

**Zeitschrift:** Physiotherapie = Fisioterapia  
**Herausgeber:** Schweizerischer Physiotherapeuten-Verband  
**Band:** 36 (2000)  
**Heft:** [1]

**Artikel:** Koordinationsdynamik-Therapie, 1. Teil : Theorie : Ersttherapie von Hirn-verletzten und verpass(tz)te Frühtherapie  
**Autor:** Schalow, Giselher  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-929545>

#### 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:** 03.02.2026

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

# Koordinationsdynamik-Therapie, 1. Teil: Theorie

## Ersttherapie von Hirnverletzten und verpass(tz)te Frühtherapie

Dr. med. habil., Dr. rer. nat., Dipl. Ing. Giselher Schalow, Department of Neurology and Rehabilitation, University Hospital Tampere, PB 2000, 33521 Tampere; Institut for Coordination Dynamic Therapy and Human Neurophysiology, Pinewood House, PL 37, FIN-54801 Savitaipale, Finland.

Mittels der auf human-neurophysiologischen Messungen beruhenden Koordinationsdynamik-Therapie erscheint es möglich, jedes verletzte zentrale Nervensystem (ZNS) in seinen Funktionen entscheidend zu verbessern. Anhand von drei Jungen im Alter von 10 bis 14 Jahren, die bei einem Autounfall respektive Fahrradunfall eine schwere Hirnverletzung erlitten, wird gezeigt, dass zwar auch bei einer verpassten Frühtherapie Funktionen im verletzten ZNS restauriert werden können, dass aber bei einer Frühtherapie sich nicht oder viel weniger Fehlorganisationen ausbilden, so dass die funktionelle Reorganisation des ZNS einfacher ist.

### Summary

Three boys, 10, 12 and 14 years old, suffered severe brain lesions almost at the same time, two in a car and one in a bicycle accident. In the 10- and 14-year-old patients an intensive coordination dynamic therapy was started approximately 5 and 10 weeks after the trauma in vigilance coma stage. The two patients recovered unexpectedly early from the coma and progressed

quickly in their recovery of motor functions so that they re-learned running after 4 months of therapy, even though their locomotor functions are still far from normal. The 12-year-old patient did not obtain intensive coordination dynamic therapy, only conservative physiotherapy. He recovered much later from the coma (6 months instead of 6 weeks) and has now very much extensor spasticity, shortened tendons, problems with several joints, quite much pain, weakened mental functions, grasp reflex in the right hand and nearly no useful motor functions in the legs. Eight months after the accident also an intensive coordination dynamic therapy was started with him, including exercising on the special coordination dynamic therapy device in recumbent and sitting position, and treadmill walking. After 4 months of rather intensive therapy an essential progress occurred. The patient became able to walk a bit when supported. His hand functions improved, and he is now motivated to exercise and he has the feeling that the functional state of his central nervous system (CNS) is progressing. The patient is back to his old school, but

two classes lower. The case report of the 12-year-old patient shows that, even when the early coordination dynamic therapy is missed, there is still hope that CNS functions can substantially be improved. Only, the therapy is more difficult to perform, because of the pathologic organizations which have taken place in the CNS in the meantime.

### Einleitung und Theorie

#### Theorie der Koordinationsdynamik-Therapie

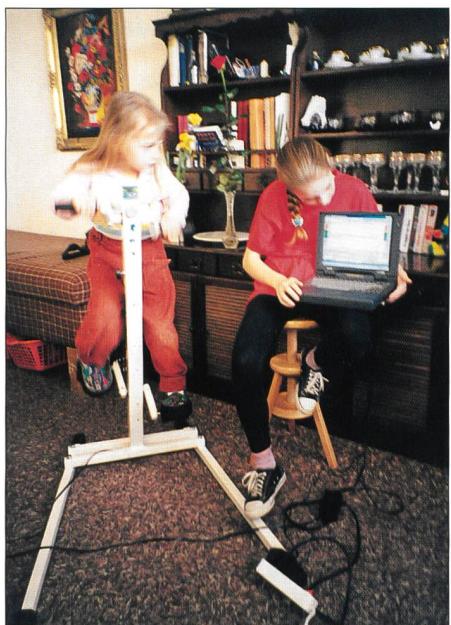
Aufgrund fünf neuer Entwicklungen in der Human-Neurophysiologie kann das verletzte oder in seinen Funktionen beeinträchtigte zentrale Nervensystem (ZNS) des Menschen funktionell reorganisiert und damit repariert werden. Die fünf neuen Konzepte sind:

1. Die Selbstorganisation neuronaler Netzwerke (Koordinationsdynamik). Die Organisation findet statt durch räumlich-zeitlich koordiniertes Feuern von Neuronen (relative Koordination), welches zeitlichen Veränderungen unterliegt (Dynamik). Das ZNS wird als ein neuronales Netzwerk angesehen, welches in seiner Organisation veränderbar ist durch Umlernen.
2. Die Selbstorganisation des ZNS findet statt durch eine relative (sich spezifisch wechselnde) Frequenz- und Phasenkoordination des Feuerns der Neurone.
3. Die Neubildung von Nervenzellen (Neurogenese) und deren funktionelle Proliferation wird induziert und gesteuert durch Lernprozesse, einschließlich koordinierter rhythmischer Bewegungen (motorisches Lernen).
4. Das integrative Lernen, Speichern und Abrufen von Netzwerkzuständen ist die zweite distributive Funktionsmöglichkeit des menschlichen ZNS (neben der relativ lokalisierten). Der Einsatz dient der Reorganisation des verletzten ZNS (folgert aus der klinischen Arbeit mit der Koordinationsdynamik-Therapie).
5. Jedes ZNS ist durch Umlernen in seinen physiologischen Funktionen entscheidend verbesserrbar (ergibt sich aus den klinischen Ergebnissen bei der Koordinationsdynamik-Therapie).

