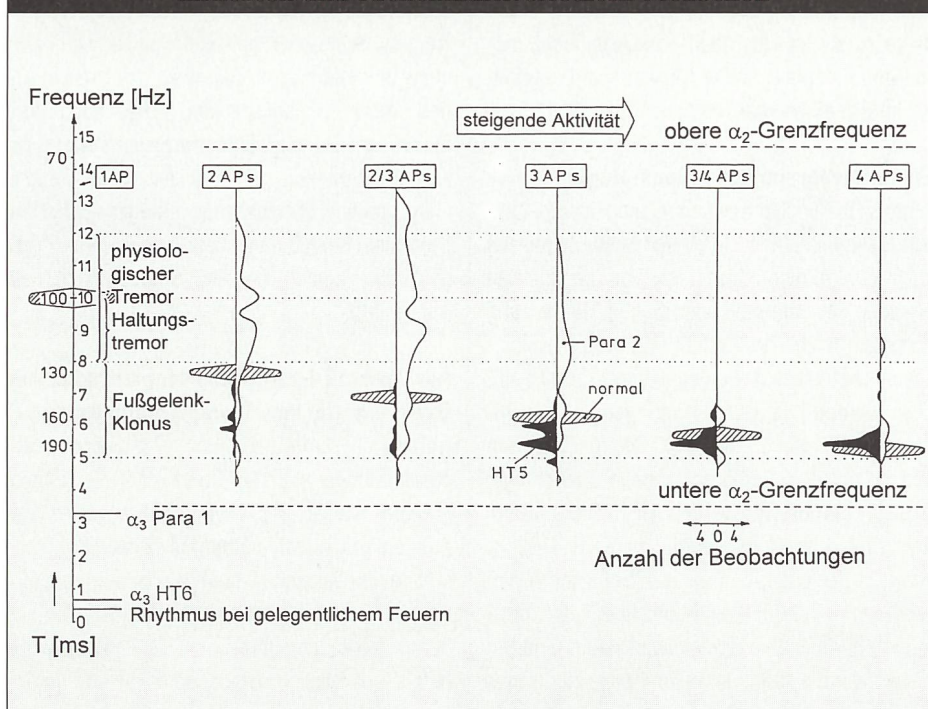


Abb. 10: Frequenzverteilungen der Oszillationen von kontinuierlich feuernden  $\alpha_2$ -Motoneuronen bei steigender Zahl von APs pro Impulszug (auch steigende Aktivität der motorischen Einheit) bei einem Rückenmarkverletzten (Para 2, offene Verteilung), einem Hirntoten (HT5, schwarze Verteilung) und einem gesunden Menschen (normal, schraffierte Verteilung).

4. Bei niedriger Netzwerkerregung, wenn sich die prämotorischen Oszillatoren noch nicht organisiert haben und die Motoneurone nur manchmal feuern (occasional firing mode), werden die Motoneurone pathologisch rekrutiert [11].

Die erweiterten Frequenzbänder der Oszillatoren, die entstandene Phaseninstabilität zwischen den Oszillatoren, die teilweise verlorene Kontrolle über die Oszillatoren und das falsche Rekrutement der Motoneurone bei niedriger Erregung deuten auf eine gestörte Selbstorganisation der neuronalen Netzwerke des Rückenmarkes hin und können teilweise die Spastik als falsche ZNS-Netzwerkorganisation erklären. Das teilweise unkontrollierte Feuern der spinalen Oszillatoren scheint mit einem pathologischen motorischen Programm der sich selbstorganisierenden spinalen Bewegungsmustergeneratoren des Bewegungsmuster erzeugenden Netzwerkes (MPN) zu korrelieren.

Eine therapiebedingte Verbesserung der Organisation des ZNS kann elektromyographisch gemessen werden mittels der Aktivitätsniveaus, der Aktivitätsverteilungen und den Zeitpunkten von Muskelaktivierungen (also des motorischen Programms) während rhythmischer und nicht

rhythmischer Bewegungen. Eine Therapieverbesserung sollte aber auch auf der Basis physiologischer und pathophysiologischer Schwingungsmuster der spinalen Oszillatoren und durch eine weniger falsche Rekrutierung der spinalen Oszillatoren nachgewiesen werden können.

