

**Zeitschrift:** Physiotherapie = Fisioterapia  
**Herausgeber:** Schweizerischer Physiotherapeuten-Verband  
**Band:** 35 (1999)  
**Heft:** [1]

**Artikel:** Koordinationsdynamik-Therapie als Lernprozess (Teil 1) : der Neubeginn nach der Vojta-Therapie  
**Autor:** Schalow, Giselher  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-929420>

### **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:** 16.03.2025

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

# Koordinationsdynamik- Therapie als Lernprozess

## (Teil 1)

### Der Neubeginn nach der Vojta-Therapie

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

Die Neurorehabilitationsmethoden nach Bobath und Vojta haben ihren historischen Wert. Vojta und Bobath haben sich verdient gemacht bei der Gründung der Neurorehabilitation. Aber mit den neuen Entwicklungen der Neurowissenschaften der letzten zehn Jahre einschliesslich der Neurophysiologie des Menschen (Selbstorganisation neuronaler Netzwerke, relative Koordination von Rhythmen, Neurogenese im erwachsenen menschlichen ZNS) ist der Erkenntnisstand ein anderer geworden, so dass jetzt effizientere Methoden eingesetzt werden müssen. Zusätzlich zu effizienten Methoden der Neurorehabilitation sollten Aspekte von Bobath und Vojta berücksichtigt werden, um das ZNS in seiner Komplexität möglichst vielschichtig zu erfassen. Aber im Zentrum einer Neurorehabilitations-Therapie muss eine sehr effiziente theoretisch begründete oder mit Statistik bewiesene Methode stehen.

#### Der Neubeginn in der Neurorehabilitation

##### aufgrund der Entwicklungen der Neurowissenschaften der letzten 10 Jahre

Während Bobath Stellreaktionen, Gleichgewichtsreaktionen und koordinierte Haltungs- und

Bewegungsreaktionen heranzog, um das verletzte ZNS zu reorganisieren, versuchte Vojta [1] bei Säuglingen funktionelle Komplexe vom Reflexkriechen und Reflexwenden auszulösen und zu trainieren, um so das verletzte ZNS zu reorganisieren. Da das Reflexkriechen und Reflexwenden schon nach der Geburt vorhanden sind und hauptsächlich in den neuronalen Netzwerkorga-

nisationen des Rückenmarkes erzeugt werden, können diese Automatismen herangezogen werden, um supraspinale Zentren zu instruieren, wie sie sich zu reorganisieren haben.

Ähnliche Bedenken wie bei der Bobath-Therapie gelten aber auch für die Vojta-Therapie. Den Kriechautomatismus zur Reorganisation des ZNS zu benutzen ist sinnvoll. Er wird ja auch bei der Koordinationsdynamik-Therapie eingesetzt (Abb. 44). Aber die Zerlegung des Kriechautomatismus in funktionelle Komplexe erscheint nicht sinnvoll, weil die Netzwerkzustände (Attraktorzustände) für Teilbewegungen sich nicht aufsummieren zum Netzwerkzustand (Attraktorzustand) Kriechen. Das Sensibilisieren von Druckpunkten zur Auslösung von funktionellen Komplexen könnte sogar schädlich sein, speziell wenn Schmerzreize eingesetzt werden. Die Funktionen der neuronalen Netzwerke des ZNS sind zum Guten wie zum Schlechten hin veränderbar. Wenn etwas ältere Kinder bei der Vojta-Therapie vor Schmerzen heulen, nur damit an bestimmten Druckpunkten eine Bewegung erzeugt oder sensibilisiert werden kann, dann ist das mehr eine Qual als eine Therapie. Wenn Sehnen verkürzt und Gelenke fast versteift sind, muss der Patient schon etwas Schmerz tolerieren. Dehnungen gehen auch beim Gesunden bis an die Schmerzgrenze oder etwas über die Schmerzgrenze hinaus. Das ist aber keine Rechtfertigung dafür, einem Kind noch zusätzlich Schmerzen zu bereiten.

Als der Autor G.S. beim Patienten der Abb. 44 im Wachkoma eine Koordinationsdynamik-Therapie durchführte (Abb. 45), wurde er – trotz der dem Patienten bereiteten Schmerzen im linken Arm und der linken Hand und der ihm bereiteten Angst (Abb. 45B) – bei der Verabschiedung gestreichelt. Als eine Ärztin beim gleichen Patienten auch im Wachkoma aus Diagnostikgründen am Vortage eine Vojta-Therapie durchführte, wurde sie vom Patienten nicht gestreichelt. Dieser Patient konnte im Wachkoma für sich entscheiden, welche Therapie er bevorzugte und welche ihm im ZNS angenehmer war.

Nicht im Koma befindliche Patienten sagen meist von alleine, dass ihnen die Ganzkörper-