Das verletzte oder in seinen physiologischen Funktionen beeinträchtigte ZNS wird in aktivierten Netzwerkteilen in seiner Grundstruktur funktionell reorganisiert durch ein Wiedererlernen von verloren gegangener Frequenz- und Phasenkoordination beim Wiedererlernen koordinierter rhythmischer Bewegungen. Bei schweren ZNS-Verletzungen ist eine Restauration physiologischer Funktionen nur möglich, wenn das instruierte Lernen integrativ, koordiniert und effizient ist. Das Wiedererlernen von relativer Frequenz- und Phasenkoordination und alter Bewegungs-

### Schlüsselwörter

- Human-Neuroelektrophysiologie
- Phasen- und Frequenzkoordination
- Koordinationsdynamik
- ZNS-Verletzung
- Koordinationsdynamik-Therapie
- Koordinationsdynamik-Diagnostik
- Instrumentiertes Lernen
- Lerntransfer
- Mitbewegung
- Spastik-Reduzierung



**Abb. 80:** Messung der Koordinationsdynamik beim Ausführen von koordinierten Arm-, Bein- und Rumpfbewegungen im Rahmen einer Skoliose-Vorbeugung.

muster des verletzten ZNS kann erreicht werden durch:

1. Den Einsatz von Therapiegeräten, die auf wenige Millisekunden genau Frequenz- und Phasenkoordination vorgeben (instruierendes instrumentiertes Lernen; Abb. 80).
2. Das Üben von Automatismen, Haltungen und alteingelernten Bewegungsmustern, die durch die Verletzung nur wenig in ihrer Funktion verändert sind.

Die Erhöhung der Wiedererlernrate der spezifischen räumlich-zeitlichen koordinierten Aktivitätsmuster der vielen Milliarden Neurone der neuronalen Netzwerke des ZNS (bei denen durchschnittlich jedes Neuron etwa 4000 Verbindungen zu anderen Neuronen eingegangen ist) wird bestimmt durch vier Faktoren beim Wiedererlernen:

1. Die Genauigkeit der Koordination der Bewegungen unter der Therapie, um funktionell getrennte Netzwerkteile wieder zu verbinden und nicht bewegliche Gliedmassen wieder an die Gesamtbewegung anzukoppeln.
2. Die Erhöhung der Integrativität der koordinierten ZNS-Aktivierung bei der Koordinationsdynamik-Therapie, um möglichst viele Frequenz- und Phasenkoordinationen gleichzeitig zu trainieren, um möglichst viele Teilfunktionen (Teilnetzwerkzustände) gleichzeitig zu trainieren und zu koordinieren und um auch die sehr integrativen Eigenschaften, wie die höheren geistigen Funktionen, zu verbessern.
3. Die Erhöhung des physiologischen bewegungsinduzierten re-afferenten Inputs und der

physiologischen deszendierenden Impulsmuster zur Stärkung der physiologischen Selbstorganisation der verletzten neuronalen Netzwerke und deren Kommunikation mit der Außenwelt durch Regelprozesse.

4. Durch die Intensität der Therapie: Die «adaptive Maschine ZNS» passt sich nur an, wenn sie gefordert wird. Therapiezeit pro Tag etwa 4 bis 7 Stunden.

### Koordinationsdynamik-Konzept

Die Theorie der Selbstorganisation und Funktionsmusterausbildung in Systemen, die sich nicht im Gleichgewicht befinden, baut auf das Konzept der Synergetik auf [1]. Koordinationsmuster des ZNS werden behandelt mittels ihrer nichtlinearen Dynamik. Die Koordinationsmuster werden charakterisiert mittels niedrigdimensionaler Variablen, die die kollektiven Eigenschaften des Systems für eine spezielle Funktion beschreiben. Es wird also versucht, im hochdimensionalen neuronalen Netzwerk ZNS die kollektiven Eigenschaften einiger spezieller (z.B. Bewegungs-) Funktionen mit wenigen Ordnungsparametern zu beschreiben, um dann Schlüsse daraus zu ziehen für die Funktionen des ZNS. Beobachtbare Koordinationsmuster werden mittels Attraktoren (siehe Definition) der Ordnungsparameterdynamik dargestellt. Biologische Randbedingungen wirken sich auf die Parameter der kollektiven Dynamik aus. Mehrere Koordinationsmuster können unter den gleichen Bedingungen existieren (Multistabilität). Der Verlust an Stabilität führt zum Wechseln der Koordinationsmuster (z.B. Bewegungsmusteränderung) und gibt so Anlass zu Phasenübergängen bei Nicht-Gleichgewicht.

Fluktuation und differentielle Stabilität von Bewegungszuständen bestimmen die Dynamik der Änderung zwischen verschiedenen Koordinationsmustern. Wenn ein Koordinationsmuster eine sehr hohe Stabilität hat, kann es erscheinen, als wenn dieses Bewegungsmuster mittels eines fest verschalteten Bewegungsgenerators erzeugt wurde. Die Koordinationsdynamik-Tendenzen, die den Netzwerken innewohnen, wenn kein Input vorliegt, werden als innere Dynamik bezeichnet. Diese inneren Koordinationsdynamik-Tendenzen, nämlich die Neigung zum räumlich-zeitlich koordinierten Feuern der Neurone, hängt ab von der Vernetzungsdichte mittels Axonen und Dendriten, von der Stärke von Synapsen, von Erregungsfortleitungsgeschwindigkeiten, von differentiellen Membraneigenschaften (im Bereich von Synapsen und ausserhalb von Synapsen) und anderen Netzwerkeigenschaften. Das Organisationsmuster des ZNS ergibt sich in diesem Konzept als die Konsequenz der kooperativen und der kompetitiven Wechselwirkungen zwischen innerer Koordinationsdynamik und deren Verän-