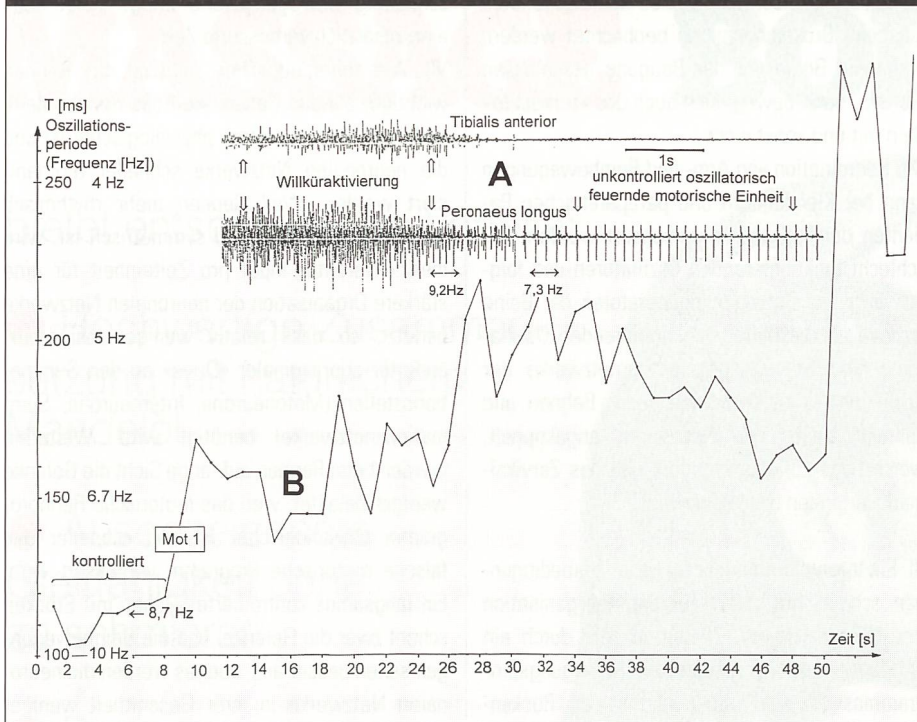
## Basis für die Therapie bei ZNS-Verletzungen

### Verbesserung der Organisation neuronaler Netzwerke durch das Oszillator-Formationstraining

Als Konsequenz der Grundlagenforschung eröffnen sich therapeutische Anwendungen für paraparetische, tetraparetische und hirngeschädigte Patienten. Wenn sich die neuronalen Netzwerke

Anmerkung zu Abb. 10: Frequenzen von  $\alpha_3$ -Motoneuronen und gelegentlichem (tonischem) Feuern (0,33 Hz) sind eingezeichnet. Frequenzbänder von physiologischem Tremor, Haltungstremor und Fußgelenk-Klonus sind ebenfalls eingezeichnet. Es ist aus der Abbildung ersichtlich, dass die Frequenzen beim Hirntoten zu niedrig und beim Rückenmarkverletzten (langanhaltendes isoliertes Rückenmark) zu hoch sind im Vergleich zu den normalen Werten (schraffiert). Weiterhin ist offensichtlich, dass die Frequenzbänder beim Rückenmarkverletzten viel ausgedehnter sind als beim Hirntoten und beim Gesunden.

### Willkürlich kontrolliert und unkontrolliert feuernde motorische $\alpha_1$ -Einheit



**Abb. 11:** Kontrolliertes und unkontrolliertes Feuern einer  $\alpha_1$ -motorischen Einheit (Mot 1) bei einem inkomplett Rückenmarkverletzten sub C4/5.