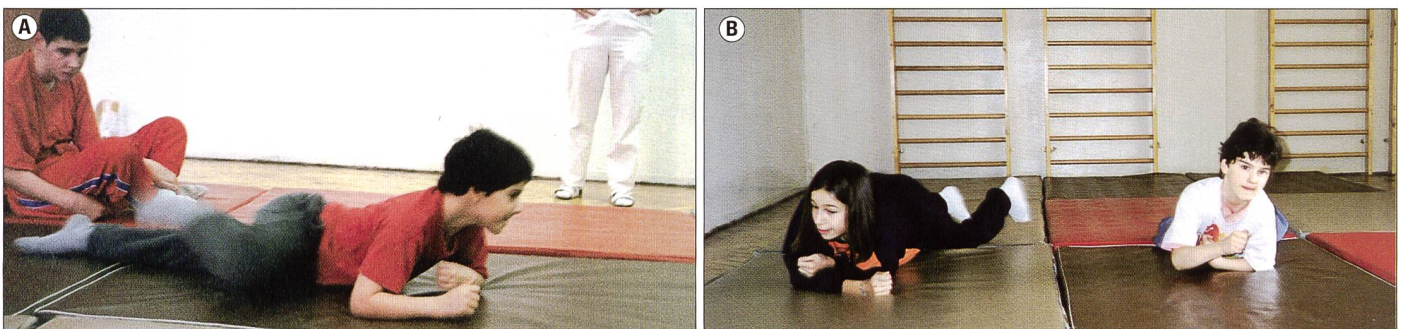
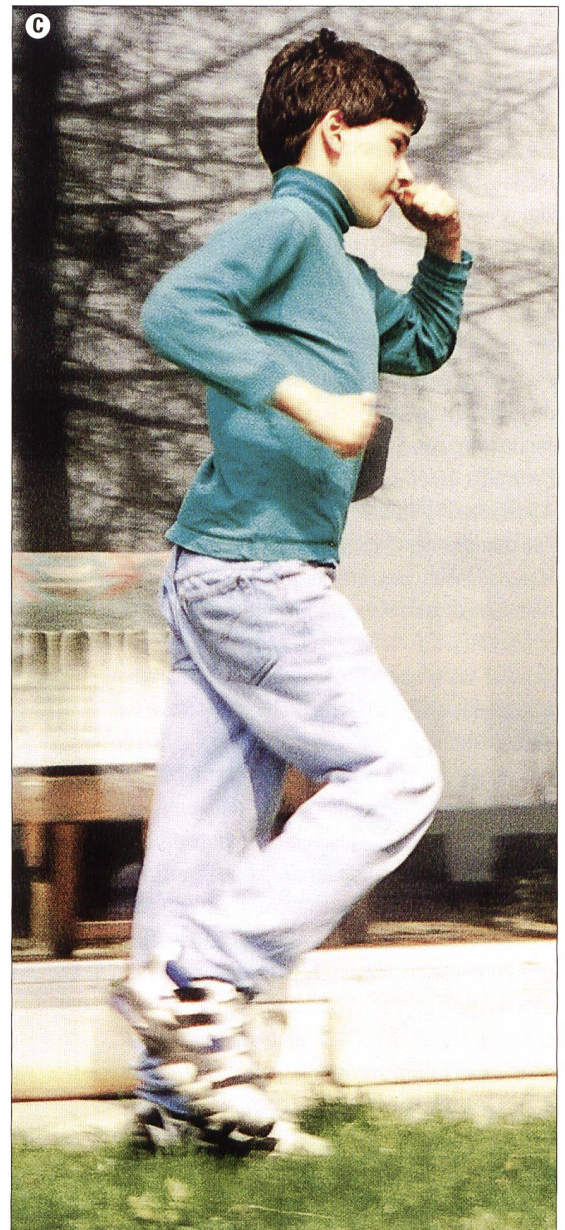


Abb. 44: 10jähriger Patient mit schwerer Hirnschädigung durch Autounfall beim alleine Kriechen (A) und beim Wettkriechen (3 Monate später) mit einer 13jährigen Patientin mit einer Hirnentwicklungsstörung durch Strahlung (Tschernobyl).



**Abb. 45:** Koordinationsdynamik-Therapie beim Patienten mit schwerer Hirnschädigung im Wachkoma (A, B) 5 Wochen und 8 Monate nach dem Auto-unfall (C).

Koordinationsdynamik-Therapie gefällt, weil sie vorübergehend die Spastik reduziert. Nichtsprechende Patienten mit starker geistiger Behinderung belohnen den Therapeuten meist mit einem Lachen oder Lächeln.

Weiterhin erscheint das chronische Sensibilisieren von Druckpunkten oder Druckzonen zur Auslösung von Bewegungen oder zur Aktivierung von Muskelschleifen fragwürdig, wenn eine Schmerzsensibilisierung eingeschlossen ist. Von chronischen Schmerzen ist bekannt, dass oft, wenn die Schmerzursache beseitigt ist, der Patient weiterhin über Schmerzen klagt. Die neuronalen Netzwerke haben sich wahrscheinlich entsprechend der chronischen Schmerzen organisiert. Nach Beseitigung der Schmerzursache bleibt dieser spezielle Organi-

sationszustand Schmerz weiter bestehen, und der Patient empfindet Schmerz, obwohl die Schmerzursache beseitigt wurde. Erst eine Reorganisation der neuronalen Netzwerke im Schmerzverarbeitungssystem kann dann dem Patienten Schmerzfreiheit ohne Pharmaka verschaffen. Beim Einsatz der Akupunktur oder anderer ähnlicher Verfahren zur Beseitigung von Schmerz, wird offenbar, wie vielschichtig das Schmerzproblem ist.

Auch bei der Reorganisation des verletzten ZNS bei älteren Kindern und Erwachsenen können teilweise ontogenetische Entwicklungsstufen durchlaufen werden. Bei einem 12jährigen Patienten mit schwerer Hirnschädigung, der ein halbes Jahr im Koma lag und bei dem die Koordinationsdynamik-Therapie erst sieben Monate

*Anmerkungen zu Abb. 45:* A: Patient beim Training auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät (wacklige Hilfskonstruktion).

B: Patient beim Laufbandtraining im Wachkoma. Patient schreit, hauptsächlich vor Angst. Psychisch (und körperlich) belastende Situation für alle Beteiligten, einschliesslich Mutter, Physiotherapeutin, behandelnde Chefärztin und Autor (G.S.). Auf lange Sicht tut man aber dem Patienten keinen Gefallen, wenn man es ihm beim Training zu leicht macht.

C: Patient beim freien Rennen 7 Monate später als in B. Er überstreckt teilweise noch das linke Knie. Wie man aus dem Vergleich von B mit C sieht, ist der Anfang einer Therapie am schwersten.

nach dem Unfall begonnen wurde, zeigte sich bei der Verbesserung der motorischen und höheren geistigen Funktionen ein Greif-Reflex in der rechten «besseren» Hand (Abb. 46A). In der linken «schlechteren» Hand war der Greifreflex nur

schwer auslösbar. Wenn man dem Patienten beide Hände gab, dann rutschte die rechte Hand vom Handgeben-Griff in den Greifreflex. Die linke Hand tat dies nicht. Wenn man allerdings beide Hände in Greifreflex-Stellung brachte, das heisst die rechte Hand des Patienten umfasste den linken Daumen des Therapeuten und die linke Hand den rechten Daumen, dann konnte durch Mitbewegung auch etwas der Greifreflex in der linken Hand des Patienten ausgelöst werden. Die Mitbewegung im Greifreflex wurde beim Patienten ausgelöst durch symmetrische rhythmische Bewegungen der Daumen in den greifenden Händen des Patienten. Man könnte also theoretisch den Greifreflex unter Nutzung der Mitbewegung dazu verwenden, die motorischen Funktionen der linken Hand zu verbessern. Hauptsächlich aus Effizienzgründen wird aber eine Koordinationsdynamik-Therapie eingesetzt (Abb. 46 B).