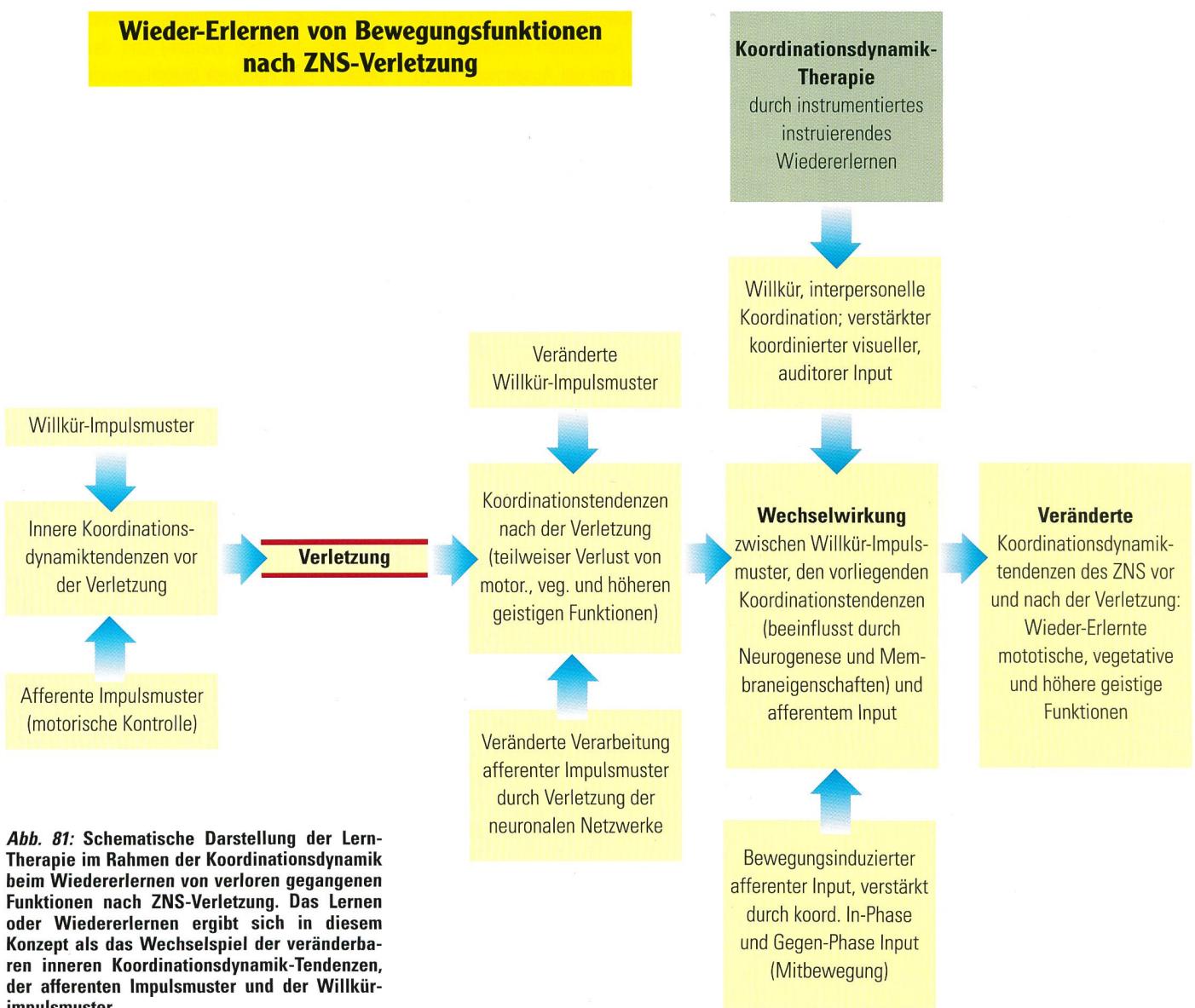
derung durch die Intention (das Netzwerk beeinflussende Impulsmuster, welche durch die Intention generiert werden) und der externen Dynamik (das Netzwerk beeinflussende afferente Impulsmuster aus der Peripherie und deren Verarbeitung) (Abb. 81).

### Definition: Attraktoren

Wenn  $\mathbf{x}$  eine charakteristische Variable ist, die das dynamische System beschreibt, dann unterliegt  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_t$ , wobei  $t$  die Zeit ist, dem dynamischen Gesetz  $d\mathbf{x}/dt = \mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{x}_t, \text{Parameter}, \text{Noise})$  (die rechte Seite wird Vektorfeld genannt). Spezielle Lösungen dieser Gleichung werden Attraktoren genannt, wenn sie asymptotisch stabil sind; alle Nachbarlösungen konvergieren, in Abhängigkeit von der Zeit, zu den Attraktorlösungen. Attraktoren spielen eine Schlüsselrolle beim Herstellen von Modellen, weil das zeitliche Verhalten von kollektiven Variablen auf Attraktoren abgebildet werden kann. Das Attraktortal (Attraktorbasis) ist definiert als der Satz von Anfangspunkten, von welchen die Trajektorien zum gegebenen Attraktor konvergieren.

Beim Erlernen einer bimanuellen Koordinationsaufgabe, beim Synchronisieren von Fingerbewegungen zu einer visuell vorgegebenen Phasenrelation, wird die Koordinationsdynamik charakterisiert durch eine kollektive Variable, nämlich die relative Phase  $\varphi$ . Mit der Gleichung für den Ordnungsparameter  $d\varphi/dt = -\partial V/\partial\varphi$  und dem Potential  $V = -a \cos(\varphi) - b \cos(2\varphi)$  (siehe Abbildungen 15 und 24) kann das Verhalten des Systems sichtbar dargestellt werden, indem die Variable  $\varphi$  durch einen Ball repräsentiert wird, der sich in überdämpfter Weise im Potential  $V$  bewegt. Einfach gesagt, Potentialseenken sind die Attraktoren, in welche der Ball hineinrollt (zu welchen Netzwerkzustände hingezogen werden), und die Position des Balles repräsentiert den augenblicklichen Netzwerkzustand.