des Rückenmarkes unterhalb der Verletzungsstelle pathologisch organisieren, dann muss die Funktion der spinalen Oszillatoren so verbessert werden, dass sie sich wieder zu rhythmischem Feuern organisieren und stabiler und spezifischer koppeln. Die neuronalen Netzwerke des Rückenmarkes und der supraspinalen Zentren müssen so trainiert werden, dass sich ihre Selbstorganisation derart verbessert, dass beim Patienten physiologische Funktionen, wie z. B. Gehen, zunehmen und pathophysiologische Funktionen, wie Spastizität, zurückgedrängt werden. Die Annahme ist, dass die Rhythmusverbesserung der biologischen Oszillatoren durch Rhythmus-Trainingsmethoden erreicht wird, obwohl die Frequenzen der Bewegungen oft andere sind als die

der Oszillatoren. Die  $\alpha_3$ -Oszillatoren haben Frequenzen im Bereich der Rhythmen der trainierten Bewegungen und die  $\alpha_2$ - und  $\alpha_1$ -Oszillatoren zeigen Frequenzen, die ein Vielfaches von denen der Bewegungen betragen [16]. Energetisch günstige Rhythmen können von Therapeutinnen und Therapeuten erspürt werden. Optimale Frequenzen rhythmischer Bewegungen wurden 1928 von Kurt Wacholder aus Breslau publiziert [20].

#### Externe Schleife von spinalen Oszillatoren zu deren Funktionverbesserung durch Rhythustraining

Gleichzeitig gemessene Aktionspotential-Abstände von  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneuronen und Muskelspindelafferenzen und Phasenrelationen zwischen den Aktionspotentialen der einzelnen Fasern haben gezeigt, dass die prämotorischen Oszillatoren des Rückenmarkes über die Muskelspindeln externe Schleifen zu den Beinmuskeln aufbauen können und somit durch Bewegungen direkt trainiert werden können [16]. Die Aktivität von Muskelspindel- und anderen Afferenzen organisiert und treibt die prämotorischen Oszillatoren an. Aber dies bedeutet nicht, dass die  $\gamma$ -Schleife eine externe Schleife der prämotorischen Oszillatoren geworden sein muss. Nur die Ähnlichkeit von Aktionspotential-Abstandsverteilungen von  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneuronen und Muskelspindelafferenzen bei annähernd konstanten

Phasenrelationen zwischen den Aktionspotentialen der Nervenfasern ist ein Mass für die Ausbildung einer externen Schleife [16].

Das Ausbilden externer Schleifen von Oszillatoren zur Peripherie eröffnet die Möglichkeit, die prämotorischen spinalen Oszillatoren direkt mit einem Rhythustraining, wie Springen auf einem Sprungbrett oder Rennen, zu trainieren. Mittels der Aktivität aus den externen Schleifen und der Aktivität anderer Afferenzen kann die Organisation der neuronalen Netzwerke des geschädigten ZNS in der Weise verändert werden, dass wieder mehr physiologische Bewegungen beim Patienten erreicht werden. Im folgenden wird gezeigt, dass rhythmisch dynamisch stereotype symmetrische Bewegungen besonders effektiv bei der Reorganisation des ZNS zum Wiedererlernen nützlicher physiologischer Funktionen sind (wie z. B. das Gehen).

#### Wissenschaftliche Basis für die Reorganisation neuronaler Netzwerke nach ZNS-Verletzungen

Eine Reorganisation des verletzten ZNS für das Wiedererlernen von Bewegungen und autonomen Funktionen wird durch folgende Argumente gestützt:

I. Das ZNS des Menschen organisiert sich durch wechselnde Rhythmuskopplungen von oszillatorisch feuernden neuronalen Teilnetzwerken. Das Rhythustraining entspricht daher dem Organisationsprinzip des ZNS. Rhythmizität versteht das ZNS besonders gut, weil es seinem Organisationsprinzip entspricht.

II. Das Training rhythmisch-dynamisch stereotyper Bewegungen ist bei para- und tetraparetischen Patienten bei der Reorganisation von Funktionen des ZNS besonders effizient, weil die neuronalen Netzwerke für solche Bewegungen hauptsächlich im kaudalen Rückenmarkteil angelegt sind, welches meist nicht geschädigt ist. Da neugeborene Kinder automatisch schreiten können [19], scheinen Gehen und Rennen darüber hinaus in der Effizienz von synaptischen Verbindungen und den Membraneigenschaften der Neurone der Netzwerke des Lumbosakralmarkes genetisch angelegt zu sein. Sie sind daher besonders effektiv bei der Reorganisation. Vom 6. Monat etwa an wird dann der Schreitautomatismus des Kleinkindes von Willkürbewegungen überlagert. Generell kann das ZNS durch folgende Bewegungen besonders effektiv reorganisiert werden:

1. Genetisch angelegte Bewegungen (Rennen, Gehen, Krabbeln),
2. Alteingelernte Bewegungsmuster, welche hauptsächlich im Rückenmark gespeichert sind (Treppensteigen, Tennis spielen, Schwimmen, Skilaufen, ...),
3. Bewegungen, wel-

#### Anmerkung zu Abb. 11:

- A. Nach der Willküraktivierung der Muskeln Tibialis anterior und Peroneus longus feuert eine  $\alpha_1$ -motorische Einheit rhythmisch weiter und kann erst nach mehrfachen Versuchen der Relaxation wieder abgestellt werden. Während der Willküraktivierung ist eine Frequenz von 9,2 Hz angegeben und beim unkontrollierten Feuern eine von 7,3 Hz. Das unkontrollierte Feuern hat also eine niedrigere Frequenz.
- B. Frequenzen (und Oszillationsperioden) des unkontrollierten Feuerns der motorischen  $\alpha_1$ -Einheit in Abhängigkeit von der Zeit. Jeder Wert repräsentiert 5 bis 10 Oszillationen. Das Abfallen der Frequenz unter 4 Hz, des im Mittel mit 10 Hz feuernden Oszillators, deutet auf pathologische Funktion hin.

che die Organisation der neuronalen Netzwerke in bezug auf Rhythmen, Phasen und Symmetrien verbessern (beim Springen auf einem Sprungbrett wird die Phasenkopplung durch rhythmische Synchronisation in «Gegenphase» (Abb. 12A und 15A) verbessert) und 4. Bewegungen des täglichen Lebens. Es müssen jene Bewegungen wiedererlernt werden, welche benötigt werden.

III. Da rhythmisch dynamisch stereotype symmetrische Bewegungen im Rückenmark hauptsächlich durch den bewegungsinduzierten afferenten Input aus der Peripherie organisiert werden, sind nur wenig auf- und absteigende Bahnen für ihre Aktivierung notwendig. Beim Affen waren 5–10 Prozent der auf- und absteigenden Nervenfasern ausreichend für die Fortbewegung, ohne Reorganisationstraining des ZNS [2]. Bei vielen paraparetischen Rückenmarkverletzungen sollten solche Faserzahlen erhalten geblieben sein.

IV. Spinale Bewegungsmuster, welche im wesentlichen in den neuronalen Netzwerken unterhalb der Rückenmarkverletzung lokalisiert sind, können ein Bewegungsmuster näherungsweise physiologisch aktivieren, weil die Bewegungsmuster relativ starr ablaufen und auch nur wenig geschädigt sind. Es können also auch Muskeln aktiviert werden, die sich willkürlich nicht kontrahieren lassen. Durch das Training rhythmisch dynamisch stereotyper symmetrischer Bewegungen kann verhindert werden, dass sich die nicht willkürlich aktivierbaren Muskeln durch Inaktivitätsatrophie zurückbilden, so dass Erholungen des ZNS bis zu zehn Jahren und mehr nach der Verletzung vom Patienten noch voll genutzt werden können.

V. Verletzungsbedingte rechts-links Ungleichheiten (ein Bein ist meistens «schlechter» als das andere) können teilweise durch ausgelöste «Mitbewegungen» ausgeglichen werden. Durch eine genau gleichzeitige afferente Erregung der Oszillatoren «in Phase» oder in «Gegenphase» für die Aktivierung der beiden Beine werden die spinalen Oszillatoren und damit auch die Bewegungsmuster erzeugenden Netzwerke stärker

gekoppelt, so dass sich das «schlechte» Bein mitbewegt (Symmetrieverbesserung). Die Mitbewegung des «schlechten» Beines kann besonders gut beim Brustschwimmen beobachtet werden: wenn die Beine vor der Beugung geschlossen werden, dann bewegt sich auch das «schlechte» Bein mit und sonst nicht.

Die Koordination von Arm- und Beinbewegungen kann bei Kleinkindern und paraparetischen Patienten durch Krabbeln verbessert werden. Die schlecht funktionierenden Oszillatoren und folglich auch die Bewegungsgeneratoren der Beine werden an die richtig funktionierenden Oszillatoren und Bewegungsgeneratornetzwerke der Arme mittels rückenmarkseigener Bahnen und spinaler neuronaler Netzwerke angekoppelt, welche das Lumbosakralmark und das Zervikalmark verbinden bzw. vernetzen.