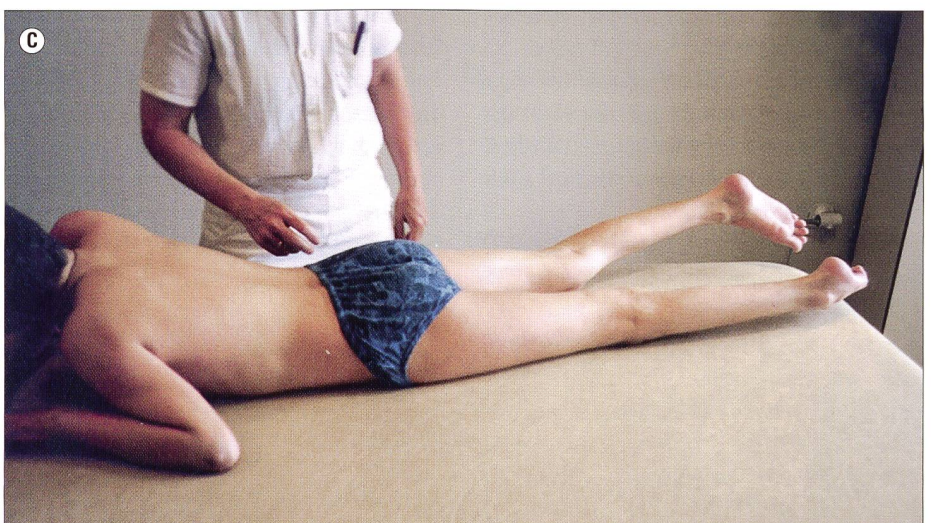
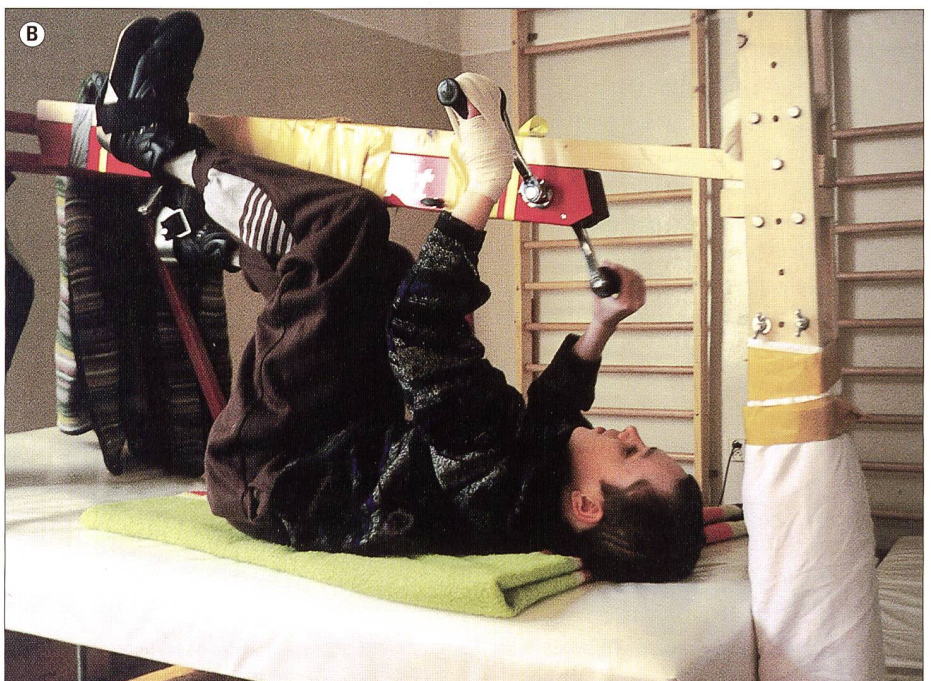
Schwer wäre auch zu verstehen, wie man den Streckspasmus des Patienten (Abb. 46 C) mit einem Training des Greifreflexes reduzieren will. Aber ebenso ist schwer nachzuvollziehen, wie man mit dem Training von Automatismen für das Kriechen, Wenden und Aufrichten (Vojta-Therapie) Fingerbewegungsfunktionen effizient verbessern will. Wenn auch mit der Nutzung von Teilbewegungen von Automatismen spezielle Teilfunktionen des ZNS verbessert werden können, so muss zur Verbesserung der integrativen Funktionen des ZNS eine Therapie eingesetzt werden, welche die integrativen Funktionen herstellen oder wiederherstellen kann. Die Koordinationsdynamik-Therapie leistet dies. Ein Orchester kann eben auch nicht aufgebaut oder in seiner Qualität wesentlich verbessert werden, wenn die Geiger, Trompeter, Violinisten und anderen Musiker nur für sich alleine üben. Für die Gesamtmusik muss auch in Koordination miteinander geübt werden.

Wenn man sich differenziert mit der Verletzung des ZNS von älteren Kindern und Erwachsenen auseinandersetzt, dann könnten teilweise auch Therapieformen für das Kleinkind bei älteren Kindern oder Erwachsenen eingesetzt werden. Aber wie sinnvoll ist die Vojta-Therapie nun bei Säuglingen oder Kleinkindern, für die sie entwickelt

*Anmerkungen zu Abb. 46:* A: Beim beidseitigen Händeschütteln mit dem Autor (G. S.) entwickelt der Patient den Greifreflex relativ stark in der rechten Hand.

B: Patient beim Üben auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät. Die rechte Hand hält den Griff gut; wahrscheinlich unterstützt der Greifreflex das willkürliche Halten. Die linke Hand, mit wenig Willkürkraft und nur schwach aktivierbarem Greifreflex, ist angebunden.

C: Patient mit aktiviertem starken Streckspasmus in den Beinen. Der Streckspasmus behindert nicht oder nur wenig das Gehen auf dem Laufband und das Trainieren in B.



**Abb. 46:** 12jähriger Patient mit schwerer Hirnschädigung durch Autounfall, 10 Monate nach dem Unfall. Patient 6 Monate im Koma; Koordinationsdynamik-Therapie wurde aus organisatorischen Gründen erst nach einem halben Jahr begonnen.

wurde? Sicherlich kann man mit Automatismen unter Symmetriebedingungen (siehe unten) Funktionen des Säuglings verbessern. Auch macht es Sinn zu schauen, welche Strategie die Natur einschlug, um die Funktionen des ZNS zu optimieren oder zu entwickeln. Die Berücksichtigung von Entwicklungsstufen des ZNS bei der Therapie ist wahrscheinlich sinnvoll, da bei der Umsetzung des genetischen Codes auch der Organisationszustand der schon vorhandenen umgebenden Strukturen mitbestimmend ist. Aber der Zugang zur Herstellung oder Wiederherstellung der integrativen Funktionen des ZNS mittels Teilen von Automatismen bleibt eben nur Stückwerk mit niedriger Effizienz. Zur Organisation oder Reorganisation des verletzten ZNS in seinen integrativen Funktionen muss eine Therapie gewählt werden, die auf Messungen am Menschen basiert, die theoretisch begründet ist und die das ZNS in seinen integrativen Funktionen verändert. Die Koordinationsdynamik-Therapie leistet dies. Der Drohung, bei der Therapie von hirngeschädigten Kindern bestimmte Entwicklungsstufen des gesunden Säuglings nicht zu berücksichtigen und diese zu verpassen, fehlt die theoretische Grundlage. Weiter beruht sie nicht auf Messungen und deckt sich nicht mit den Erfahrungen, die mit Patienten gemacht wurden, die während der Geburt eine Hirnschädigung erlitten und nach 12 bis 18 Jahren erst das Laufen lernten, ohne eine Vojta-Therapie erhalten zu haben oder bestimmte Entwicklungsstufen des ZNS trainiert zu haben (siehe unten). Die Drohung, die Entwicklung des Kleinkindes ausgelassen zu haben, ist therapie-destruktiv wie die aus der Bobath-Therapie abgeleitete Spastik-Drohung.

