

**Zeitschrift:** Physiotherapie = Fisioterapia  
**Herausgeber:** Schweizerischer Physiotherapeuten-Verband  
**Band:** 35 (1999)  
**Heft:** [1]  
  
**Artikel:** Effizienzsteigerung der Koordinationsdynamik-Therapie : Teil 1 :  
Theoretische Grundlagen  
**Autor:** Schalow, Giselher / Zäch, Guido A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-929422>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 07.02.2026

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

# Effizienzsteigerung der Koordinationsdynamik-Therapie

## Teil 1: Theoretische Grundlagen

Giselher Schalow, Neurologie und Rehabilitation, Universitätsspital Tampere, Finnland, und Guido A. Zäch, Schweizer Paraplegiker-Zentrum Nottwil, Klinikdirektor, 6207 Nottwil

Das Wiedererlernen von motorischen und höheren geistigen Funktionen nach ZNS-Verletzung wird als eine Veränderung der Koordinationsdynamik des zentralen Nervensystems (ZNS) angesehen. Die Rate des Wiedererlernens der durch die Verletzung teilweise verloren gegangenen relativen Frequenz- und Phasenkoordination der neuronalen Netzwerke wird stark erhöht durch integratives, instrumentiertes, instruiertes Lernen mit speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegeräten. Die Erhöhung der Wiedererlernrate der spezifischen räumlich-zeitlichen Aktivitätsmuster der vielen Milliarden Neurone der neuronalen Netzwerke des ZNS durch Bewegungen und andere Funktionen des ZNS wird wesentlich bestimmt durch vier Faktoren: (1) Die Genauigkeit der Koordination der Bewegungen während der Therapie, um funktionell getrennte neuronale Netzwerke wieder zu verbinden und nicht bewegliche Gliedmassen wieder anzukoppeln an die Gesamtbewegung, (2) die Erhöhung der Integrativität der Koordinationsdynamik-Therapie, um auch die sehr integrativen Funktionen wie die höheren geistigen Funktionen zu verbessern, (3) die Erhöhung des möglichst physiologischen bewegungsinduzierten re-afferenten Inputs zur Stärkung der physiologischen Selbstorganisation der verletzten neuronalen Netzwerke und deren Kommunikation mit der Aussenwelt durch Regelprozesse und (4) durch die Intensität der Therapie (die «adaptive Maschine ZNS» passt sich nur an, wenn sie gefordert wird).

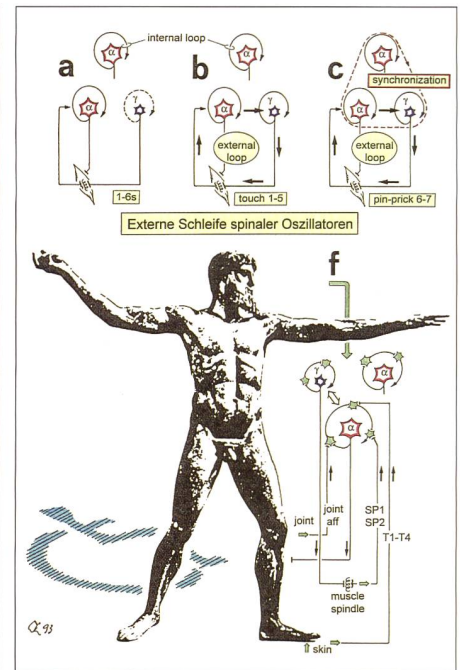
### Theoretische Grundlagen

#### 1. Selbstorganisation des ZNS des Menschen durch relative Frequenz- und Phasenkoordination.

##### Organisationsprinzip für das motorische Lernen

Es ist beim Menschen gemessen worden, dass sich das zentrale Nervensystem (ZNS) im kaudalen Rückenmark aufgrund der natürlichen affe-

renten Impulsmuster mit ihren Verteilungen in Raum und Zeit, der deszendierenden Willkür-Impulsmuster und der im ZNS vorhandenen Koordinationsdynamik selbst organisiert [1–21]. Die Koordinationsdynamik der neuronalen Netzwerke des ZNS (hier gemessen im Rückenmark) ist die Neigung zur Selbstorganisation von Teilnetzwerken zu nichtlinearen Oszillatoren, den sogenannten prämotorischen Oszillatoren (bestehend



**Abb. 53:** Externe Schleife von prämotorischen Oszillatoren. Ausbreiten des oszillatorischen Feuerns von neuronalen  $\alpha$ -Teilnetzwerken, um Muskelspindeln der Peripherie einzuschliessen, und Synchronisation von verschiedenen neuronalen  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Teilnetzwerken, ausgelöst durch Berührung (touch) und Nadelstiche (pin-prick).

aus einem  $\alpha$ -Motoneuron und erregenden und hemmenden Interneuronen) mit verschiedenen Eigenfrequenzen und deren relative Koordination. Bei der Ausbildung eines Bewegungszustandes (Attraktorzustandes) stehen diese prämotorischen Oszillatoren und andere Motoneurone und Interneurone, die sich nicht zu Oszillatoren organisiert haben, in Wechselwirkung mit den Rezeptoren der Peripherie. Für den Fall