Bei der theoretischen Analyse von koordinierten Bewegungsmustern der vier Gliedmassen sind die kollektiven Variablen, welche das koordinierte Bewegungsmuster von Armen und Beinen beschreiben, die drei relativen Phasen zwischen den vier Gliedmassen [2]. Die Gangarten werden klassifiziert durch ihre Symmetrieeigenschaften, welche dargestellt werden können als Invarianzen unter Gruppentransformationen.



**Abb. 81:** Schematische Darstellung der Lern-Therapie im Rahmen der Koordinationsdynamik beim Wiedererlernen von verloren gegangenen Funktionen nach ZNS-Verletzung. Das Lernen oder Wiedererlernen ergibt sich in diesem Konzept als das Wechselspiel der veränderbaren inneren Koordinationsdynamik-Tendenzen, der afferenten Impulsmuster und der Willkür-Impulsmuster.

### Beseitigung von Spastik-Attraktorzuständen durch Stärkung der Stabilität der Attraktorzustände für physiologische Bewegungen

Im schwer verletzten ZNS kann die Anzahl der kollektiven Variablen (Kontrollparameter) gross sein, um die gestörte Koordinationsdynamik zu beschreiben, und die Multistabilität von Attraktorzuständen kann ebenfalls gross sein, weil beispielsweise sehr stabile Attraktorzustände einer sehr integrativen Bewegung (wie z.B. das Gehen) in die Attraktorzustände von Bewegungen der einzelnen Gliedmassen zerfallen können. Die funktionelle Komplexität des ZNS wird teilweise erst nach einer Verletzung sichtbar, weil vor der Verletzung die extrem guten Regelprozesse sie nicht sichtbar werden liessen. Die also anscheinend einfach korrelierten Bewegungen des gesunden Menschen, die mit wenig kollektiven Variablen beschrieben werden können, beruhen

auf einer tiefen Komplexität von Frequenz- und Phasenkoordination. Andererseits können die teilweise sehr komplexen Bewegungen eines Patienten nach ZNS-Verletzung durch Wiederherstellen (Wiedererlernen) von relativ einfachen integrativen Phasenrelationen wieder auf physiologische Bewegungen zurückgeführt werden. Die differentielle Stabilität jener Attraktoren muss vergrössert werden, welche die koordinierten physiologischen Bewegungen darstellen. Dies ist zum Beispiel möglich mittels des instrumentierten instruierenden Lernens mit dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät. Speziell ist es möglich, physiologische Attraktoren mit geringer Stabilität neben Spastik-Attraktoren grosser Stabilität aufzubauen. Mit der Zunahme der Stabilität des Attraktors der physiologischen Bewegung, nimmt die Stabilität des funktionell naheliegenden Attraktors jener Spastizität ab (Abb. 82). Mit dem Wieder-

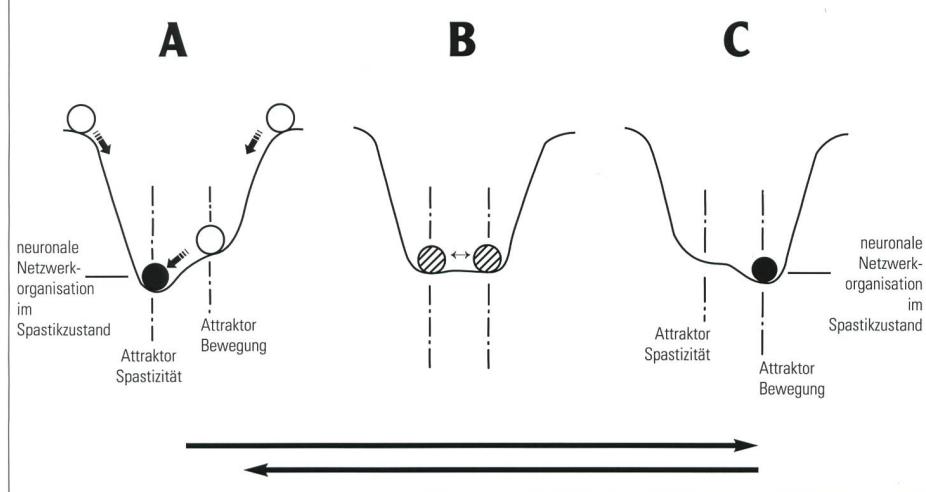
erlernen von physiologischen Bewegungen werden die verschiedenen Arten von Spastik und Netzwerk-Fehlorganisationen von alleine vermindernt.

### Theorie der Koordinationsdynamik des verletzten ZNS und das Wiedererlernen von Physiologischen Bewegungen

Das Schlüsselkonzept für die Reparatur des verletzten ZNS ist das Erforschen der Organisation des menschlichen ZNS unter physiologischen und pathophysiologischen Bedingungen und die funktionelle Reorganisation des verletzten ZNS. In einem Teil des menschlichen ZNS, nämlich dem Rückenmark, konnte der Autor teilweise die Selbstorganisation und die Bewegungsmusterbildung (kollektive Effekte durch zeitlich abgestimmtes Feuern von Neuronen) klären:

1. Durch das Messen von Frequenz- und Phasenkoordination zwischen dem Feuern von  $\alpha$ - und

## Verbesserung der Koordinationsdynamik im Kurzzeitgedächtnis



**Abb. 82:** Vorübergehende Reduzierung schwerer Spastik während des Bewegens auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät.