### Unterstützung der Koordinationsdynamik-Therapie

#### durch Messungen der Neubildung und Proliferation von Nervenzellen bei der Ratte und der Maus, ausgelöst durch motorisches Lernen

Es ist gezeigt worden, dass Rennen und andere koordinierte rhythmische Bewegungen das verletzte ZNS beim Menschen reorganisieren [2,3]. Eine solche Therapie wird eine Vielzahl von strukturellen Veränderungen im erwachsenen ZNS einschliesslich der Neurogenese und Zellproliferation auslösen. Da die Koordinationsdynamik-Therapie auch bei kleineren Verletzungen des ZNS (und genetischen Fehlanlegungen) eingesetzt wird und auch das anscheinend normal funktionierende ZNS in seiner Funktion optimiert werden kann, erstaunt es nicht, dass auch bei Ratten und Mäusen die Funktion des ZNS verbessert werden kann, wenn das Rennen und

andere Methoden der Neurorehabilitation angewendet werden, speziell wenn die Tiere bei wenig artgerechter Tierhaltung (Haltung in kleinen Käfigen) wenig Möglichkeiten hatten, durch viel Bewegung, einschliesslich rhythmisch dynamisch koordinierter Bewegungen, ihr ZNS in seiner Funktion zu optimieren.

Vom klinischen Standpunkt ist bei den Veröffentlichungen interessant, dass das motorische Lernen, welches bei erwachsenen Mäusen und Ratten die Nervenzellneubildung und Zellproliferation im Hippokampus induziert [4,5,6], die Prinzipien der Koordinationsdynamik-Therapie stützt. Einige Folgerungen und Ergebnisse der Nervenzell-Neubildung, ausgelöst durch verschiedene Methoden des motorischen Lernens, ähnlich denen der Koordinationsdynamik-Therapie, sollen hier verglichen werden mit den Strategien, die in der Koordinationsdynamik-Therapie benutzt werden, um die Ähnlichkeiten aufzuzeigen:

1. Die Neubildung und das Überleben von neu gebildeten Nervenzellen kann in Ratten und Mäusen beeinflusst werden durch Trainingsmethoden, speziell bei den Fällen, bei denen das ZNS durch fehlende Bewegung nicht optimal funktioniert. Dies wird wahrscheinlich auch für den Menschen gelten.
2. Das Überleben der neugebildeten markierten Neurone war dann im Hippokampus am grössten, wenn bei der Trainingsmethode der Hippokampus wesentlich aktiviert und in seiner Funktion auch gebraucht wurde bei der Ausführung der Aufgabe. Für die Neurorehabilitation bedeutet dies, dass beim Üben von rhythmischen dynamischen koordinierten Bewegungen die integrativen Funktionen am besten wieder erlernt werden, wenn die verletzten Netzwerkeile des ZNS in ihrer Funktion bei der ausgeführten Therapiemethode eingeschlossen sind und die verletzten Netzwerkeile an die gesunden angekoppelt werden.
3. Es muss zwischen der Neubildung von Nervenzellen und deren Überleben unterschieden werden. Da die neugebildeten Neurone abhängiger waren von der Trainingsaktivität als die ausgereiften Neurone, könnten neugebildete Neurone empfindlicher auf Aktivität reagieren. Die Funktion von neugebildeten Neuronen könnte kurz nach ihrer Bildung am meisten beeinflussbar sein. Der funktionelle Einsatz der neugebildeten Neurone hängt also wahrscheinlich von den Trainingsmethoden, den Trainingszeiten sowie vom Therapiebeginn ab.
4. Das Rennen der Mäuse im Laufrad erhöhte die Nervenzellneubildung und das Überleben der neugebildeten Neurone. Vom Rennen als einer erfolgreichen Methode zur Reorganisation des

verletzten menschlichen ZNS wurde erstmals 1996 berichtet [2]. Exzessives Rennen beim motorischen Lernen scheint also ein spezifischer Stimulus zu sein für die Nervenzellneubildung und deren funktionellem Einsatz.

5. Aktivität alleine allerdings ist kein spezifischer Stimulus für die Neurogenese bei Ratten und Mäusen. Diese Folgerung ist in Übereinstimmung mit der Theorie der Koordinationsdynamik-Therapie. Es ist wichtig, welche Methoden des motorischen Lernens eingesetzt werden und welche Netzwerkeile des ZNS bei den Übungen aktiviert werden. Integrative Aktivierungen der neuronalen Netzwerke, wie zum Beispiel durch das Rennen, werden effizienter sein als das Bewegen von einzelnen Gliedmassen oder dem Training von statischen Stellungen.
6. Stressvolle Erfahrungen erhöhten die adrenergen Steroide und Glutamat-Ausschüttungen aus dem Hippokampus bei Tieren bis hin zum Affen und verringerten die Neubildung von Vorläuferzellen der Neurogenese. Destruktiver Stress wird die Neurogenese und damit wohl auch die Reorganisation des ZNS negativ beeinflussen. Das exzessive Schreien von Säuglingen bei der Vojta-Therapie, oft schon vor der Therapie, wird dem Therapieerfolg abträglich sein.

Viele Ergebnisse der trainingsinduzierten Neurogenese bei erwachsenen Ratten und Mäusen ähneln denen, die von Messungen über die Funktionsweise des menschlichen ZNS abgeleitet wurden. Weiter ähneln sie den Vorhersagen der theoretischen Neurowissenschaften und sind in Übereinstimmung mit den klinischen Ergebnissen von Patienten. Die Tierdaten legen nahe, dass die Neurogenese des erwachsenen ZNS eine Strategie ist bei der Vielzahl der strukturellen Veränderungen, die bei der Reorganisation des ZNS stattfinden.