Anmerkungen zu Abb. 53: (a) Neuronales  $\alpha$ -Netzwerk feuert oszillatorisch (durchgezogene Schleife) und neuronales  $\gamma$ -Netzwerk feuert nur teilweise oder nicht oszillatorisch (gestrichelte Schleife) bei Berührung mit einer Nadel; extrahiert von Abb. 57 Aa, Ba. (b) Oszillatorisch feuernde neuronale  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Teilnetzwerke bauen durch Berührung 1–5 (touch 1–5) eine Frequenz- und Phasenbeziehung mittels Muskelspindelafferenzen und Muskelspindelafferenzen auf; nach Abb. 57 Ab, Bb. (c) Oszillatorisch feuernde  $\alpha$ -Teilnetzwerke (internal (circuitry) loop) und  $\gamma$ -Teilnetzwerke (external loop) synchronisieren sich (synchronization) durch die Nadelstiche 6–7 (pin-prick 6–7) innerhalb der Analreflexzone (Abb. 56 A); entnommen Abb. 57 Ae, Be. Die gestrichelte Schleife repräsentiert Synchronisation in c. (f) Die Oszillatorisch feuernden neuronalen  $\alpha$ - (internal 'circuitry' loop) und  $\gamma$ -Teilnetzwerke (external loop) sind von den Kontinenzmuskeln sinngemäss auf die Beinmuskeln übertragen worden. Die offenen, grünen Pfeile deuten die mögliche Synchronisation der prämotorischen Oszillatoren durch den rhythmischen afferenten Input an, welcher erzeugt wird durch rhythmische Bewegungen wie z.B. das Springen auf dem Sprungbrett oder das Trainieren auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät. SP1,2 = Spindellaferenzen; T1–T4 = Hautafferenzen; muscle spindle = Muskelspindel; Skin = Haut. Der griechische Gott stellt wahrscheinlich Zeus dar; die Bronzestatue wurde nahe dem Kap von Artemision gefunden (460 v. Chr.).



der sekundären Muskelspindelaferenzen (Teil der sogenannten  $\gamma$ -Schleifen) kann die koordinierte Wechselwirkung auf 3 bis 5 ms genau sein (Abb. 47), so dass die Muskelspindeln mit den  $\gamma$ -Motoneuronen als externe Schleifen zu einem funktionellen Teil der prämotorischen Oszillatoren werden können (Abb. 53) [14]. Die schematische Darstellung der externen Schleife in Abb. 53 wird weiter unten mit Messungen von der gemeinschaftlichen natürlichen Funktionsweise einzelner Neurone beim Menschen begründet.

#### Geschichte der relativen Koordination

Die relative Koordination als Organisationsprinzip des ZNS geht auf den Biologen von Holst zurück, der beobachtete, dass sich die Flossen von Fischen in relativer Koordination bewegen [22]. Der Physiologe R. Jung beobachtete beim Menschen, dass die Tremorfrequenzen (die sich unter Beteiligung der prämotorischen Oszillatoren ausbilden)

relativ koordiniert miteinander wechselwirken [23]. Bei Hunden ist gezeigt worden, dass in den neuronalen Netzwerken der Formatio reticularis des unteren Hirnstammes der Sympathikus-Tonus, der Atemrhythmus, der Muskeltonus und die Kontrolle der Wachheit erzeugt werden. Dieses gemeinsame Hirnstammssystem integriert und verarbeitet die räumlich-zeitlichen Impulsmuster von somatosensorischen Afferenzen der Haut, der Gelenke und der Muskeln zusammen mit den Afferenzen von Baro-, Chemo- und Lungen-Ein- und Ausatemrezeptoren [24–28]. Zanone, Kelso und Schöner formulierten den Lernprozess als eine Veränderung der dynamischen Organisation des ZNS [29–31]. Engel schlug für den visuellen Cortex vor [31, 32], dass der auf wenige Millisekunden synchronisierte Input zweier Signale schwache Netzwerkverbindungen stärkt, weil bei gleichzeitigem Input von mehreren afferenten Potentialen die Erregungsschwelle zur Ausbildung

eines Aktionspotentials schneller erreicht wird als bei nicht gleichzeitigem Input (siehe Abb. 34, «Physiotherapie» 5/99; Koinzidenzdetektor).

#### Messung der relativen Koordination von Neuronen beim Menschen:

In Abb. 54 ist die Messmethode dargestellt, mit der die relative Frequenz- und Phasenkoordination beim Menschen gemessen wurde. Mittels zweier Platindrahtelektrodenpaare wurden von dünnen unverletzten Nervenwurzeln natürliche Impulsmuster von afferenten (aff) und efferenten (eff) abgeleitet (Abb. 54). Bei den vorliegenden Ableitungsbedingungen ist bei den afferenten Aktionspotentialen, die ins Rückenmark hineinlaufen, die Hauptamplitude nach oben gerichtet und bei den efferenten Aktionspotentialen, die aus dem Rückenmark herauslaufen, nach unten gerichtet (Abb. 54 A, B). Da mit zwei Elektrodenpaaren gemessen wurde, können die Leitungsgeschwindigkeiten der einzelnen Nervenfasern berechnet werden (Leitungsgeschwindigkeit einer Nervenfaser = Weg (10 mm) / Zeit (0,2 ms)) und Leitungsgeschwindigkeits-Verteilungshistogramme erstellt werden für die afferenten und efferenten Nervenfasern (Abb. 54 C, D). Durch spezifische Stimulierungen war es möglich, bestimmte Nervenfaserguppen getrennt zu aktivieren und so Verteilungsspitzen in den Geschwindigkeitshistogrammen als bestimmte Nervenfaserguppen zu identifizieren. Bei gleichzeitiger zusätzlicher Ausmessung von Nervenfaser-Durchmesserverteilungen war es dann möglich, Nervenfaserguppen in der Cauda equina des Menschen mit einer Nervenfaserguppen-Leitungsgeschwindigkeit und einem Nervenfaserguppen-Durchmesser zu charakterisieren und ein Klassifikationschema für das peri-

