

Das Spiegelneuronensystem und seine Rolle in der neurologischen Rehabilitation

F. Binkofski¹, D. Ertelt², Ch. Dettmers³, G. Buccino⁴

¹Neurologische Klinik, Klinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck, ²NeuroImage Nord, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, ³Neurologisches Therapiezentrum, Hamburg, ⁴Institut für Humanphysiologie, Departement für Neurowissenschaften, Universität Parma

Zusammenfassung

Spiegelneurone wurden zuerst in dem rostralen Teil des ventralen prämotorischen Cortex (Areal F5) beschrieben. Diese spezielle Neuronenart zeigt sowohl dann Aktivität, wenn eine eigene Handlung durchgeführt wird, als auch wenn diese oder eine ähnliche Handlung bei anderen Individuen beobachtet wird. fMRT Untersuchungen beim Menschen haben gezeigt, dass unterschiedliche Teile des Broca-Areals und des prämotorischen Cortex durch Beobachtung von Hand-, Mund- und Fußbewegungen aktiviert werden. Diese Aktivierungen weisen ein somatotopisches Muster auf, ähnlich dem klassischen Homunculus im primärmotorischen Cortex. Neurone mit Spiegeleigenschaften wurden ebenfalls im inferioren Parietallappen und im superioren Temporallappen entdeckt. Es gibt Hinweise darauf, dass diese Areale gemeinsam mit den prämotorischen Spiegelneuronen ein System für Handlungswahrnehmung und Handlungsausführung (Spiegelneuronensystem) bilden. Es wird angenommen, dass dieses System an der Bewegungserkennung, Bewegungsimitation und am motorischen Lernen beteiligt ist. Diese einzigartigen Eigenschaften des Spiegelneuronensystems können für die Rehabilitation von gestörten motorischen Funktionen von großer Bedeutung sein. In diesem Artikel stellen wir die Idee einer neuen neurorehabilitativen Therapie vor, die den Effekt der Aktivierung von höheren motorischen Arealen durch Bewegungsbeobachtung ausnutzt.

Schlüsselwörter: Spiegelneurone, neurologische Rehabilitation, Bewegungserkennung, motorisches Lernen

The mirror neuron system and its role in neurorehabilitation

F. Binkofski, D. Ertelt, Ch. Dettmers, G. Buccino

Abstract

Mirror neurons, first described in the rostral part of monkey ventral premotor cortex (area F5), discharge both when the animal performs a goal-directed hand action and when it observes another individual performing the same or a similar action. In humans, through an fMRI study, it has been shown that the observation of actions performed with the hand, the mouth and the foot leads to the activation of different sectors of Broca's area and premotor cortex, according to the effector involved in the observed action, following a somatotopic pattern which resembles the classical motor cortex homunculus. Neurons with mirror properties have also been found in the inferior parietal and superior temporal cortex. There is evidence that these areas, together with the premotor mirror neurons, constitute an execution-observation matching system (mirror neuron system). It has been proposed that this system is involved in action recognition, action imitation and motor learning. These unique properties of the mirror neuron system are of great potential use for the rehabilitation of lost motor functions. Here we present an idea of a new neurorehabilitative therapy that utilizes the activation of higher motor areas by movement observation.

Key words: mirror neurons, neurorehabilitation, action recognition, motor learning

© Hippocampus Verlag 2004

Was sind Spiegelneurone?

Anfang der 90er Jahre wurde in dem Institut für Humanphysiologie in Parma bei Affen als Versuchstieren (VT) zufällig eine neue Art von Nervenzellen mit ganz besonderen Ei-

genschaften entdeckt – die sogenannten »Spiegelneurone«. Eigentlich wollte man in einem Teil des Frontalhirns, dem ventralen prämotorischen Cortex, Nervenzellen untersuchen, die für die Steuerung von komplexen Handbewegungen zuständig sind. Man wusste schon vorher, dass anders