Aber trotz der Ähnlichkeiten einiger Prinzipien der Umorganisation des ZNS zwischen Mensch und Tier, muss doch vergegenwärtigt werden, dass die Tierdaten weit entfernt sind von der klinischen Realität. Man bedenke beispielsweise nur, wie man Sprachtherapie, das Gleichgewicht halten bei zweibeiniger Bewegung, Hand- und Fingerfunktionen, Skoliose, Reorganisation des ZNS nach vielen Jahren, Kinderlähmung nach 36 Jahren (siehe unten), Spastizität, Schmerz, Therapie im Koma, Motivation, Instruktion und interpersonelle Koordination beim Tier simulieren will.

Ausgehend von einer neuen Lerntheorie beim Menschen, bei der das Lernen gesehen wird als eine räumlich-zeitliche Veränderung der die Bewegungsmuster erzeugenden inneren Organisation der neuronalen Netzwerke des ZNS, wird

das Wiedererlernen von Funktionen des verletzten ZNS dargestellt. Es wird sich zeigen, dass man bei der Reorganisation des ZNS auch die natürlichen Impulsmuster berücksichtigen muss, die in Verbindung mit den deszendierenden Impulsmustern Anlass zur Selbstorganisation des ZNS geben, speziell wenn die Effizienz einer Lernmethode erhöht werden soll, was von entscheidender klinischen Bedeutung ist.

## Lernen als ein dynamischer Prozess

### bei einer bimanuellen Koordinationsaufgabe durch Synchronisation mit einer visuell spezifizierten Phasenrelation

Zanone und Kelso studierten das Lernen in einer bimanuellen Koordinationsaufgabe als einen dynamischen Prozess während fünf Tagen beim Praktizieren eines geforderten Phasenmusters [7, 8]. Das Lernen wurde definiert als eine relativ permanente Änderung des Verhaltens in Richtung eines zu lernenden Musters, verursacht durch die Lernmethode (genannt Verhaltensinformation). Das Verhalten während des Lernprozesses wurde quantifiziert durch Messen und Erstellen der Attraktor-Darstellung (Attraktor-Layout) vor, während und nach den praktischen Übungen. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Ausgangskordinationsdynamik und dem zu lernenden Bewegungsmuster (welches sich wie ein Attraktor der Koordinationsdynamik des ZNS verhält, der gelernt werden muss durch das Lernen von bestimmten Phasenrelationen der Bewegungen), entstanden quantitative Veränderungen im Phasendiagramm, welche begleitet wurden von Verlust an Stabilität (Phasenübergang im Phasendiagramm). Der Lernprozess zeigte sich in der kooperativen und kompetitiven Wechselwirkung zwischen der existierenden inneren Koordinationsdynamik und der zu lernenden Koordinationsdynamik, welche durch das zu erlernende Bewegungsmuster erzeugt wird. Wenn das zu erlernende Bewegungsmuster den inneren stabilen existierenden Mustern sehr ähnlich ist, dann stehen kooperative Prozesse im Vordergrund, das Lernen wird schnell voranschreiten, und Instabilitäten werden nicht auftreten. Wenn aber das zu erlernende Bewegungsmuster im Gegensatz steht mit den bestehenden inneren Bewegungsmuster-Koordinationsdynamiken, dann wird mit Zunahme der gespeicherten gelernten Information Instabilität entstehen. Wenig stabile Bewegungsmuster werden ihre Stabilität verlieren, und Phasenübergänge werden zu beobachten sein (Springen von einem Attraktorzustand in einen anderen). Das vorübergehende Auftreten von Instabilitäten während des Lernprozesses spricht also nicht gegen das Existieren eines vor-

anschreitenden Lernprozesses. Es deutet nur an, dass grundsätzliche Strukturen umgelernt werden.

Vor dem Lernen einer neuen Bewegung ist die Verhaltensmusterdynamik in einem Anfangszustand. Während des Lernprozesses findet eine spezifische Veränderung der Inneren Koordinationsdynamik statt. Das Lernen wird im Modell von Zanone und Kelso gemessen an der quantitativen Veränderung des Phasendiagramms (die Phase charakterisiert die kollektive Bewegung).

## Wiedererlernen von motorischen, vegetativen und höheren geistigen Funktionen nach ZNS-Verletzung

### durch manuelle und visuelle Koordination von Hand-, Arm-, Fuss-, Bein- und Rumpfbewegungen, realisiert durch ein Koordinationsdynamik-Therapiegerät

Das Wiedererlernen von motorischen, vegetativen und höheren geistigen Funktionen nach Verletzung des ZNS (und PNS) kann in der gleichen Weise gesehen werden als ein dynamischer Prozess wie beim nicht verletzten ZNS, nur kompliziert durch die Verletzung des ZNS. Beim Wiedererlernen von Funktionen nach ZNS-Verletzung sind mindestens fünf Unterschiede zusätzlich zu betrachten: (1) Die innere Koorganisationsdynamik des Individuums variiert aufgrund der Unterschiedlichkeit der Verletzungen beim Patienten mit ZNS-Verletzung viel stärker als zwischen gesunden Versuchspersonen. (2) Die Effizienz der Lernmethode ist sehr wichtig. Mit ineffizienten Lernmethoden kann bei schweren ZNS-Verletzungen nahezu kein Lerneffekt erreicht werden (siehe Fallbeispiel Poliomyelitis). (3) Um die Effizienz der Lernmethoden erhöhen zu können, sollte der Lernprozess verständlich sein auf der makroskopischen Ebene (Veränderung der Koordination von Bewegungen der Gliedmassen und des Rumpfes), auf der Ebene von Unterorganisationsformen der Neurone im ZNS (im Rückenmark durch Veränderung der relativen Phasen- und Frequenzkoordination zwischen selbstorganisierten prämotorischen Oszillatoren) und auf der Ebene der miteinander wechselwirkenden einzelnen Neurone (Aktivierungseigenschaften von Neuronen, z.B. Koinzidenzdetektoreigenschaft). (4) Die Integrativität des Lernprozesses muss betrachtet werden, um die Effizienz des Lernens zu erhöhen und um die nach der Verletzung funktionell desintegrierten Netzwerkeile wieder zum integrierten Arbeiten zu veranlassen. (5) Der bewegungsinduzierte re-afferente Input und sich aufbauende Regelschleifen müssen betrachtet werden während des (motorischen) Lernprozesses,

um die Effizienz des Lernprozesses erhöhen zu können.