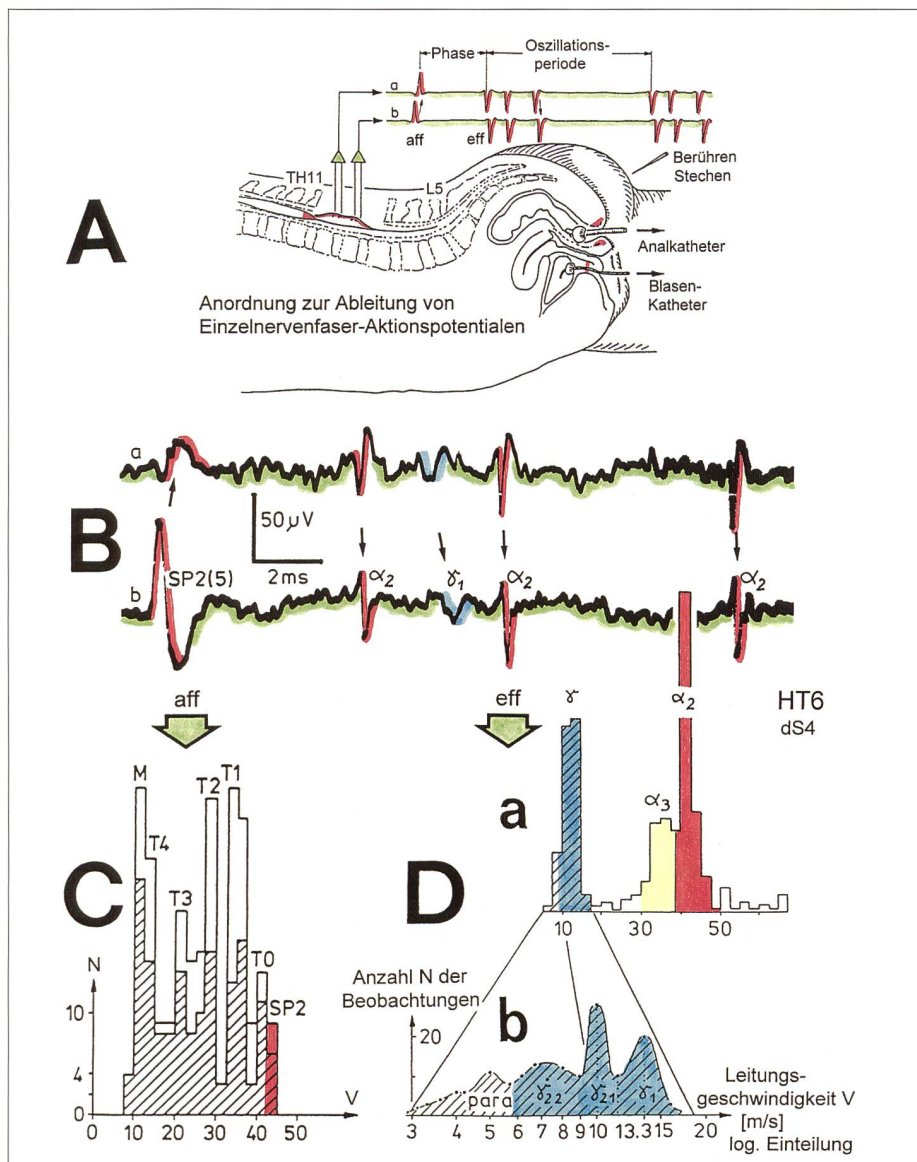
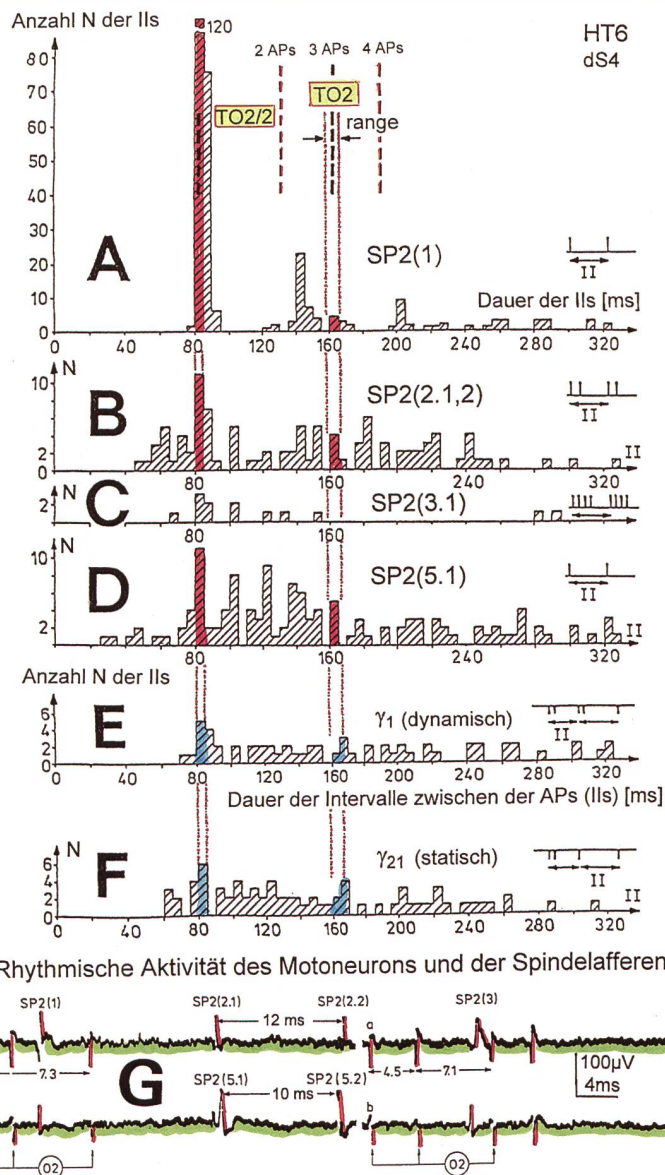


Abb. 54: Messanordnung zur Ableitung von Einzelnervenfasern-Aktionspotentialen und deren Identifizierung.

Anmerkungen zu Abb. 54: A: Durch Registrierung mit zwei Platindrahtelektrodenpaare können Einzelnervenfasern-Aktionspotentialen von dünnen Nervenwurzeln der Cauda equina, welche etwa 300 myelinisierte Nervenfasern enthalten, abgeleitet werden. Die Hauptaktionspotential-Amplituden von Afferenzen sind bei dieser Messanordnung nach oben und die von Efferenzen nach unten gerichtet. Das rhythmische Feuern mit Impulszügen von 3 Aktionspotentialen (APs) eines prämotorischen Oszillators ist schematisch dargestellt. Die Oszillationsperiode des prämotorischen Oszillators ist gekennzeichnet. Die Phase zwischen einem afferenten (z.B. Muskelspindel) AP und den APs des Impulszuges des Oszillators ist ebenfalls gekennzeichnet. B: Originalregistrierung eines Muskelspindel-APs (SP2(5)), eines Impulszuges eines prämotorischen  $\alpha_2$ -Oszillators und eines APs eines dynamischen  $\gamma$ -Motoneurons ( $\gamma_1$ ). C: Geschwindigkeits-Verteilungshistogramm von einigen afferenten Nervenfasern (T1–T4 = Hautafferenzen; M = Mukosaafferenzen, SP2 = Spindelaferenzen). D: Geschwindigkeits-Verteilungshistogramm von  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneuronen; linear aufgetragen in a und logarithmisch aufgetragen in b. Bei der logarithmischen Auftragung der Fortleitungsgeschwindigkeiten spaltet sich die lineare  $\gamma$ -Verteilungsspitze in die verschiedenen Spitzen der dynamischen ( $\gamma_1$ ) und statischen  $\gamma$ -Motoneurone ( $\gamma_{21}$ ,  $\gamma_{22}$ ) und der parasympathischen Efferenzen.