Anmerkung zu Abb. 82: A. Zu Beginn des Drehens auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät ist die Spastik stark (Attraktortal Spastik tief), so dass kaum eine physiologische Bewegung aufgebaut werden kann. Der Netzwerkzustand Bewegung rollt (gleitet) immer in den Spastik-Zustand. B. Durch die auf einige Millisekunden genau koordinierten Bewegungen von Armen, Beinen und Rumpf wird das Attraktortal Spastik flacher und das Attraktortal Bewegung tiefer. Kurzeztig kommt schon eine Bewegung zustande. C. Nach weiteren koordinierten Bewegungen ist das Attraktortal Spastik noch flacher geworden und das Attraktortal Bewegung noch tiefer geworden, sodass jetzt vorübergehend der Netzwerkzustand koordinierte Bewegung stabil eingenommen werden kann. Vereinfacht ausgedrückt, der Netzwerkzustand (der kleine Ball) ist im Attraktor (Senke oder Marmeloch) physiologische Bewegung. Die vorübergehende Verringerung der Spastik zugunsten der Stabilisierung des Bewegungszustandes kann Minuten bis einige Stunden andauern und ist durch 2 Pfeile unterhalb der Potentiale angedeutet. Dass die Spastik nicht wieder die alte Stärke erreicht, ist durch einen kürzeren Rückwärtspfeil angedeutet. Die Anzahl der notwendigen Bewegungen zur Reduzierung der Spastik beträgt einige Zehn bis viele Hundert.

$\gamma$ -Motoneuronen und sekundären Muskel-spindelafferenzen im nicht oder nur wenig veränderten ZNS von Patienten (Abb. 5, 19, 22, 47, 55, 59) und im verletzten ZNS von Patienten (Abb. 8, 10, 11, 57, 60).

2. Durch direktes Messen der Organisationsverbesserung des verletzten ZNS von Patienten mittels der Koordinationsdynamik-Messmethode [12] (Abb. 90) aufgrund einer funktionellen Reorganisation mittels der Koordinationsdynamik-Therapie im Kurzzeitgedächtnis und im Langzeitgedächtnis (funktionelle Reorganisation).
3. Durch Messen von Bewegungsverbesserungen (z.B. Abb. 86).

Wegen der gemessenen relativen Frequenz- und Phasenkoordination der Neurone im ZNS des Menschen wurde die Theorie der Koordinationsdynamik zum Wieder-Erlernen von motorischen, vegetativen und höheren geistigen ZNS-Funktionen herangezogen. Das Wiedererlernen (Res-

toration) von koordinierten Bewegungsmustern wird gesehen als eine Änderung der inneren Koordinationsdynamik-Tendenzen nach der Verletzung (makroskopisch gesehen als eine Veränderung der koordinierten Bewegungen von Armen, Beinen und Rumpf) in Richtung auf eine innere Organisation des verletzten ZNS, welche wieder physiologischere Bewegungsmuster und vegetative sowie höhere geistige Funktionen bei entsprechendem Input erzeugt (Abb. 81). Die effiziente Veränderung der Koordinationsdynamik wird durch die Koordinationsdynamik-Therapie erreicht, welche die folgenden Strategien benutzt:

1. Durch Ausführen von auf Millisekunden genau koordinierten Bewegungen (instruierendes instrumentiertes Lernen), um funktionell getrennte neuronale Netzwerkteile des ZNS wieder zu verbinden.
2. Durch Erhöhung der Integrativität der ausgeführten koordinierten Bewegungen, um (a) möglichst viele Phasenbeziehungen gleichzeitig zu üben und um (b) die sehr integrativen Funktionen wie die höheren geistigen Funktionen wieder zu restaurieren.
3. Durch Erhöhung des afferenten und bewegungsinduzierten physiologischen re-afferenten Inputs, um die physiologischen Netzwerkzustände des verletzten ZNS zu stärken und die pathologischen Netzwerkzustände zu schwächen.
4. Durch Training an physiologischen Limits, um die «adaptive Maschine» ZNS zum Anpassen zu zwingen.

Die Selbstorganisation neuronaler Netzwerke mit ihrer zeitlichen Veränderung entsteht durch die Wechselwirkungen der existierenden inneren Koordinationstendenzen der Netzwerke, der Intentions-Netzwerk-Impulsmuster und den afferenten Impulsmustern aus der Peripherie, einschließlich des bewegungsinduzierten re-afferenten Inputs. Einzelne Netzwerkteile sind funktionell miteinander verbunden durch eine Netzwerk-Kommunikation, einschließlich Regulationsprozessen mit anderen Netzwerkteilen und der Peripherie.

Die Verbindung zwischen der Aktivität von Neuronen und der Bewegung resultiert aus den kollektiven Effekten auf mikroskopischer Ebene (zeitlich-räumliches Feuern von Neuronen), welche makroskopische Ordnung und Unordnung erzeugen, teilweise über die Zwischenstufe von rhythmisch feuern den, sich selbst organisierenden lokalen Netzwerken, den Oszillatoren. Koordination kann beobachtet werden:

1. in den koordinierten Bewegungen von Armen, Beinen und Rumpf (quantifiziert durch die Koordinationsdynamik-Diagnostik);
2. den koordinierten Muskelaktivitätsprogrammen in elektromyographischen Ableitungen;
3. im koordinierten Feuern von prämotorischen Oszillatoren (Ensemble-Stufe), einzelnen Neuronen (Einzelneuron-Stufe) und aktivierenden Afferenzen.

Nach ZNS-Verletzung ist die relative Koordination auf allen Stufen der Beobachtung beeinträchtigt. Die innere Organisation des ZNS zeigt nur noch schlechte Koordination. Beim Trainieren auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät, d.h. beim instrumentierten instruierenden motorischen Lernen, können Frequenz- und Phasenkoordination wiedererlernt werden. Da die neuronalen Netzwerke des ZNS mittels Rezeptoren mit der Peripherie kommunizieren, erreicht – beim Ausführen von koordinierten Bewegungen – die relative Koordination mittels Regelschleifen (z.B.  $\gamma$ -Schleife) die neuronalen Netzwerke. Die Beziehung zwischen der Koordinationsdynamik von Armen und Beinen und der Koordinationsdynamik von prämotorischen Oszillatoren durch die sekundären Muskelspindelafferenzen (und Haut- und Gelenk-Afferenzen) bildet eine Verbindung zwischen der makroskopischen Ebene und der Ensemble-Ebene. Die  $\gamma$ -Schleifen (oder die externen Schleifen der prämotorischen Oszillatoren) bilden also eine Verbindung zwischen der makroskopischen Ebene und der Ensemble-Ebene. Nach einer Deafferentierung des menschlichen Rückenmarkes (z.B. durch eine Rückenmarkverletzung, die sensibel und sensorisch komplett ist, aber Motorik vorhanden ist) kann der Patient nicht mehr willkürlich gehen, auch wenn er gestützt wird. Ein gewisser afferenter Input ist also zur Organisation von Bewegungsmustern im menschlichen ZNS notwendig.