1. Der individuelle Ausgangszustand der Bewegungsmuster-Organisationsdynamik des Patienten ist gegeben durch die Koordinationsdynamik vor der Läsion und der Organisationsdynamik bedingt durch die ZNS-Verletzung. Die Veränderung der Koordinationsdynamik durch die Verletzung ist meist so stark, dass die Koordinationsdynamik vor dem Lernprozess bestimmt wird durch die Verletzung. Das Lernen wird gesehen als Langzeit-Veränderung der inneren Koordinationsdynamik, welche im wesentlichen durch die Verletzung gegeben ist, in Richtung auf eine Koordinationsdynamik, die Bewegungsmuster erzeugt wie vor der Verletzung. Wenn angenommen wird, dass Bewegungsmuster mehr integrativ gespeichert werden im ZNS, dann sind die Bewegungsmuster teilweise in den verbliebenen noch funktionierenden ZNS-Teilen gespeichert.

Aber die organisierten Bewegungsmuster sind pathologisch wegen der teilweise verloren gegangenen integrativen Funktionsweise des ZNS und der zerstörten Netzwerkeile des ZNS. Durch effiziente Lernmethoden soll eine spezifische Langzeitveränderung der inneren Organisationsdynamik erzielt werden in Richtung auf eine Koordinationsdynamik, die Bewegungsmuster erzeugt wie vor der Verletzung. Der Lernprozess löst eine Vielzahl von strukturellen Veränderungen aus, einschliesslich der Neurogenese und direkten genetischen Reparaturmechanismen in einigen ZNS-Teilen. Die Koordinationsdynamik des ZNS ist nach dem Lernprozess anders als vor der Verletzung, nur die erzeugten Bewegungsmuster sind denen vor der Läsion ähnlich. Die Prinzipien der Organisation des ZNS sind die gleichen geblieben, nur die aktuelle Organisationsform des ZNS hat sich verändert.

2. Welche Lernmethoden sind nun effizient und ausreichend integrativ, um die pathologische Koordinationsdynamik nach der Verletzung so zu verändern, dass zum Beispiel wieder physiologische Bewegungen vom ZNS erzeugt werden? Welche Lernmethoden können funktionell getrennte Netzwerkeile wieder «verbinden» und integrative sinnvolle Organisationsformen des ZNS wieder herstellen. Es sollten solche Lernmethoden effizient sein, welche den Organisationsprinzipien des ZNS Rechnung tragen. In einem Teil des ZNS, dem caudalen Rückenmark, ist gemessen worden, dass durch die ZNS-Verletzung die relative Frequenz- und Phasenkoordination zwischen den prämotorischen Oszillatoren verloren gegangen ist [15, 19]. Wenn das Prinzip der relativen Frequenz- und Phasenkoordination von Unterorganisa-

tionsformen des ZNS zur Organisation des ZNS auch für andere ZNS-Teile gilt, dann ist die Wiederherstellung der verloren gegangenen relativen Frequenz- und Phasenkoordination auf den verschiedenen Ebenen der Organisation des ZNS wieder herzustellen. Lernmethoden, die die verloren gegangene relative Frequenz- und Phasenkoordination wieder herstellen, sollten effizient sein.

3. Durch die Verifizierung des Wieder-Erlernens der teilweise verloren gegangenen relativen Koordination von Phasen und Frequenzen auf der makroskopischen Ebene, auf der Ebene der Untereinheiten von Neuronen und auf der Ebene der einzelnen Neurone ist es wahrscheinlich, dass die Oszillator-Formationstherapie (Wiederherstellen von spezifischen Frequenzen bei prämotorischen Oszillatoren) und die Koordinationsdynamik-Therapie (Wiedererlernen von spezifischen relativen Phasenbeziehungen zwischen den prämotorischen Oszillatoren) effiziente Methoden sind zum Wiedererlernen der Koordinationsdynamik des verletzten ZNS mit physiologischem Output.

**Makroskopische Ebene:** Wenn beispielsweise der Patient auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät trainiert und dabei gezwungenermaßen (instruierendes Lernen) die Bewegungen der Hände, Arme, Beine, Füße und des Rumpfes auf einige Millisekunden genau durch Anpassung an das Gerät koordiniert, dann kann das ZNS wieder Lernen, die Gliedmassen wieder koordiniert zu bewegen. Gesunde Kinder, die mit dem Krabbeln nicht die Koordination von Armen und Beinen trainiert haben, haben später oft Koordinationsprobleme zwischen Armen und Beinen. Aber für das Wiedererlernen von Funktionen des stark verletzten ZNS müssen die Gliedmassen stark geführt werden (das ZNS muss stark instruiert werden), weil die alten Bewegungsmuster-Zustände (Attraktorzustände) oft so instabil sind, dass bei nicht genau geführten Bewegungen der Bewegungszustand des ZNS in pathologische Bewegungszustände (Spastik) rutscht. Ein Kind mit einem angeborenen, nicht optimal funktionierenden ZNS kann zum Beispiel unwillkürlich zwischen verschiedenen Bewegungszuständen wechseln. Wenn es beispielsweise in der In-Phase-Bewegung springt, dann springt es aus Versehen auch vorübergehend ungewollt in der Gegen-Phase-Bewegung. Zanone und Kelso [7] haben behauptet, dass ein Phasenwechsel von der In-Phase- zur Gegen-Phase-Bewegung nicht stattfindet, also ein unwillkürlicher Wechsel von der leichten zur schweren Bewegung nicht stattfindet. Dies gilt nur für einen gesunden Men-

sch. Beim Patienten mit einem verletzten ZNS ist ein unwillkürlicher vorübergehender Phasenwechsel von der leichten (In-Phase-Bewegung) zur schweren Bewegung (Gegen-Phase-Bewegung) beobachtbar und kann als diagnostisches Kriterium für ein integrativ schlecht funktionierendes ZNS herangezogen werden.