### Relative Frequenzkoordination zwischen dem $\alpha_2$ -Oszillator O2 und den Muskelspindelafferenzen und $\gamma$ -Motoneuronen



**Abb. 55:** Relative Frequenzkoordination zwischen dem prämotorischen Oszillator T02 und der Frequenz des Auftretens von Aktionspotentialen von Spindelafferenzen und  $\gamma$ -Motoneuronen (durch Messung der Intervalle zwischen den Aktionspotentialen (APs) = IIs = interspike intervals).

phäre Nervensystem des Menschen aufzustellen (Abb. 3, 4; [16]). Damit ist es nun möglich, die afferenten und efferenten Aktionspotentiale zu identifizieren, das heißt herauszufinden, in welchem Typ von Nervenfasern sie fortgeleitet wurden. Durch Formvergleiche von Aktionspotentialen (und unter Zuhilfenahme von bereits bekannten Impulsmustern) konnten Impulsmuster einzelner Nervenfasern in der Summenaktivität der vielen Nervenfasern einer Wurzel erkannt und isoliert werden (Abb. 5; [16]). Damit wurde es möglich, von identifizierten afferenten und efferenten Nervenfasern die gleichzeitigen natürlichen Impulsmuster zu erstellen (Abb. 6, 7; [16]). Die Impulsmuster

von efferenten Nervenfasern (Motoneuronen) konnten teilweise auch in elektromyographischen Ableitungen wiedergefunden werden (Abb. 8 [16]). Durch Messung der räumlich-zeitlich verteilten Impulsmuster, die ins ZNS (hier Rückenmark) hinein- und herauslaufen, war es nun möglich, die Organisation des menschlichen ZNS im Bereich des Rückenmarkes und deren Wechselwirkung mit Rezeptoren der Peripherie (hier hauptsächlich Muskelspindeln) teilweise zu messen.

Beim Menschen wurde gemessen, dass Motoneurone bei adäquatem afferenten Input rhythmisch feuern. Diese Tatsache wird so erklärt, dass sich das Motoneuron in Zusammenarbeit

Anmerkungen zu Abb. 55: In A-F sind die Intervallzeiten der APs der Spindelafferenzen und  $\alpha$ -Motoneurone in Beziehung zur ganzen und halben Oszillationsperiode des prämotorischen Oszillators gesetzt. In G sind Originalregistrierungen verschiedener Muskelspindelafferenzen und der Impulszüge des prämotorischen Oszillators dargestellt. Aus A ist zu ersehen, dass die APs der Muskelspindelafferenz SP2(1) eine spezifischere Phasenbeziehung zu den Impulszügen des Oszillators haben als die APs der Muskelspindelafferenzen SP2(3-5) und die APs der  $\gamma$ -Motoneurone, wie anhand der Verteilungsspitzen beurteilt werden kann.

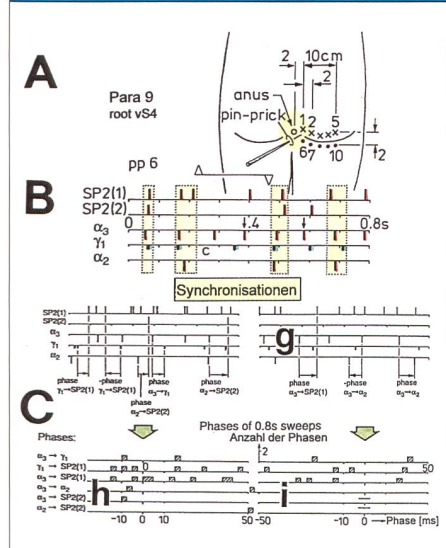
mit anderen Neuronen zu einem Netzwerkoszillator selbst organisiert hat, der prämotorischer Oszillator genannt wird. Dieses neuronale Teilnetzwerk erzeugt Aktivität in Koordination mit dem afferenten Input und mit anderen prämotorischen Oszillatoren. Abb. 55 zeigt die Eigenfrequenzen von einem  $\alpha_2$ -Oszillator in Beziehung zu den Aktivitätsverteilungen von sekundären Muskelspindelafferenzen und einem dynamischen und einem statischen  $\gamma$ -Motoneuron. Die Frequenzbeziehungen in Abb. 55 A-F verdeutlichen, dass eine Frequenzkoordination zwischen der Aktivität der sekundären Muskelspindeln, des rhythmisch feuernden  $\alpha$ -Motoneurons und den  $\gamma$ -Motoneuronen bestand. Die relative Phasenkoordination ist in Abb. 59 dargestellt. Der prämotorische  $\alpha_2$ -Oszillator (oder anders ausgedrückt, das rhythmisch feuernde  $\alpha_2$ -Motoneuron) hatte Muskelspindeln in sein rhythmisches Feuern eingeschlossen; er hatte externe Schleifen mittels  $\gamma$ -Motoneuronen und Muskelspindelafferenzen zur Peripherie aufgebaut. Beim Bewegen auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät werden zum Beispiel die Muskelspindeln mechanisch koordiniert und rhythmisch verändert, so dass der prämotorische Oszillator direkt in seiner Funktion beeinflusst werden kann (Oszillator-Formationstraining). Interessant ist, dass die Muskelspindelafferenz SP2(1) in Abb. 55 A den Oszillator sehr spezifisch aktivierte, während die anderen Muskelspindeln in Abb. 55 B-D eine weniger spezifische Beziehung zum Oszillator hatten. In Abb. 22 [18] war gezeigt worden, wie zwei Oszillatoren von ihren adäquaten Afferenzen aktiviert wurden. Erste Messungen zeigen, dass auch die selbstorganisierten Oszillatoren untereinander ihr Feuern koordinieren. Sie feuern normalerweise nicht synchronisiert (sondern in relativer Antisynchronisation), sonst würden ja die Muskeln zucken.