als im primärmotorischen Cortex im ventralen prämotorischen Cortex (dem Teil der Hirnrinde, der dem Hand- und Gesichtsanteil des primärmotorischen Areals vorgelagert ist) viel komplexere Bewegungsabläufe der Hand und der Finger kodiert werden [39]. Man spricht sogar davon, dass dort ein »Vokabular« der unterschiedlichen Handbewegungen gespeichert wäre [39]. Der Überraschungsbefund war jedoch, dass in einem bestimmten Teil des ventralen prämotorischen Cortex, dem Areal F5, eine neue Neuronenart ansässig ist, die nicht nur dann aktiv wurde, wenn das untersuchte VT eine bestimmte Bewegung ausführte, sondern auch während der Affe die Ausführung einer vergleichbaren Handbewegung beobachtete [18, 42]. Diese besondere Eigenschaft der Neurone, gleichzeitig an der Bewegungswahrnehmung und an der Bewegungsausführung beteiligt zu sein, gab ihnen die Bezeichnung »Spiegelneurone« (siehe Abbildung 1).

Die Kongruenz zwischen der Aktion (Bewegung), die von einem Spiegelneuron motorisch kodiert wird, und der, die das Spiegelneuron visuell aktiviert, kann sehr eng sein. Das heißt, dass das Neuron bereits durch die Beobachtung von Handlungen angeregt werden kann, die mit den motorisch kodierten Aktionen identisch sind. Z.B. wird ein Spiegelneuron aktiv, während das Versuchstier nach einer Nahrungseinheit greift, aber auch wenn es ein anderes VT oder sogar den Versuchsleiter (VL) bei der Durchführung dieser

Handlung beobachtet. Sehr häufig ist diese Kongruenz allerdings weniger eng: Eine Aktivierung der Spiegelneurone ist anscheinend vor allem abhängig von einem gemeinsamen *Handlungsziel* beobachteter und auch von den Spiegelneuronen selbst motorisch kodierter Handlungen, und nicht von den einzelnen Bewegungskomponenten der Handlung. Beim Zeigen einzelner Bewegungskomponenten einer komplexen Handlung tritt eher selten eine Aktivität auf.

Die Spiegelneurone werden nur durch die Beobachtung solcher Bewegungen aktiviert, bei denen der anatomische Effektor (vor allem die Gliedmaßen des Beobachteten wie Hände und Füße, aber auch andere Effektoren; s. Abschnitt »Das Spiegelneuronensystem«) mit einem Objekt interagiert, d. h. durch objektbezogene Bewegungen (z. B. Greifen mit der Hand nach Nahrung). Wird die beobachtete Bewegung jedoch mit Hilfe eines Werkzeugs durchgeführt, aktiviert sie die Spiegelneurone nicht. Die Spiegelneurone werden ebenfalls nicht aktiv, wenn die beobachtete Bewegung vom Beobachteten imitiert wird und keinen richtigen Bezug zu einem Objekt hat. Und schließlich werden die Spiegelneurone auch dann nicht aktiviert, wenn allein Objekte visuell präsentiert werden.

Das Spiegelneuronensystem – Das gemeinsame System für Handlungswahrnehmung und Handlungsausführung

Die Fähigkeit der Spiegelneurone, auf visuell wahrgenommene Stimuli unterschiedlich zu reagieren, ähnelt den Eigenschaften jener Neurone, die Perrett und Kollegen [38] im Sulcus temporalis superior (STS) gefunden haben. Diese Neurone feuern, ähnlich wie die Spiegelneurone, einerseits sowohl bei der visuellen Präsentation von zielgerichteten Handbewegungen, werden andererseits aber auch aktiv, wenn Bewegungen wie Gehen, Drehen des Kopfes und Beugen des Rumpfes beobachtet werden (siehe auch [7]). Anders als die Spiegelneurone im ventralen prämotorischen Cortex (Areal F5), scheinen allerdings die STS-Neurone keine Befähigungen zur motorischen Aktivierung von Effektoren zu besitzen. Neben diesen Zellen wurden Neurone mit ähnlichen Eigenschaften wie die der prämotorischen Spiegelneurone im inferioren Parietalcortex gefunden [17, 19]. Die gegenwärtig vorherrschende Hypothese zu diesen Befunden besagt, dass die Neurone im superioren Temporalcortex, im inferioren Parietalcortex und vor allem im ventralen prämotorischen Cortex ein gemeinsames System, das so genannte »Spiegelneuronensystem« bilden (siehe Abbildung 2).