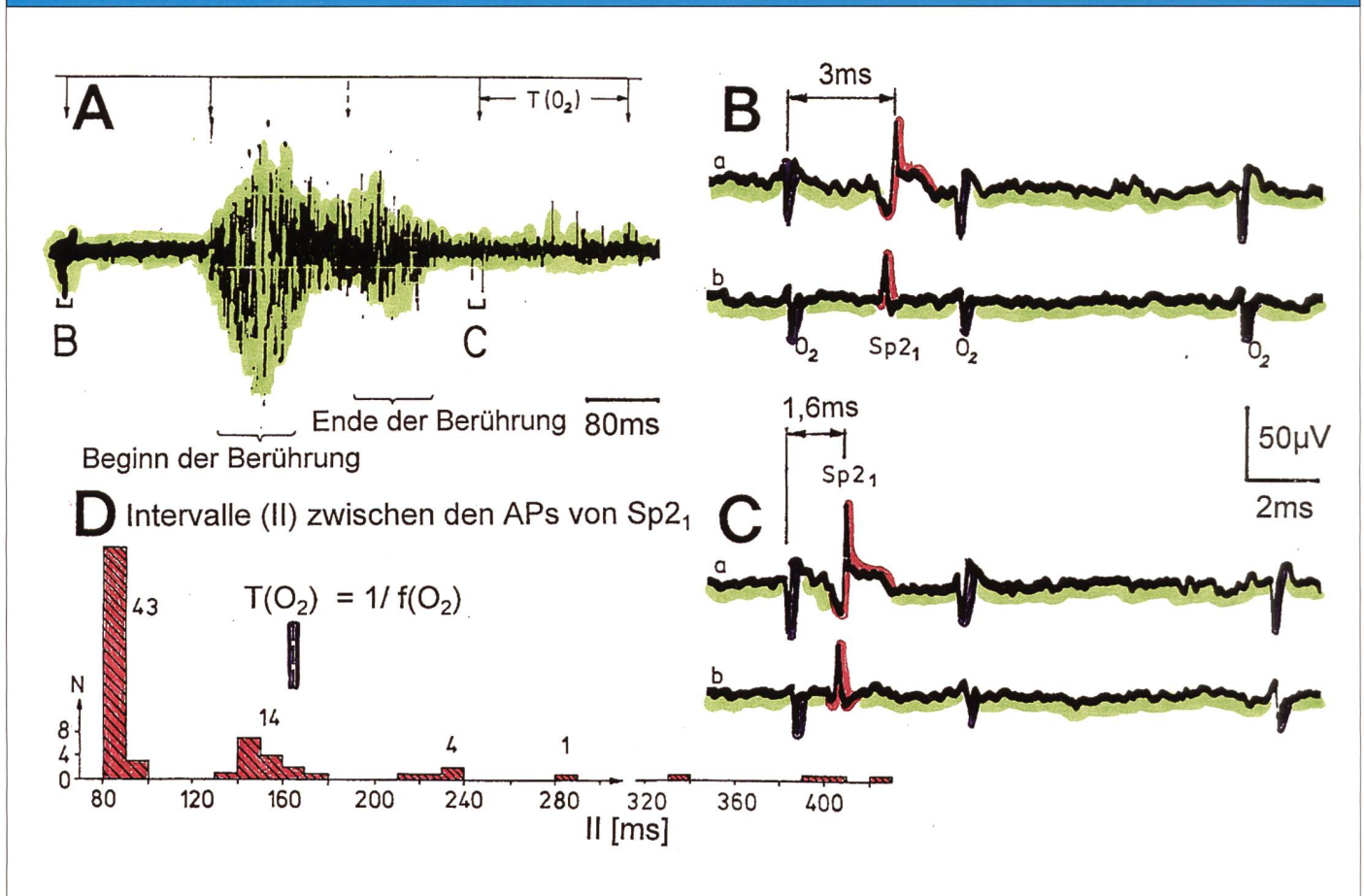
**Ebene der Untereinheiten von Neuronen:** Es ist gemessen worden, dass die selbstorganisierenden prämotorische Oszillatoren nach ZNS-Verletzung ihre spezifische Frequenz verlieren (Abb. 10; von [15]), dass die relativen Phasenbeziehungen zwischen den Oszillatoren und den aktivierenden afferenten Aktionspotentialen an Stabilität verlieren (Abb. 6 von [19]) und dass die prämotorischen Oszillatoren sich teilweise der Willkürkontrolle entziehen (Abb. 11 von [15]). Die prämotorischen Oszillatoren müssen mit der Lernmethode formiert werden, damit sie wieder rhythmisch feuern. Die spezifischen Phasenbeziehungen zwischen den Oszillatoren und den afferenten Impulsmustern müssen neu erlernt werden, damit die Oszillatoren wieder in relativer Koordination rhythmisch feuern. Durch das Wiedererlernen von Frequenz- und Phasenstabilität von neuronalen Untereinheiten in caudalen ZNS-Strukturen erscheint es möglich, dass rostrale ZNS-Strukturen durch Phasen Anpassung gezwungen werden (Wiedererlernen von Phasen), solche koordinierten Impulsmuster auszusenden, dass die prämotorischen Oszillatoren wieder voll der Willkürkontrolle unterliegen. Das Wiedererlernen von spezifischen Frequenz- und Phasenrelationen in den prämotorischen neuronalen Netzwerken und höheren Zentren ist möglich, weil die prämotorischen Oszillatoren externe Schleifen mittels der  $\gamma$ -Schleifen aufbauen können, so dass die prämotorischen Oszillatoren direkt formiert werden können. Die relativen Phasenrelationen zwischen den Aktionspotentialen der sekundären Muskelspindelafferenzen und der  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneurone können mit dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät direkt trainiert und gelernt werden.

**Ebene der einzelnen Neurone:** Es ist gemessen worden, dass die Motoneurone durch afferente oder deszendierende Impulsmuster bei niedriger Erregung sich nicht oder nur teilweise zu prämotorischen Oszillatoren organisieren. Die nicht rhythmisch mit niedriger Aktivität feuern Motoneurone werden dann mit etwa 0.3 Hz nach dem Grössenprinzip aktiviert. Diese rhythmische Aktivierung der einzelnen Motoneurone nach dem Grössenprinzip (Erregungsschwelle) für niedrige Erregung geht mit der ZNS-Verletzung teilweise verloren [9]. Zumindest auf der Ebene des Rückenmarkes ist die Koordination

zwischen einzelnen nicht zu Oszillatoren organisierten Motoneuronen ebenfalls wichtig für die Organisation des ZNS. Da Motoneurone und andere Neurone als Koinzidenzdetektoren arbeiten (Abb. 34, [17]), wird mit synchronisiertem afferenten Input als Spezialfall des koordinierten Inputs schneller die Erregungsschwelle erreicht werden als mit nicht koordiniertem afferenten Input. Räumlich-zeitlich koordinierte afferente Aktionspotentiale sollten auch bei einzelnen Neuronen einen stärkeren Effekt erzielen als unkoordinierter Input. Das Üben, zum Beispiel auf dem Koordinationsdynamik-Therapiegerät bei geringem Kraftaufwand, sollte auch jene Motoneurone zu spezifischem Arbeiten (relativ koordiniertem Feuern von Aktionspotentialen) formatieren, die sich nicht zu Oszillatoren organisiert haben. Räumlich-zeitlich koordinierter afferenter Input sollte die Selbstorganisation von neuronalen Untereinheiten verbessern und wichtig sein bei der Wiederherstellung von integrativen Funktionen im verletzten ZNS. Es ist vorgeschlagen worden, dass synchronisierter afferenter Input geeignet wäre, das Hervortreten von Netzwerkverbindungen zu etablieren und funktionelle Untereinheiten aus Neuronen zu bilden [10]. Es ist wahrscheinlich, dass räumlich-zeitlich koordinierter afferenter Input auch geeignet ist, das Hervortreten von Netzwerkverbindungen zu stärken, so dass auch das Hervortreten von integrativen Funktionen gestärkt wird.