In den Abb. 56 und 57 ist die gleichzeitige relative Frequenz- und Phasenkoordination zweier  $\alpha$ -Motoneurone, einem  $\gamma$ -Motoneuron und zweier sekundärer Muskelspindelafferenzen von einem Patienten mit einer Rückenmarkverletzung dargestellt [14]. Durch rhythmisches Nadelstechen mit einer Frequenz von etwa 1 Hz (für zeitliche Organisation des ZNS) in der Anal-Reflexzone des Patienten (für räumliche Organisation des ZNS)



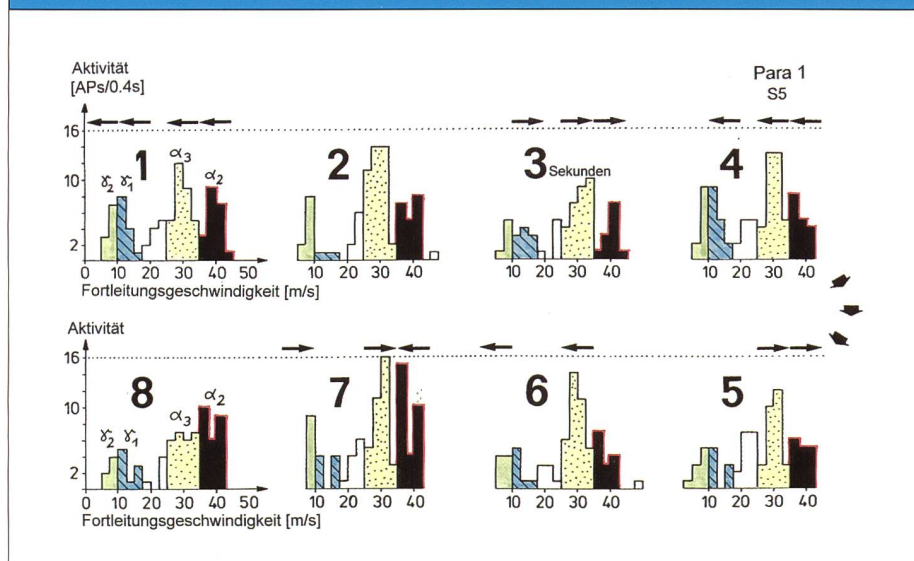
synchronisierte sich vorübergehend das Feuern der Motoneurone und der Muskelspindelaferenzen (Abb. 56). Die Aktionspotential-Muster von Motoneuronen und Muskelspindeln gingen vorübergehend in die spezielle Phasen- und Frequenzkoordination «Synchronisation» über. In Abb. 57 ist nun die gleichzeitige relative Frequenz- und Phasenkoordination dargestellt. Die relative Frequenz- und Phasenkoordination ist nur mittelmässig gut ausgeprägt, da der Patient ja eine Verletzung des ZNS, nämlich des Rückenmarkes, hatte. Bei einem Menschen mit einem nicht-verletzten ZNS oder einem Hirntoten wäre die relative Frequenz- und Phasenkoordination spezifischer (siehe unten). Durch Berühren der Analreflexzone oder Stechen in die Analreflexzone veränderte sich die Koordination von Frequenzen und Phasen. Beim wiederholten Stechen in die Analreflexzone synchronisierten sich vorübergehend die Frequenzen (Abb. 57 Ae) und die Phasen zwischen  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneuronen, und Muskelspindelaferenzen zeigen vorübergehend nur noch eine Phasenbeziehung statt zwei per Oszillationsperiode.

### Stimulationsanordnung, natürliche Impulsmuster und Phasendefinition





## Rekrutierung von $\alpha$ - und $\gamma$ -Motoneuronen bei gelegentlichem, nicht oszillatorischem Feuern



**Abb. 58:** Rhythmische Rekrutierung von  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneuronen in einzelnen Nervenfaserguppen bei gelegentlichem Feuern. Die rhythmische Aktivierung von Motoneuronen nach dem Größenprinzip mit etwa 0,3 Hz wurde gemessen mittels des wiederholten Auftretens von kleinen und grossen Einzelnervenfaser-Leitungsgeschwindigkeiten bei gelegten Anal- und Blasenkathetern, aber ohne zusätzliche Stimulierung.