Seit der Entdeckung der Spiegelneurone wird postuliert, dass sie eine wichtige Rolle bei der Erkennung der Bedeutung von Bewegungen und beim motorischen Lernen spielten [28]. Innerhalb jüngster Forschungsergebnisse konnte in einem elektrophysiologischen Experiment die Bedeutung der Spiegelneurone für das Verstehen des Bewegungsinhaltes bestätigt werden [49]. In diesem Experiment wurden zwei unterschiedliche Bedingungen untersucht: unter der ersten (*visuelle Bedingung*) konnte ein VT (Affe) die gesamte Bewegungssequenz beobachten, während in der

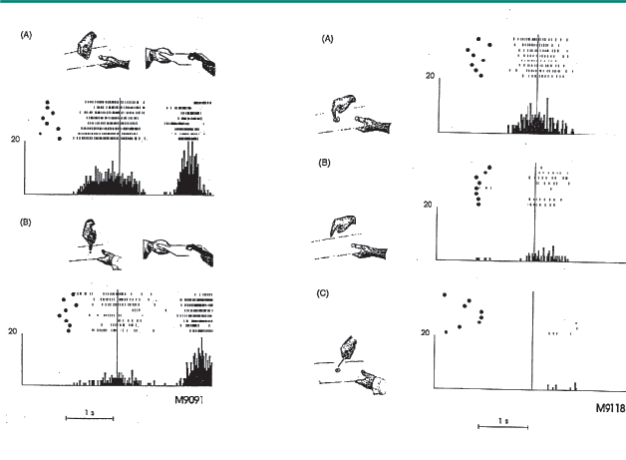


Abb. 1: Zwei Beispiele von Spiegelneuronen

Die Abbildung zeigt Untersuchungsergebnisse von Gallese et al., 1996 [18]:

A links: Ein Spiegelneuron (M9091) wird sowohl dann aktiv, wenn das VT (Affe) nach einem Objekt (Nahrungseinheit) greift, als auch wenn es die identische Handlung des Experimentators beobachtet.

B links: Das Spiegelneuron bleibt inaktiv, wenn das VT beobachtet, wie der Experimentator das Objekt (Nahrungseinheit) mit einem Werkzeug (Zange) greift.

A rechts: Das Spiegelneuron (M9118) feuert, wenn das VT beobachtet, wie der Experimentator ein Objekt (Nahrungseinheit) mit dem Finger berührt.

B rechts: Das Spiegelneuron zeigt nur geringe Aktivität, wenn das VT beobachtet, wie der Experimentator auf den leeren Platzierungsort des entfernten Objektes zeigt.

C rechts: Das Spiegelneuron bleibt inaktiv, wenn das VT beobachtet, wie der Experimentator das Objekt (Nahrungseinheit) mit einem Werkzeug (Schraubendreher) berührt.

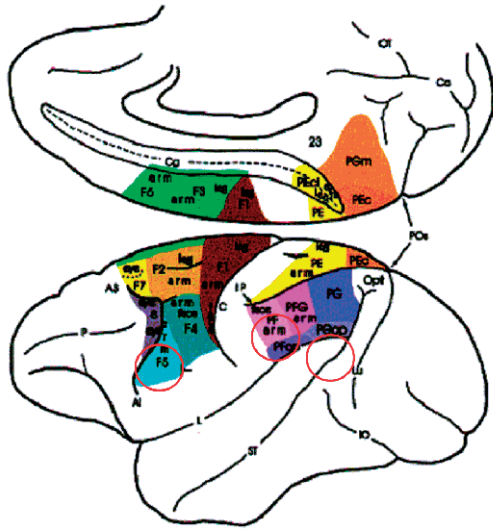


Abb. 2: Motorisch relevante parietale und prämotorische Areale beim Affen. Die roten Kreise bezeichnen diejenigen Areale, in denen Neurone mit Spiegeleigenschaften gefunden werden konnten.

zweiten Bedingung (*verdeckte Bedingung*) die letzte Phase der Bewegung mit der Zielerreichung durch einen Vorhang verdeckt war. Dabei wurde unter der zweiten Bedingung dem VT gezeigt, dass hinter dem Vorhang ein Objekt (z. B. eine Nahrungseinheit) verborgen ist, bevor die zu beobachtende Bewegung präsentiert wurde. Es zeigte sich, dass die Spiegelneurone nicht nur während der Beobachtung der gesamten Bewegung, sondern auch während der letzten, entscheidenden, aber verdeckten Phase der Bewegung aktiv wurden. Als Kontrollbedingung wurde eine angedeutete Bewegung unter den gleichen experimentellen Bedingungen gewählt. Wie erwartet kam es unter der Kontrollbedingung weder unter der visuellen, noch unter der verdeckten Bedingung zu einer Aktivierung der Spiegelneurone.