VI. Ein Intervalltraining unter Leistungsbedingungen scheint besonders für die Reorganisation des Nervensystems effektiv zu sein durch ein «Abdating» des gespeicherten Bewegungsprogrammes im Kurzzeitgedächtnis des Rückenmarkes. Man nimmt an, dass eine wiederholte Verbesserung des Bewegungsprogrammes im Kurzzeitgedächtnis langsam zu einer Übernahme ins Langzeitgedächtnis führt und so die Netzwerke für eine verbesserte Selbstorganisation bezüglich der trainierten Bewegungen reorganisiert werden. Die Leistungskontrolle zeigt dem Patienten die Bewegungsverbesserung und motiviert ihn so zu weiterem Training. Der Leistungsdruck ist notwendig, damit sich das Nervensystem bei hoher Erregung umorganisiert, denn nur aktivierte Synapsen ändern ihre Übertragungsstärke, und Netzwerkreorganisationen ergeben sich z.B. auch aus veränderten Synapsenstärken (siehe unten). Das Intervalltraining ist hilfreich, weil das Netzwerk das Bewegungsmuster von einer Bewegungsserie zur nächsten speichert, währenddessen sich die Muskeln erholen können. Bei aufeinanderfolgenden Bewegungsserien von Gehen, Rennen oder Krabbeln verbessert sich die Geschwindigkeit der Bewegung, weil die gespeicherten Bewegungsmuster stetig verbessert und aktualisiert werden, bis ein Abfall der Bewegungsqualität durch Ermüdung

im Muskel und im Nervensystem eintritt. Eine zusätzliche Motivation des Patienten für eine schnellere Bewegungsserie bringt meist noch eine zusätzlich verbesserte Zeit.

VII. Aus therapeutischer Sicht ist das Rennen wichtiger als das Gehen, weil das Rennen beim verletzten Nervensystem physiologischer ist und die neuronalen Netzwerke schneller reorganisiert werden. Weil Rennen mehr rhythmisch dynamisch stereotyp und symmetrisch ist, wird mehr afferenter Input pro Zeiteinheit für eine stärkere Organisation der neuronalen Netzwerke benutzt, so dass relativ weniger läSIONSVERÄNDERTE supraspinale «Drive» an den Summationsstellen (Motoneurone, Interneurone, Summationsnetzwerke) benötigt wird. Weiterhin werden beim Rennen auf lange Sicht die Gelenke weniger belastet, weil das motorische Rennprogramm physiologischer ist und schneller das falsche motorische Programm verbessert wird. Ein langsames kontrolliertes Gehen mit Stöcken schont zwar die Gelenke, und die Beinbewegungen sehen besser aus, aber es werden die neuronalen Netzwerke in ihrer Gesamtheit weniger umorganisiert. Die Regel- und Netzwerkkreise für das Balancehalten werden z.B. kaum trainiert. Auch ist die Umorganisation der Teilnetzwerke langsamer, weil die Netzwerke weniger aktiviert werden. Bei zu geringen Muskelkräften kann freies Rennen (und Gehen) teilweise durch eine Gewichtsreduzierung ermöglicht werden, indem der Patient mit Tragegurten nach oben gezogen wird.

VIII. Das Haken-Kelso-Bunz-Koordinationsmodell gibt Hinweise wie unsymmetrische ZNS-Verletzungen, Intention, Lernen, Zurückdrängen von Spastik und Phasenübergänge zwischen Bewegungszuständen beim Rhythmusstraining, insbesondere beim Springen auf dem Sprungbrett in «Gegenphase» und «in Phase», bei der Selbstorganisation des ZNS zu verstehen sind. Dieses aus der theoretischen Physik kommende Modell beschreibt die Koordinationsdynamik von Bewegungen durch kollektive Parameter und stützt das Konzept von der Reorganisation und veränderten Selbstorganisation des verletzten ZNS durch das Oszillator-Formationstraining.