## 2. Teilweiser Verlust der relativen Frequenz- und Phasenkoordination nach ZNS-Verletzung

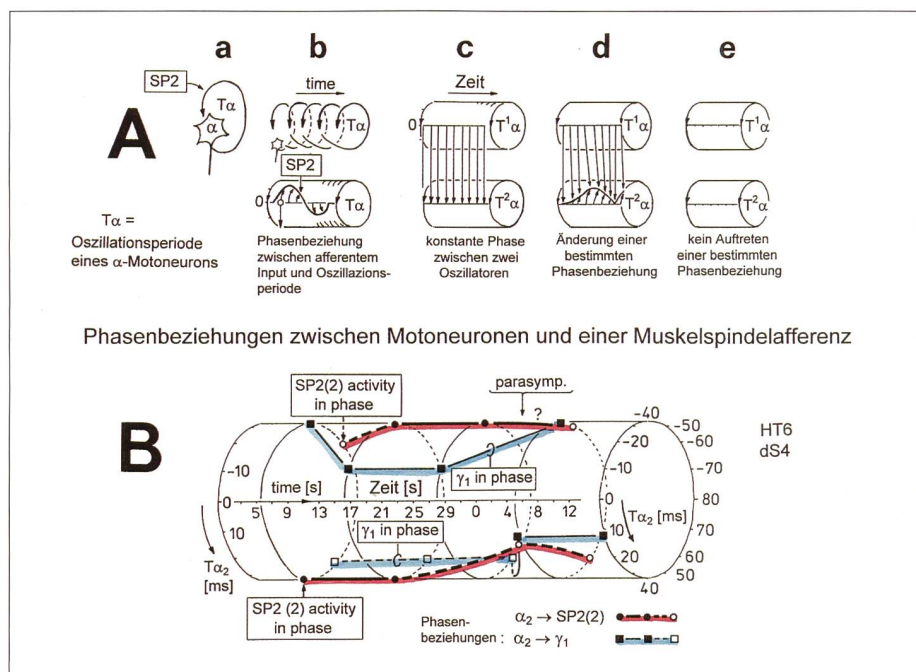
Durch die Verletzung des ZNS gehen die relative Frequenz- und Phasenkoordination von Neuronen des ZNS und ihre zur Selbstorganisation Anlass gebenden räumlich-zeitlich verteilten Impulsmuster (durch Verletzung des Verarbeitungssystems der Afferenzen) teilweise verloren. Dieser teilweise Verlust der spezifischen Eigenfrequenzen der selbstorganisierten prämotorischen Oszillatoren nach Rückenmarkverletzung war in Abb. 10 [16] dargestellt worden. Der Verlust der Willkürkontrolle von prämotorischen Oszillatoren, bedingt durch den teilweisen Verlust an Frequenz- und Phasenkoordination, war in Abb. 11 (siehe «Physiotherapie» 3/98) [16] dargestellt worden. In Abb. 59 wird nun die relative Phasenkoordination

beim relativ «unveränderten» menschlichen ZNS gezeigt. Es ist in Abb. 59 zu sehen, dass bei einem Hirntoten (dessen Rückenmarksfunktion als nahezu physiologisch angesehen wurden) die Phasen zwischen Motoneuronen und Muskelspindelaferenzen sich mit der Zeit nur wenig änderten [14]. Nach ZNS-Verletzung dagegen (hier Rückenmarkverletzung) änderten sich die Phasen

sehr stark in Abhängigkeit von der Zeit, wie aus Abb. 60 zu ersehen ist [14].

## 3. Strategie des Wiedererlernens von verlorenen Funktionen nach ZNS-Verletzung

Durch ein motorisches Wiedererlernen der verlorenen Frequenz- und Phasenkoordination, nämlich durch eine Oszillator-Formationstherapie und eine Koordinationsdynamik-Therapie, kann die relative Frequenz- und Phasenkoordination wieder erlernt werden. Um aber die Willkürkontrolle auch zu den prämotorischen Netzwerken zu bringen, muss das Lernen sehr integrativ vorgenommen werden. Die wesentlichen Punkte bei der Koordinationsdynamik-Therapie sind, dass erstens das instruierte Lernen von Phasenrelationen auf einige Millisekunden genau sein muss (Abb. 34) [21] und zweitens dass die neuronalen Netzwerke des ZNS möglichst integrativ aktiviert werden müssen, um die Phasenrelationen zwischen möglichst vielen gleichzeitig erregten Neuronen und selbstorganisierten neuronalen Teilnetzwerken des ZNS zu verbessern. Wenn in einem Kammerorchester ein neues Stück einstudiert wird, dann müssen die einzelnen Musiker natürlich ihren Part beherrschen (Oszillator-Formationstherapie). Kammermusik entsteht aber erst dann, wenn alle Teilnehmer zusammen üben. Jeder Musiker des Kammerorchesters muss dann seine eigene mit der Spielweise der anderen koordinieren (Koordinationsdynamik-Therapie). Wird angenommen, dass die höheren geistigen Funktionen und die Wachheit nicht von einem «Humunkulus» im ZNS, sondern durch die



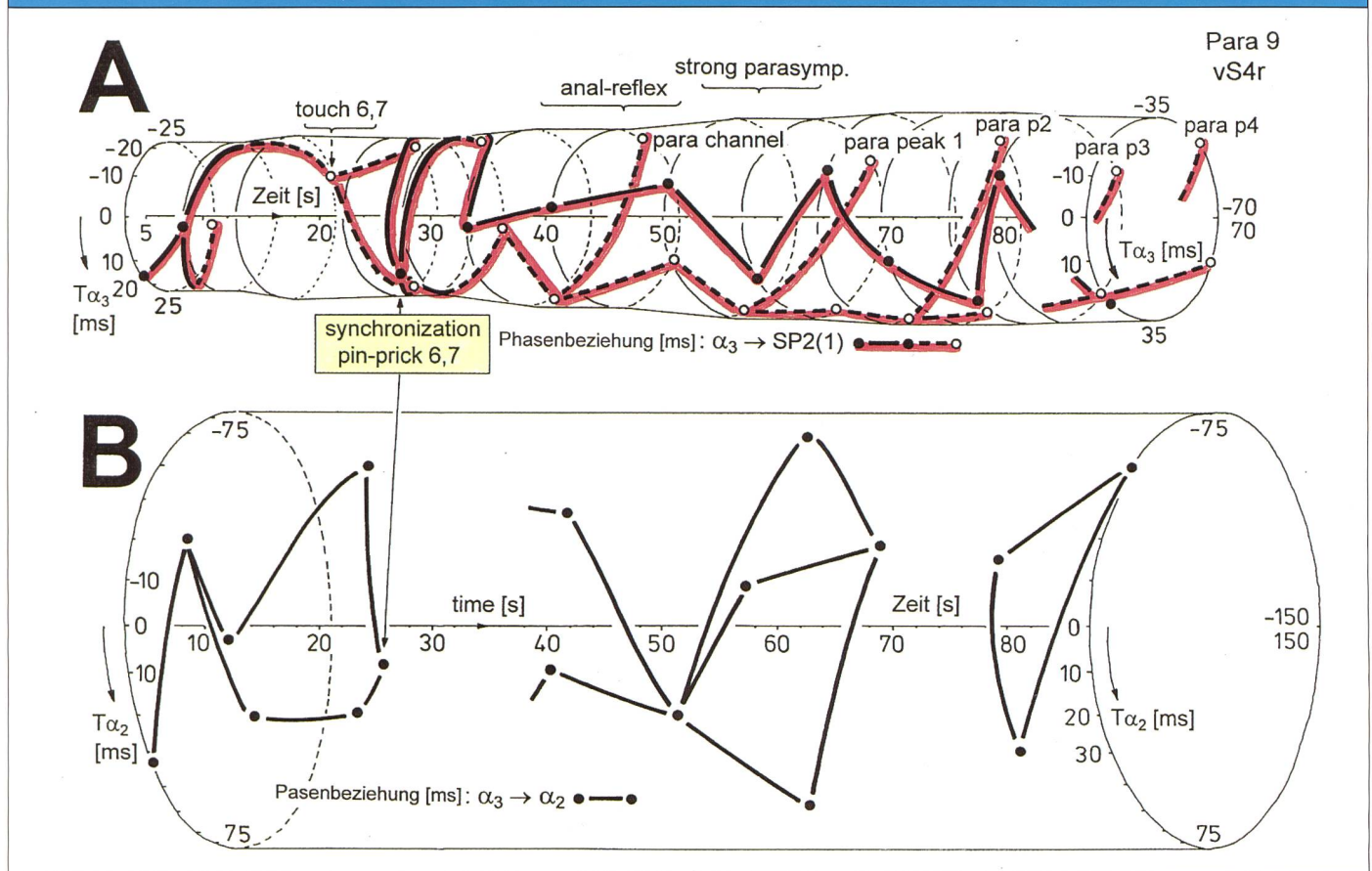
**Abb. 59:** Stabile Phasenkoordination zwischen der Aktivität eines  $\alpha$ - und eines  $\gamma$ -Motoneurons und einer sekundären Muskelspindelaferenz bei einem Hirntoten (HT6, Aktivitätsmuster im prämotorischen Netzwerk als physiologisch angenommen).