Spiegelneurone reagieren auch auf Handlungen, wenn diese in der akustischen Modalität, d. h. als charakteristische Geräusche, präsentiert werden. *Koehler et al.* [31] zeigten, dass ca. 15% der Spiegelneurone neben den visuellen auch akustische Eigenschaften besitzen und auch durch die Wahrnehmung charakteristischer Geräusche von Objekten aktiviert werden können. Sie bezeichnen diese Neurone als »audio-visuelle Spiegelneurone« [31]. Die Bewegungen werden also gewissermaßen von den audio-visuellen Spiegelneuronen »gehört«. Es wird angenommen, dass sie den Inhalt von solchen Bewegungen kodieren, die entweder visuell oder akustisch wahrgenommen werden und deshalb ein fundamentales Element für die Entwicklung der Sprache repräsentieren könnten [40].

Die Mehrzahl der bisher in bezug auf Spiegelneurone durchgeführten Studien betreffen Handbewegungen. Allerdings wurden im prämotorischen Areal F5 auch Spiegelneurone identifiziert, die während der Beobachtung und Ausführung von *Mundbewegungen* Aktivität zeigen. Die meisten dieser Neurone reagieren dabei vor allem auf die Beobachtung von ingestiven Handlungen wie das Grei-

fen mit den Lippen, das Schlürfen von Flüssigkeiten oder das Zerbeißen von Nahrung. Einige der Neurone reagieren wiederum vorrangig auf die Beobachtung und Ausführung von oralen kommunikativen Bewegungen wie das Schmatzen mit den Lippen [14].

Das Spiegelneuronensystem beim Menschen

Es gibt immer mehr Hinweise darauf, dass ein Spiegelneuronensystem auch beim Menschen existieren könnte. Übereinstimmende Daten, die dies bestätigen, stammen sowohl aus neurophysiologischen als auch aus lernpsychologisch-behavioristischen und bildgebenden Studien.

Der erste Hinweis auf eine Existenz des Spiegelneuronensystems beim Menschen stammt aus einer elektrophysiologischen Studie von *Fadiga et al.* [13]. Während des Experiments beobachteten die Versuchspersonen (VPn) die Ausführung von verschiedenen Handbewegungen, während mittels transkranieller Magnetstimulation (TMS) einzelne Stimuli über dem motorischen Cortex appliziert und motorische Antworten von verschiedenen Handbewegungen abgeleitet wurden. Die Resultate zeigten, dass während der Beobachtung von Handbewegungen die Amplitude der motorischen Potentiale in den Handmuskeln (MEPs) – und zwar in jenen Muskeln, die normalerweise an der Ausführung von vergleichbaren Bewegungen beteiligt sind – signifikant zunimmt. Dieser Befund konnte von *Strafella und Paus* [48] und von *Gangitano et al.* [22] eindeutig bestätigt werden. Diese Daten bestätigen die Hinweise auf die Existenz eines Spiegelneuronensystems des Menschen, das die Bewegungsbeobachtung und -ausführung in sich vereint. Dabei lässt sich vor allem die zeitlich koordinierte Aktivierung derjenigen Muskeln erkennen, die an der Ausführung einer beobachteten Handlung beim beobachteten Subjekt beteiligt sind.

Zusätzlich zu diesen TMS-Resultaten konnte mit Hilfe der quantitativen Elektroencephalographie (qEEG) gezeigt werden, dass der μ -Rhythmus sowohl durch die Beobachtung als auch durch die Ausführung von verschiedenen Handbewegungen blockiert werden kann [8]. Ähnliche Ergebnisse konnten mit Hilfe der Magnetencephalographie durch *Hari* und Kollegen [25] erzielt werden. In deren Experiment fand sich eine Unterdrückung der vom präzentralen motorischen Cortex stammenden 15–25 Hz Aktivität während der Ausführung, aber auch in geringerem Maße bei der Beobachtung einer Manipulation von Objekten. Auch diese Ergebnisse bestätigen, dass Bewegungsbeobachtung und Bewegungsausführung die gleichen neuronalen Substrate teilen.