Die relative Koordination bedeutet primär nicht angenäherte Koordination, sondern das spezifische Wechselsein komplizierter Koordinationen mit voranschreitender Zeit zwischen einzelnen

Neuronen oder Neuron-Ensembles. Die Koordinationsdynamik-Therapie soll die Genauigkeit der relativen Koordination verbessern, d.h. sie soll die Genauigkeit der sich räumlich-zeitlich wechselnden Phasenbeziehungen verbessern.

Nach einer schweren ZNS-Verletzung hat sich auch die Koordinationsdynamik des ZNS stark verändert. Mit einer zu spät einsetzenden adäquaten Therapie zur Reorganisation des ZNS bilden sich dann schon vor der Therapie pathologische Netzwerkorganisationen aus, die Anlass zu pathologischen Netzwerkzuständen und Attraktoren geben, wie verschiedene Arten von Spastizität, unphysiologische Haltungen oder nicht physiologische Bewegungen von Händen, Armen und Beinen.

Beim Wiedererlernen von alten Funktionen des ZNS können beim kooperativen und kompetitiven Wechselspiel zwischen den inneren Koordinationstendenzen des ZNS und den Bewegungsmuster-Ausbildungstendenzen zwei Arten der Änderung der existierenden Koordinationstendenzen auftreten, welche durch die Impulsmuster der Intention und der afferenten Impulsmuster der Peripherie induziert werden. Wenn erstens das Wiedererlernen nur das Verschieben von vorhandenen Attraktorzuständen notwendig macht, treten hauptsächlich kooperative Mechanismen auf, und Parameteränderungen in der Koordinationsdynamik korrespondieren mit Anpassungen von aktuellen Phasenbeziehungen zwischen den spinalen Oszillatoren und Neuronen innerhalb der gleichen Koordinationsstrategie der neuronalen Netzwerke. Wenn aber zweitens das notwendig zu Erlernende stark von den vorhandenen existierenden Koordinationstendenzen abweicht, können kompetitive Mechanismen einen Verlust an vorübergehender Stabilität bewirken (was sich in einer grösseren Variabilität bei der Verbesserung der wiedererlernten Bewegungen auswirken kann) und/oder die wieder zu erlernenden Koordinationstendenzen werden zu der vorliegenden Koordinationstendenzen hingezogen, d.h. dass zum Beispiel ein zu erlernender physiologischer Bewegungszustand zu einem Spastik-Zustand hin gezogen werden kann. Beispiele dafür, dass ein wieder zu erlernender Bewegungszustand zu einem Spastikzustand hingezogen werden kann, sind, dass relativ gestreckte Beinbewegungen in die Extensorspastizität rutschen können und dass beim Händegeben die Handhaltung in den Greifautomatismus gleiten kann.

Bei der Koordinationsdynamik-Therapie werden motorisches Lernen und motorische Kontrolle zum Wiedererlernen von Bewegungen genutzt. Wenn der Patient versucht, sich an die Bewegungen des speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerätes anzupassen, dann benutzt er vorherrschend die motorische Kontrolle für das

Wiedererlernen von Bewegungen. Die  $\gamma$ -Schleifen werden in ihrer Funktionsweise optimiert. Wenn aber die Hand teilweise von der Kurbel rutscht und der Patient wieder und wieder im richtigen Moment zugreift, um die Kurbel zu greifen und zu halten, dann wendet er vorherrschend motorisches Lernen an.

Mit dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät ist es weiterhin möglich, die momentane Koordinationsdynamik des ZNS beim Wiedererlernen von alten Bewegungsmustern direkt zu messen. Die Verbesserung der Harmonie des Drehens auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät (d.h. das rhythmischere gleichmässigere Drehen) ist ein Mass für die Verbesserung der Koordinationsdynamik. Zur Messung der Verbesserung der Organisation des ZNS während der Therapie kann daher die Bewegungsverbesserung des Patienten und die direkte Messung der Organisation des ZNS (der Koordinationsdynamik) herangezogen werden. Die parametrischen Veränderungen der Koordinationsdynamik, hauptsächlich verursacht durch kooperative Wechselwirkungen, und auch die dramatischen Veränderungen, hauptsächlich hervorgerufen durch kompetitive Wechselwirkung zwischen der inneren Koordinationsdynamik und der wieder zu erlernenden Koordinationsdynamik, wurden beide bei Patienten beobachtet. Wenn die Koordinationsdynamik-Therapie kurz nach der ZNS-Verletzung begonnen wurde, wurden meistens gleichmässige Verbesserungen mit wenig Fluktuationen gemessen (parametrische Veränderungen, Abb. 14 B, 27). Erfolgte die Therapie lange nach der ZNS-Verletzung, so wurden oft Instabilitäten in Bewegungsverbesserungen beobachtet (dramatische Veränderungen, Abb. 71 F, 93 von [8]). Es erscheint daher, dass bei einer lange nach der ZNS-Verletzung begonnenen Koordinationsdynamik-Therapie etablierte pathologische Koordinationstendenzen essentiell reorganisiert werden müssen und eine kompetitive Wechselwirkung sich ausbildet zwischen der existierenden pathologischen und der wieder zu erlernenden physiologischen Koordinationsdynamik-Tendenz. Die kompetitiven Wechselwirkungen mit den auftretenden Instabilitäten in der Netzwerkorganisation spiegeln sich dann wider in den Instabilitäten der Bewegungsverbesserung, was bedeutet, dass vorübergehend sich die Ausführung einer Bewegung (wie z.B. das Gehen) verschlechtern kann. Wenn die Koordinationsdynamik-Therapie kurz nach der Verletzung begonnen wurde und sich pathologische Organisationsdynamik-Tendenzen noch nicht oder nur wenig ausgebildet haben, dann werden sich keine oder nur wenig Instabilitäten bei der Bewegungsverbesserung einstellen (Abb. 86, Benjamin).