## Oszillator-Formationstraining

### «Ein Tetraplegiker lernt rennen», Teil 2

Therapiekonzept für die Neurorehabilitation • Reorganisation und Regeneration • Schlussfolgerungen • Referenzen  
in der nächsten «Physiotherapie» Nr. 4/1998

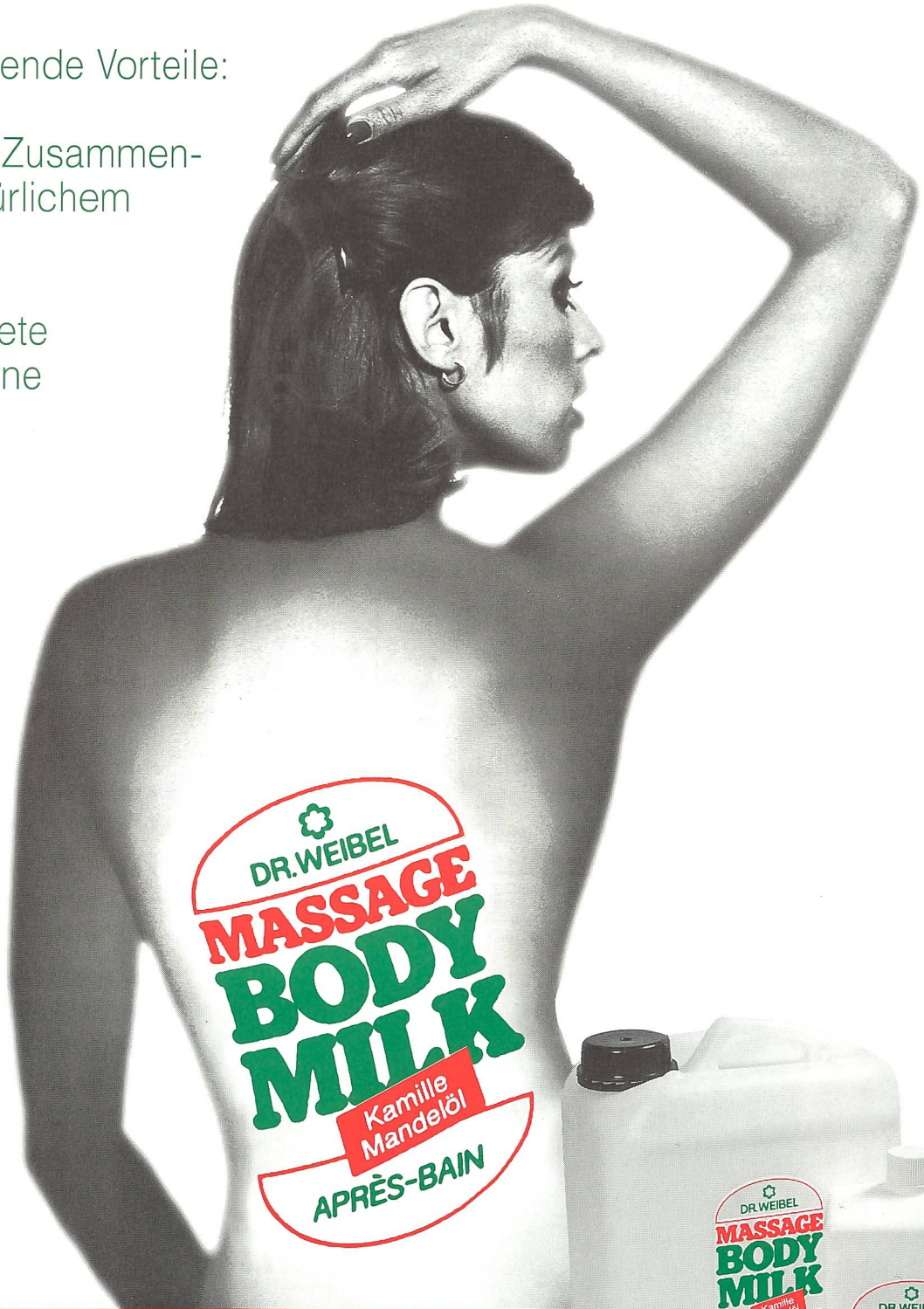


DR. WEIBEL

# MASSAGE BODY MILK

bietet entscheidende Vorteile:

- Hochwertige Zusammensetzung mit natürlichem Mandelöl
- Ausgezeichnete Gleitfähigkeit ohne zu schmieren
- Dezente Parfümierung und gute Verträglichkeit
- Sparsame Anwendung