Weitere Belege für das Vorhandensein des Spiegelneuronensystems beim Menschen stammen aus neuropsychologischen Studien, die Verhaltensparameter untersuchen. So untersuchten *Brass et al.* [4] den Einfluss der Bewegungsbeobachtung auf die Bewegungsausführung in einem Stimulus-Reaktion-Vergleichsparadigma. In diesem Experiment wurden Unterschiede in der Geschwindigkeit von willkürlichen Fingerbewegungen untersucht, die der

Präsentation von symbolischen oder räumlichen Hinweisreizen bzw. der Beobachtung tatsächlicher Fingerbewegungen folgten. Es zeigte sich, dass die Probanden signifikant schneller waren als in der anderen Bedingung, wenn der relevante Hinweis aus tatsächlichen Fingerbewegungen bestand. Darüber hinaus war die Geschwindigkeit der ausgeführten Bewegung abhängig vom Übereinstimmungsgrad zwischen der beobachteten und der von den VPn auszuführenden Bewegung: mit zunehmender Kongruenz (z. B. Beobachtung der Bewegung des rechten Zeigefingers und Bewegung des rechten Zeigefingers) nahm die Geschwindigkeit zu. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Bewegungsbeobachtung einen direkten Einfluss auf die Bewegungsausführung haben könnte.

Sämtliche der oben angeführten Studien geben bestenfalls nur begrenzte Hinweise auf die Lokalisation der Spiegelneurone im menschlichen Gehirn. Viele wichtige Informationen zu diesem Thema sind einer Vielzahl von bisher durchgeführten Bildgebungsstudien zu verdanken. So fanden beispielsweise *Rizzolatti et al.* [42] in ihrer PET-Studie eine Aktivierung des Broca-Areals und des mittleren Gyrus temporalis superior bei der Beobachtung von Handbewegungen, die nicht auftritt, wenn ausschließlich Objekte beobachtet werden. Das Broca-Areal wird im klassischen Forschungsparadigma als ein reines Sprachproduktionsareal angesehen, obwohl viele neue Befunde dafür sprechen, dass zumindest ein Teil des Broca-Areals homolog zu dem ventralen prämotorischen Cortex des Affen ist (insbesondere zu dem Areal F5, in dem ursprünglich Spiegelneurone gefunden wurden) [2, 3, 44]. Somit wurde in der oben erwähnten Studie der potentielle Sitz von Spiegelneuronen beim Menschen zum ersten Mal beschrieben.

In zwei weiteren PET-Studien wurde der Unterschied in der neuronalen Aktivierung zwischen der Beobachtung von bedeutungsvollen und abstrakten Handbewegungen im Vergleich zu statischen Bildern der Hand untersucht [10, 23]. Dabei wurden zusätzlich als Unterbedingungen die Instruktion des alleinigen Beobachtens bzw. die Instruktion der Beobachtung zum Zweck einer nachfolgenden Imitation des Beobachteten verwendet. Es zeigte sich, dass die alleinige Beobachtung von bedeutungsvollen und abstrakten Bewegungen zur Aktivierung von ähnlichen Arealen im bilateralen Gyrus occipitalis superior und den occipito-temporalen Cortices führte sowie im linksseitigen Lobulus parietalis inferior und dem ebenfalls linksseitigen Gyrus precentralis. Dagegen führte die Beobachtung unter der Erwartung einer nachfolgenden Anweisung zur Imitation zu Aktivierungen in den bilateralen Lobuli parietalis superior und inferior und vor allem im bilateralen prämotorischen Cortex.