4. Bei schwerer ZNS-Verletzung sind auch die integrativen Funktionen des ZNS teilweise verloren gegangen, wie sich beispielsweise an unkoordinierten Bewegungen oder Nichtbewegungen von Armen und Beinen, an nichtkoordinierten Harnblasenfunktionen (Harnblasendysnergie) oder wenig koordiniertem Speichelfluss zeigt. Die integrativen Funktionen des verletzten ZNS werden dann am besten wiedererlernt, wenn beim koordinierten Üben auch jene neuronalen Netzwerke wesentlich beteiligt sind, die auch wieder in Koordination arbeiten sollen.
5. Um die motorischen, vegetativen und höheren geistigen Funktionen beim Patienten mit schwerer ZNS-Schädigung entscheidend zu verbessern, müssen die Lernmethoden effizient sein. Zanone und Kelso sehen das Lernen als eine spezifische Modifikation der inneren Dynamik des ZNS an, wobei der visuelle Input hauptsächlich zum Lernen herangezogen wurde. Bei schweren ZNS-Schäden müssen möglichst viele physiologische afferente Inputs zur Veränderung der Organisation des ZNS herangezogen werden, um die Selbstorganisation des ZNS möglichst stark in Richtung physiologische Organisation zu schieben, das heisst um so die Lernrate zu erhöhen. Der afferente

### Zeitliche Koordination zwischen den APs des oszillatorisch feuernenden Motoneurons $O_2$ und der sekundären Muskelspindel-Afferenz $Sp_{2_1}$



**Abb. 47:** Zeitliche Korrelation zwischen den Aktionspotentialen (APs) des oszillatorisch feuernenden  $\alpha_2$ -Motoneurons  $O_2$  und der sekundären Muskelspindelafferenz  $Sp_{2_1}$ . Ableitung von einer dorsalen S4-Nervenwurzel von einem Hirntoten (HT6). Vorverstärkung 1000x. Messprinzip siehe Abb. 2 und 3 von [15].

Input von den Muskelspindeln ist sehr wichtig, weil die Muskelspindeln über die  $\gamma$ -Schleife durch das ZNS ansteuerbar sind und weil sie direkt in die relative Koordination eingreifen. In *Abbildung 47* [11] ist dargestellt, dass ein  $\alpha_2$ -Motoneuron in relativer Koordination mit einer sekundären Muskelspindelafferenz feuert. Das alle 160 ms rhythmisch mit 3 Aktionspotentialen feuernde  $\alpha_2$ -Motoneuron zeigt eine gute relative Koordination zu den Muskelspindel-Afferenzen. Der Phasenunterschied zwischen zwei Motoneuron-Aktionspotential-Impulszügen und den entsprechenden Muskelspindel-Aktionspotentialen beträgt in *Abbildung 47B,C* 1,4 ms. Im Mittel lag die Phasenkorrelation zum gegebenen Zeitpunkt und des vorliegenden Organisationszustandes des Rückenmarkes bei etwa 3 bis 5 ms (*Abb. 47D*). Eine solche relative Phasenkoordination ist beim Menschen bei der Registrierung von natürlichen Impulsmustern vielfach direkt gemessen worden. In einem folgenden Fachartikel

wird genauer auf die Erhöhung des koordinierten afferenten Inputs eingegangen, um die Effizienz des Wiedererlernens von Funktionen des ZNS weiter zu verbessern. Denn nur mit effizienten Lernmethoden hat der Patient bei

schwerer ZNS-Schädigung eine Chance, wesentliche Funktionen wieder zu erlernen.

In der nächsten «Physiotherapie» folgen Fallbeispiele zu diesem Thema.

*Anmerkungen zu Abb. 47:* A: Gesamtüberblick über die aufgenommene Registrierung; nur Spur a ist dargestellt. 4 Oszillationsperioden des Motoneurons  $O_2$  sind mit  $T(O_2)$  markiert. Die APs des Impulszuges sind schlecht erkennbar wegen der zu langsamen Zeitablenkung und der schlechten Digitalisierung. Ein Impulszug (gestrichelter Pfeil) ist von den vielen Aktionspotentialen der stimulierten Hautafferenzen überlagert.

B, C: Zeitlich gestreckte Aufnahmestücke von A. Die APs der Einzelnervenfaser-Aktionspotentiale des Impulszuges des Motoneurons sind mit  $O_2$  und die APs der Muskelspindelafferenz mit  $Sp_{2_1}$  markiert. Die Phase der zeitlichen Korrelation zwischen dem Impulszug des Motoneurons, bestehend aus 3 APs, und dem AP der sekundären Muskelspindelafferenz beträgt zu diesem Zeitpunkt 3 ms (B) und 1,6 ms (C) (Phasendifferenz = 1,4 ms). Die Digitalisierung ist 4mal besser als in A, aber immer noch schlecht, wie an den kleinen Amplituden der APs auf der Oszillographenspur «b» in C zu erkennen ist. Die Dauer der APs des Motoneuron-Axons und der sekundären Muskelspindelafferenz beträgt etwa 0,2 ms; die Dauer der APs der gemessenen

FF-Muskelfasern einer motorischen Einheit in *Abb. 52* beträgt etwa 4 ms. Die Muskelfaser-Aktionspotentiale sind also viel länger und grösser (mindestens 10x) als die APs von Nervenfasern und daher auch viel leichter messbar. Die Fortleitungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Muskelfasern sind aber etwa 10x langsamer (keine saltatorische Erregungsfortleitung). D: Histogramm der Intervalle zwischen den APs der sekundären Muskelspindelafferenz  $Sp_{2_1}$ . Die Oszillationsperiode des rhythmisch feuernenden Motoneurons  $O_2$  ist durch eine gestrichelte Linie zum Vergleich eingetragen. Die Zahlen im Histogramm geben die Zahl der Messungen in den Histogrammspitzen an. Wenn man die Frequenz des Feuerns der Muskelspindelafferenz mit der Frequenz des Feuerns des Motoneurons vergleicht, dann sieht man, dass die Differenz der AP-Intervalle nur 3 bis 5 ms beträgt ( $2 \times$  Intervall der APs von  $Sp_{2_1} \approx 2 \times 84$  ms (Hauptspitze) = 168 ms  $\approx$  165 ms = Oszillationsperiode von  $O_2$ ). Die zeitliche Korrelation des Feuerns zwischen der Muskelspindelafferenz und des selbstorganisierten prämotorischen Oszillators beträgt zu dieser Epoche etwa 3 ms.