Anmerkungen zu Abb. 58: Die Pfeile über den einzelnen Nervenfaserguppen in den Histogrammen zeigen an, ob vor allem grosse oder kleine Leitungsgeschwindigkeiten in den Nervenfaserguppen auftraten, d.h. ob vorherrschend grosse oder kleine Motoneurone feuerten. Unter den vorliegenden Messbedingungen wurden vorherrschend grosse und kleine Motoneurone parallel in den  $\gamma_1$ -,  $\alpha_3$ - und  $\alpha_2$ -Motoneurongruppen aktiviert.

Anmerkungen zu Abb. 59: In A ist die Darstellungsweise der Phasenbeziehungen entwickelt (der Messung von Frequenzen von drehenden Zylindern mit einem Stroboskop nachempfunden). In B ist zu sehen, dass die Phasenbeziehungen zwischen dem  $\alpha_2$ -Motoneuron und der Muskelspindelaferenz SP2(2) und dem  $\alpha_2$ -Motoneuron und dem  $\gamma_1$ -Motoneuron relativ stabil sind; die Phasenbeziehungen ändern sich nur wenig = die Phasenkoordination ist gut.



### Änderung der Phasenbeziehung zwischen oscillatorisch feuernenden Motoneuronen und einer Muskelspindelaferenz



**Abb. 60:** Instabile Phasenkoordination bei einem Patienten mit Rückenmarkverletzung. Gleiche Phasendarstellungsweise wie in Abb. 59. Der Verlust an stabiler Phasenkoordination nach Rückenmarkverletzung wird ersichtlich durch Vergleich mit den vergleichsweise geringen Phasenveränderungen der Abb. 59B; gleiche Zeitskala auf der Abszisse.

integrativen Eigenschaften des ZNS erzeugt werden, dann müsste man – soweit wie möglich – beim Patienten eine möglichst integrative Koordinationsdynamik-Therapie ansetzen, um den Patienten aus einem Koma zu holen oder um seine höheren geistigen Funktionen verbessern zu können. Wenn der bewegungsinduzierte re-afferente Input möglichst vielschichtig und koordiniert ist, dann kann die Koordinationsdynamik des ZNS nach Verletzung durch ein effizientes Lernen wahrscheinlich so verändert werden, dass die umgelernte Koordinationsdynamik wieder physiologische Bewegungen, vegetative und höhere geistige Funktionen erzeugt. Das Wiedererlernen von motorischen, vegetativen und höheren geistigen Funktionen nach ZNS-Verletzung kann angesehen werden als ein dynamischer Prozess [29–31]. Die Koordinationsdynamik des ZNS nach Verletzung verändert sich durch den Lernprozess in Richtung auf eine Koordinationsdynamik, die es vor der Verletzung hatte, obwohl morphologisch gesehen, das ZNS nach der Verletzung ein anderes ist. Makroskopisch ist gemessen worden, dass Phasenbeziehungen bei Gliedmassen des Menschen umgelernt werden können [29, 30].

#### 4. Möglichkeiten zur weiteren Erhöhung der Rate des Wiedererlernens nach ZNS-Verletzung durch Erhöhung des koordinierten afferenten Inputs

Um die Integrativität des Wiedererlernens und die Rate des Wiedererlernens der inneren Koordinationsdynamik nach schwerer ZNS-Verletzung zu erhöhen, muss der auf einige Millisekunden genau koordinierte bewegungsinduzierte re-afferente Input erhöht werden. Auf diese Weise wird einerseits das Hervortreten von schwachen Verbindungen zwischen teilweise funktionell abgetrennten neuronalen Netzwerkteilen erhöht (siehe oben) und andererseits nimmt der relative Beitrag des re-afferenten Inputs im Verhältnis zu den gestörten descendierenden Willkür-Impulsmustern zur Selbstorganisation der Bewegungsmuster (Attaktorzustände der Bewegung) zu. In Abb. 34 war eine Koordination bis zu 1,4 ms genau zwischen den Aktionspotentialen eines Motoneurons und einer sekundären Muskelspindel-Afferenz gemessen worden [21]. Solche extrem genauen Koordinationen zwischen Neuronen der prämotorischen Netzwerke und dem afferenten Input von Muskelspindeln können nur von einem

speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät erzeugt werden. Wenn beim Wiedererlernen der Koordinationsdynamik von Fingern, Händen, Armen, Füßen, Beinen und Rumpf (Abb. 61) auch noch der visuelle, auditive und der bewegungsinduzierte re-afferente Input von der Haut erhöht werden, dann werden zunehmend die integrativen Funktionen des ZNS wiedererlernt, und auch die Teilfunktionen des ZNS werden verstärkt wiedererlernt, weil die Netzwerke, die die Teilfunktionen im Körper erzeugen, auch koordinierten Input von den anderen Teilsystemen erhalten.