Dr. Weibel AG  
CH-8035 Zürich

Eine Mundipharma  
Gesellschaft



Unsere Geschäftspartner in der Schweiz:



Medizin  
Therapie  
Rehab

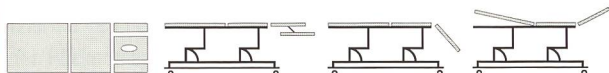
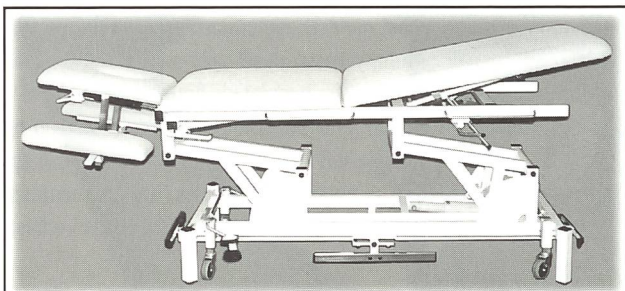
**RESI** *Ihr Partner mit dem zuverlässigen Service*

## MASSAGE- UND BEHANDLUNGLIEGEN

PIAZZA STAZIONE 3  
6600 MURALTO

tel. 091/743 05 05  
fax 091/743 05 06

- 2-bis 10-teilige Liegen
- Manualtherapie-Liegen
- Bobath - Liegen
- Extensions-/Kipp-Tisch
- Robuste Konstruktion mit 2 Jahren Garantie
- Massanfertigung ohne Aufpreis möglich
- Grosse Farbauswahl für Bezug und Rahmen
- Kostenlose Beratung durch unseren Innenarchitekten



JORDAN F+

Fr. 2800,-

- ✓ Masse: 195x70, 5-teilig
- ✓ Absenkbare Armstützen
- ✓ Kopfteil verstellbar, mit Gasfederdämpfer
- ✓ Gesichtsöffnung mit Abdeckung
- ✓ Drainagelagerung der Beine
- ✓ Elektrisch höheverstellbar von 48-108cm
- ✓ Rundum - oder Fusschalter
- ✓ Zentralbremse
- ✓ Gratis Schaumstoffrolle im selben Bezug

Bitte  
berücksichtigen  
Sie beim Einkauf unsere  
Inserenten.

Für **in**serate  
wenden Sie sich bitte an:

Agence WSM  
«Physiotherapie»  
Postfach, 8052 Zürich  
Telefon 01 - 302 84 30  
Telefax 01 - 302 84 38

## MTT

### Medizinische Trainingstherapie

- Wir bieten:
- Doppelte und einfache Zugapparate
  - Vertikale Zugapparate
  - Rotationstrainer
  - Multipositionsbänke, Mobilisations-tische, Winkeltische
  - Hanteln - Stative - Zubehör
  - Moduleinheiten
  - Behandlungsliegen

- Wir bieten:
- Beratung und Verkauf von Einrichtungen
  - Kurse und Schulungen in MTT-Trainingstherapie und Elektrotherapie
  - Permanente, attraktive Ausstellung
  - Prompten Lieferservice und Montageservice
  - Komplettes Serviceangebot

Bei Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung, oder vereinbaren Sie einen Besuchstermin, und wir werden Sie an Ort und Stelle über unsere Produkte näher informieren. Wir freuen uns jedenfalls auf Ihren Kontakt.

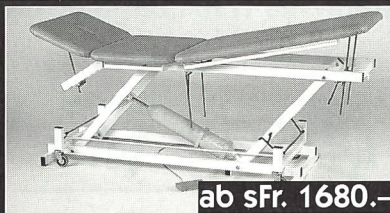
## MTR

Medizin • Therapie • Rehabilitation

Telefon 01 - 787 39 40, Fax 01 - 787 39 41  
Roosstrasse 23, CH-8832 Wollerau

## RehaTechnik

- Massage und Therapieliegen
- Schlingentische und Zubehör



ab sFr. 1680,-

## LEHRINSTITUT RADLOFF

CH-9405 Wienacht-Bodensee  
Telefon 071 - 891 31 90  
Telefax 071 - 891 61 10