In einer funktionellen kernspintomographischen Studie (fMRT) konnten wir zeigen, dass das Spiegelneuronensystem beim Menschen vergleichsweise großflächig angelegt ist und eine somatotopische Organisation zeigt, die unterschiedlich die Hand-, Mund- und Fußbewegungen kodiert [5]. In dieser Studie wurden die Probanden gebeten, Videosequenzen von Bewegungen zu beobachten, die entweder

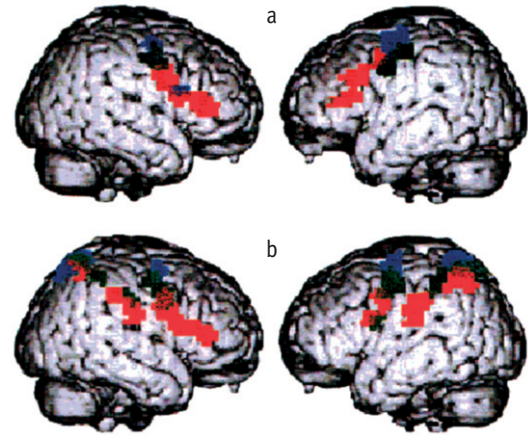


Abb. 3: Aktivierte Areale bei Bewegungsbeobachtungen
Somatotopische Anordnung von Aktivierungen während der Beobachtung von nicht-objektbezogenen (a) und objektbezogenen (b) Bewegungen des Mundes (rot), der Hand (schwarz) und des Fußes (blau) [5].
Interessanterweise führt die Beobachtung von nicht-objektbezogenen Bewegungen zu einer überwiegenden Aktivierung des bilateralen prämotorischen Cortex, während die Beobachtung von objektbezogenen Bewegungen zu einer zusätzlichen Aktivierung des bilateralen Parietalcortex führt.

mit dem Mund, der Hand oder dem Fuß durchgeführt wurden. Die Bewegungen waren entweder objektbezogen (z. B. Beißen in einen Apfel, Greifen nach einem Stift, Treten auf ein Pedal) oder wurden ohne Objektbezug ausgeführt (z. B. Schmatzen, Greifen ins Leere, Treten ins Leere). Unter der Kontrollbedingung beobachteten Probanden der Kontrollstichprobe statische Bilder der entsprechenden Bewegungen. Diese unterschiedlichen Bedingungen führten zu der Aktivierung von verschiedenen Abschnitten des prämotorischen Cortex und des Broca-Areals, in Abhängigkeit von dem in der beobachteten Handlung jeweils benutzten Körperteil. Die somatotopische Anordnung der Aktivierungen im prämotorischen Cortex entsprach der von *Förster* [16] beschriebenen Somatotopie für Bewegungsausführung im motorischen Cortex. Darüber hinaus kam es während der Beobachtung von objektbezogenen Bewegungen zu einer verstärkten Aktivierung des parietalen Cortex, die auch grob somatotopisch nach den benutzten Körperteilen aufgliedert war (siehe Abbildung 3).

Insgesamt bestätigt diese Studie die Hypothese, dass – ähnlich wie bei der eigentlichen Bewegungsausführung – bei der Beobachtung von Bewegungen unterschiedliche, somatotopisch organisierte fronto-parietale Aktionskreise rekrutiert werden [30, 41]. In diesem Zusammenhang ist interessant, dass weitere aktuelle Bildgebungsstudien auch Spiegelneurone, die den im Areal F5 zu findenden ähnlich sind, im Lobulus parietalis inferior (Areal PF) entdecken konnten [19].

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von *Grèzes et al.* [23] und *Decety et al.* [10], zeigen die Daten von *Buccino et al.* [5], dass das Spiegelneuronensystem während der alleinigen Beobachtung von Bewegungen aktiv wird, unabhängig von Instruktionen zur Aufmerksamkeitsfokussierung. Da-

mit ist es wahrscheinlich, dass dieses System von kognitiven Interferenzen, wie z.B. Gedächtnisvorgängen in Erwartung einer der Präsentation nachfolgenden Gedächtnisüberprüfung, unabhängig ist.