## Übertragung von wiedererlernter Koordinationsdynamik auf andere Bewegungen («Transfer of Learning»)

Zanone, Kelso und Schöner [3, 4] bestimmten die Änderung der inneren koordinativen Tendenzen während des Lernens einer rhythmischen Koordinationsaufgabe durch Messung der Dynamik der relativen Phase im Nicht-Gleichgewichtszustand in der bimanuellen Koordinationsaufgabe, einschliesslich der Messung des Phasenüberganges von der Gegen-Phase zur In-Phase Bewegung während der Erhöhung der Bewegungsfrequenz. Bei der Analyse von verschiedenen bimanuellen Koordinationsaufgaben versuchten sie die Übertragbarkeit von Gelerntem einer neu geübten Koordinationsaufgabe auf eine andere, nicht trainierte Koordinationsaufgabe, zu studieren. Während der Koordinationsdynamik-Therapie bei Patienten mit verletztem ZNS ist es teilweise möglich, die Änderung der augenblicklichen Koordinationsdynamik-Tendenzen während des Wiedererlernens von Bewegungsfunktionen auf den verschiedenen Ebenen der Betrachtungsweise (Ebene der Bewegungen, Ebene der Ensembles (der prämotorischen spinalen Oszillatoren), Ebene einzelner Neurone) zu beschreiben. Die Verbesserung der koordinierten rhythmischen Bewegungen von Armen, Händen, Fingern und Beinen (Koordinationsdynamik) kann beim Patienten gemessen werden, wenn er sich auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät bewegt. Die Verbesserung der rhythmischen Bewegung kann zur Quantifizierung der Verbesserung der inneren

### Definition «dynamisch»:

Dynamische Netzwerkorganisation bedeutet nicht nur die Veränderung der räumlichen Organisation mit der Zeit (Fluss eines Vektorfeldes), sondern dass auch die Bewegungen von Armen, Beinen und Rumpf mit positiven und negativen Beschleunigungen ausgeführt werden müssen, so dass das ZNS so integrativ wie möglich aktiviert wird. Auch solche Phasenrelationen sollen aktiviert und wieder erlernt werden, welche nur bei wechselnden schnellen Bewegungen aktiviert werden. Solche dynamische Aktivierung der neuronalen Netzwerke gibt Anlass zu Kopplungen höherer Ordnung und wird die schnellen Neuron-Systeme aktivieren. Bezüglich des prämotorischen Netzwerkes heisst dies, dass auch die  $\alpha_1$ -Motoneurone und die primären Muskelspindelafferrenzen wesentlich aktiviert werden.

Koordinationstendenzen herangezogen werden. Beim Ableiten von elektromyographischer Aktivität (EMG) kann unter günstigen Bedingungen das koordinierte Feuern von prämotorischen Oszillatoren und einzelnen Neuronen gemessen werden.

Wichtig ist nun die Frage beim Wiedererlernen von alten Bewegungen mittels der Koordinationsdynamik-Therapie oder anderer Therapiemethoden, was beim Trainieren einer Bewegung für die anderen Bewegungen gelernt worden ist. Was ist übertragen worden auf die allgemeinen Koordinationsdynamik-Tendenzen des ZNS, wenn eine bestimmte koordinierte Bewegung geübt und wieder erlernt worden ist? Der Autor hat beim Menschen gemessen, dass nach ZNS-Verletzung Frequenz- und Phasenkoordination zwischen dem Feuern von prämotorischen Oszillatoren,  $\gamma$ -Motoneuronen und sekundären Muskelspindelafferenzen teilweise verloren gingen. Weiterhin hat sich das Rekrutieren der prämotorischen Oszillatoren und der Motoneurone bei gelegentlichem Feuern verändert. Es erscheint daher, dass das räumlich-zeitlich koordinierte Feuern der Neurone (Verlust an physiologischer Organisation) im verletzten ZNS und seine Kommunikation mit der Umwelt (motorische Kontrolle) teilweise verloren gegangen sind. Wenn die spezifische Eigenschaft des ZNS «zeitlich-räumlich korreliertes Feuern» seiner Neurone (Phasenbeziehungen zwischen den Aktionspotentialen der Neurone) nach der Verletzung teilweise verloren gegangen ist, dann muss jenes zeitlich-räumlich koordinierte Feuern wiedererlernt werden.

Bei einer kleinen Verletzung des ZNS kann sich das verletzte ZNS möglicherweise selbst durch Umlernen reparieren. Aber bei schweren Verletzungen ist, wie die Erfahrung zeigt, Hilfe beim Umlernen notwendig. Instrumentiertes instruerendes Wiedererlernen kann dem verletzten neuronalen Netzwerk eine grosse Anzahl von Phasenrelationen zum Wiedererlernen vorgeben. Es erscheint daher, dass die dynamischen Phasenrelationen beim Feuern der Neurone für die verschiedenen Bewegungsmuster wiedererlernt werden müssen, weil die Willkür-Impulsmuster und die afferenten Impulsmuster der Peripherie zum zeitlichen Feuern der Neurone beitragen. Die beeinträchtigte Koordinationsdynamik wird also verbessert durch das Wiedererlernen der dynamischen (sich zeitlich ändernden) Frequenz- und Phasenkoordinationen. Die kollektiven Effekte der vielen feuernden Neurone für eine makroskopische Bewegung ergeben sich aus den kollektiven Effekten der relativen Koordination der sehr vielen Phasenbeziehungen zwischen den feuernden Neuronen. Die Selbstorganisation des

Ensembles prämotorischer Oszillatoren ergibt sich auch aus dem zeitlichen Feuern der Neurone, die zur Selbstorganisation des Netzwerk-Oszillators beitragen, aktiviert durch Willkür-Impulsmuster und/oder den afferenten Impulsmustern aus der Peripherie.