Teil 2 mit praktischen Anwendungen folgt in der nächsten «Physiotherapie».

*Anmerkungen zu Abb. 60:* In Abb. 59 B verändert sich die roten (Phasen  $\alpha_2 \rightarrow SP(2)$ ) nur wenig auf dem Umfang des Zylinders (stabile Phasenkoordination), ganz anders in Abb. 60 A, wo sich die roten Linien (Phasen  $\alpha_2 \rightarrow SP(2)$ ) auf dem Zylinder stark verändern. Linien Die Synchronisation der Abb. 57Be ist in A gekennzeichnet. Die Bezeichnung para peak 1 z.B. bedeutet, dass durch Ziehen an Blasen- und Analkathetern parasympathische Efferenzen aktiviert werden, die hier nicht zur Diskussion stehen.

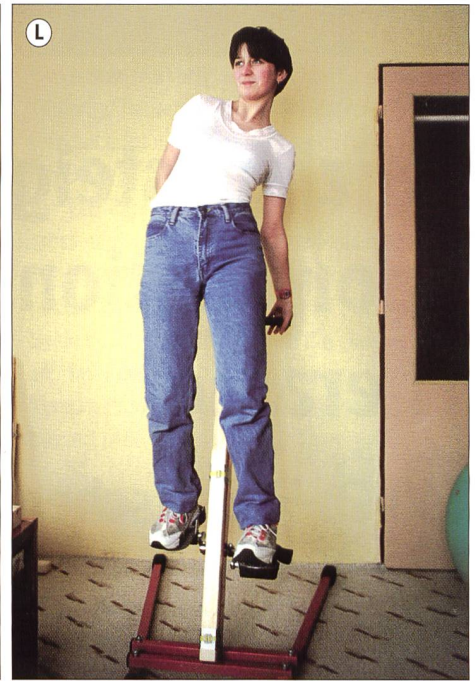




Anmerkungen zu Abb. 60 A–G: B: Patientin trainiert die Koordination des Zeige- und des Mittelfingers. C, D: Training des Mittelfingers alleine. In D rutscht der Finger vom Kurbelgriff. Der stetige Versuch, mittels der Willkürmotorik den Mittelfinger am Griff zu halten, trainiert zusätzlich zu stereotypen Bewegungen die Willkürmotorik. Der Versuch der Ausführung der physiologischen Bewegung «Kurbeln mit dem Mittelfinger» integriert stereotype Bewegung und Willkürmotorik. E: Beim Kurbeln mit den zwei kleinen Fingern wird die Fehllage von Arm und Hand (Palmarflexion) offensichtlich. F: Die Notwendigkeit der Verbesserung der Fingerfunktion wird beim Essen offensichtlich. Die linke Hand ist in Fehllage und hält das Messer nicht richtig. Die linke Hand war auch nicht in der Lage, die Gabel so zu halten wie die rechte Hand im Bild. G: Beim Händewaschen muss die Patientin versuchen, die Hände symmetrisch zu bewegen, damit durch Mitbewegung die «schlechte» linke Hand von der rechten «guten» Hand lernt.

Abb. 61 A–G: A: Training von Händen, Armen, Beinen und Rumpf auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät einer 13jährigen Patientin mit ZNS-Schädigung durch Strahlung (Tschernobyl), behauptet die Mutter.





Anmerkungen zu Abb. 61 H–O: K, L. Koordinationsdynamik-Therapie kann in unterschiedlichsten Stellungen vorgenommen werden (15jährige Skoliose-Patientin) und kann an die zu lernenden Bewegungen angepasst werden. In K versucht der zweijährige Cousin die wacklige Hilfskonstruktion zu stützen. Interessant ist, dass das zweijährige Kind alles nachmachen wollte; das lernende Nervensystem nimmt alle Möglichkeiten wahr, die zur Optimierung der Funktion des Nervensystems zur Verfügung stehen. M: Der Abstand der Kurbelachsen muss, wenn möglich, an die Grössenverhältnisse des Patienten angepasst werden (Patientin mit Cerebralparese). N, O: Bei der Therapie von eineiigen Zwillingen (wegen nicht symmetrischen Bewegungen; nicht symmetrische Sprunghaltung in N) zeigte sich, dass wahrscheinlich auch kleinere genetische Fehlverteilungen vorkommen, die durch eine Koordinationsdynamik-Therapie früh angegangen werden sollten. Die Fehlfunktion des ZNS wurde bei den Zwillingen in O, N diagnostiziert durch das unwillkürliche vorübergehende Ändern des Sprungmusters (Änderung der Attraktorzustände). Es änderte sich mehrmals unwillkürlich von In-Phase- zu Gegen-Phase-Springen. Wünschenswert wäre es, wenn schon Baby- und Kinderspielzeug so konzipiert ist, dass beim Spielen gleichzeitig die Koordination der Gliedmassen therapiert wird auf spielerische Art und Weise, wie z.B. in Abb. 68.

**Abb. 61 H–O:** H, I: Einige Fehlstellungen sind veränderte Automatismen, Haltungen oder phylogenetisch alte Bewegungsmuster, die durch die ZNS-Verletzung aktiviert werden, wie schon B. Bobath betonte. Die Fehlstellung des kleinen Fingers beim Patienten mit ZNS-Verletzung in H ähnelt der Stellung des kleinen Fingers, wenn zum Beispiel eine Frau eine Blume hält (I) oder eine Tasse Kaffee trinkt.