Während des Prozesses der funktionellen Reorganisation des ZNS bei der Koordinationsdynamik-Therapie wird das zeitlich korrelierte Feuern zwischen Neuronen (Phasen-Formation zwischen Neuronen oder zwischen Neuronen eines Ensembles), zwischen prämotorischen Oszillatoren (Phasen-Formation zwischen Ensembles), zwischen Netzwerkteilen mit ähnlichen und nicht ähnlichen Funktionen und das zeitlich korrelierte Feuern zwischen ZNS-Teilen wiedererlernt.

Man kann die Frage stellen, was für das Gehen gelernt wurde, wenn auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät trainiert wurde, da die Bewegungen doch ziemlich unterschiedlich sind. Es erscheint, dass der Überlapp an inneren Koordinationsdynamik-Tendenzen, d.h. der Überlapp (in Bezug auf die Mengenlehre) an ausgeführten Phasenrelationen der beiden Bewegungen für das Gehen wieder erlernt wurde. Der Überlapp an Koordinationsdynamik-Tendenzen wird transferiert von der Aufgabe «Drehen auf dem Gerät» zum «Gehen». Da ein Gesunder (und auch ein Patient) besser rennen kann, wenn er vorher auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät trainiert hat, scheinen sehr viele Koordinationsdynamik-Tendenzen (mit der Zeit sich ändernde Phasenrelationen) des Rennens und des Trainierens auf dem speziellen Koordinationsdynamik-Therapiegerät ähnlich zu sein.

Wenn auch Verbindungen zwischen Netzwerkteilen durch die Verletzung durchtrennt oder zerstört sind, dann haben sich die Phasenrelationen zwischen dem Feuern von Neuronen der verschiedenen Netzwerkteile dramatisch verändert. Ein Wiedererlernen der kollektiven Effekte «zeitlich und räumlich abgestimmtes Feuern von Neuronen» schliesst daher auch das Aufbauen von neuen Netzwerkverbindungen ein. Eine Vielzahl von strukturellen Veränderungen, einschliesslich der Neurogenese, Zell-Proliferation und Änderung von Membraneigenschaften, tragen zum Wiedererlernen des zeitlich abgestimmten Feuerns zwischen den Neuronen in den verschiedenen Netzwerkteilen des ZNS bei. Die aktive Erregungsfortleitung (Fortleitung mittels Aktionspotentialen) ist beispielsweise viel schneller als die passive Erregungsfortleitung (elektrotonische Fortleitung).

Kooperative und kompetitive Mechanismen können nur beurteilt und verbessert werden in Bezug

auf die existierenden Koordinationsbedingungen vor, während und nach dem Wiedererlernen von Funktionen. Dies bedeutet, dass der individuelle Lernende die bedeutende Einheit ist und nicht die Gruppe oder die Art [4].

### Wechselwirkung mit der Genetic?

Interessant und wichtig ist der Umstand, dass mit dem Umlernen der Koordinationsdynamik mittels der Koordinationsdynamik-Therapie bisher keine extrem unphysiologischen Organisationszustände sich einstellten, wenn die geübten Bewegungsabläufe relativ physiologisch waren. Kein Abgleiten in obskure Bewegungsmuster trat auf. Abgesehen von auftretenden Instabilitäten, wenn die Verletzung länger zurück lag, veränderten sich die pathologischen Bewegungen oder Haltungen immer kontinuierlich oder plötzlich in Richtung auf physiologische Bewegungen oder Haltungen. Als ob ein Mechanismus am Werk ist, der aufpasst, dass die Veränderungen der Bewegungsmuster ins Physiologische gehen. Vielleicht ist der gleiche Mechanismus am Werk, welcher für die primäre Organisation des ZNS bei der Ontogenese verantwortlich ist. Eine genetische Unterstützung bei der Kontrolle oder Führung des Wiedererlernens von physiologischen Bewegungen wäre eine Möglichkeit. Der Einfluss von Lernmethoden auf die Neurogenese und Zellproliferation bei Ratten und Mäusen [5, 6, 7] stützt diese Sicht. Im Gegensatz zu einer genetischen Führungsrolle beim Wiedererlernen von Bewegungen steht, dass bei Kindern mit Down-Syndrom (Trisomie 21) auch eine wesentliche Verbesserung der physiologischen Bewegungen und der höheren geistigen Funktionen durch eine Therapie erreicht werden kann, obwohl ein genetischer Schaden vorliegt. Aber vielleicht arbeiten die Reparaturgene physiologisch. Das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Lern- und Wiedererlernmethoden und der Vielzahl von strukturellen Veränderungen, welche während des Lernens wahrscheinlich auftreten, einschliesslich Neurogenese, Zellproliferation, Wachstum von Neuriten, Änderungen von Membraneigenschaften und Effizienzänderungen von Synapsen, wird nicht nur mehr Einsicht in die Funktionsweise des menschlichen ZNS bringen, sondern auch eine bessere Basis schaffen für Möglichkeiten der Effizienzsteigerung von Lern- und Wiedererlernmethoden. Vom peripheren Nervensystem von Tieren her ist bekannt, dass nur solche Motoneurone während der Entwicklung überleben, welche funktionelle Kontakte in der Peripherie herstellen konnten. Beim Umlernen oder beim funktionellen Reorganisieren des verletzten ZNS werden natürliche Bewegungsabläufe des normalen Lebens mitbestimmend sein.