Wie oben gezeigt, wird das Spiegelneuronensystem der untersuchten Versuchstiere auch durch die Beobachtung von Bewegungen eines artfremden Organismus (z.B. des Experimentators, siehe Abbildung 1) aktiviert. *Buccino et al.* [6] untersuchten in diesem Zusammenhang die Auswirkungen der Beobachtung von Bewegungen Artfremder auf das Spiegelneuronensystem des Menschen unter Verwendung funktioneller Kernspintomographie. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass beim Menschen die Beobachtung von kommunikativen und objektbezogenen Mundbewegungen eines artfremden Primaten (z.B. Schürzen der Lippen, Lächeln) und eines Menschen (z.B. Sprechbewegungen, Kauen) zu einer ähnlichen Aktivierung des prämotorischen Cortex führte. Allerdings zeigen sich diese Aktivierungen nur bei der Beobachtung von Mitgliedern anderer biologischer Arten, die mit der eigenen Art relativ eng verwandt sind, wie z.B. bei Primaten. Bei der Bewegungsbeobachtung von Mitgliedern anderer Gattungen als der des Beobachters findet sich keine solche Aktivierung, so z.B. nicht bei Maulbewegungen eines Hundes (Bellen, Zungeausstrecken). Hier zeigt sich lediglich eine Aktivierung im rechten Gyrus temporalis superior. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen deutlich, dass Bewegungen von anderen Individuen, einschließlich evolutionär verwandter Artfremder, auf zweierlei Weise wahrgenommen werden können: für Bewegungen wie Beißen oder lautloses Sprechen eines artverwandten Individuums existiert eine motorische Resonanz in den kortikalen Arealen, die an der Ausführung der beobachteten Bewegungen beteiligt sind; d.h. das Spiegelneuronensystem ist an der Wahrnehmung dieser Bewegungen beteiligt. Bewegungen wie das Bellen als Bewegung eines artfremden Organismus regen hingegen keine kortikale Resonanz an. Als Erklärung des ersten Befundes könnte es denkbar sein, dass in diesem Fall eine Art »persönliches Wissen« über den Inhalt der beobachteten Bewegungen vorliegt. Das heißt, die beobachteten Bewegungen werden mit den entsprechenden gespeicherten Bewegungen aus dem motorischen Repertoire des Beobachters verglichen. Gemäß dieser Hypothese besäße der Beobachter eine direkte, persönliche motorische Erfahrung von der beobachteten Bewegung (»Ich verstehe diese Bewegung, weil ich die selbe Bewegung ausführen kann, die ich gerade betrachte«). Im Fall nicht-artverwandter Bewegungen werden diese demgemäß zwar als physikalisch-biologische Handlungen erkannt, was sich in der Aktivierung des Gyrus temporalis superior widerspiegelt, ein »persönliches Wissen« von der Bewegung fehlt jedoch, da der Beobachter keine persönliche Erfahrung mit der beobachteten Bewegung in dem Spiegelneuronenkontext hat (»Ich kann zwar das Bellen eines Hundes imitieren, aber im Grunde genommen kann ich selbst nicht richtig bellen«).

Zusammengefasst könnte aus den oben dargestellten Befunden geschlossen werden, dass Menschen eine Reihe

von Bewegungen, die von anderen, auch artfremden, Individuen ausgeführt werden, erkennen und imitieren können, weil sie auf eine direkte Abbildung der Bewegungen in unserem motorischen System treffen. Die Imitationsleistung kann dabei als ein Anzeichen für ein »Verständnis« der beobachteten Bewegung interpretiert werden. Als neurales Substrat dieser direkten Abbildung kann das Spiegelneuronensystem begriffen werden. Nach *Buccino et al.* [6] repräsentiert dieses System daher eine biologische Basis für soziale Interaktionen, die eine Verständnisleistung der Bewegungen und damit auch des Verhaltens anderer Individuen mit zumindest ähnlicher morphologischer Ausstattung voraussetzt.

Einfluss der Bewegungsbeobachtung und mentalen Vorstellung auf das motorische Lernen

In bestimmten Berufsgruppen und bei vielen Sportlern spielen mentale Techniken wie das Beobachtungslernen (vgl. *Bandura* [1]) oder die motorische Vorstellung eine wichtige Rolle in der Verbesserung der motorischen Fertigkeiten. Diese Techniken scheinen allerdings nur Spezialisten nach entsprechendem Training und auch nur bei der Verfeinerung von bereits gut eingeübten motorischen Abläufen zu helfen. *Jackson et al.* [27] vertreten die Meinung, dass vorgestellte Bilder einen kinästhetischen Eindruck der Bewegung erzeugen könnten. Diese seien dazu imstande, verschiedene, sprachlich nicht beschreibbare Prozesse zu aktivieren, die an dem motorischen Training beteiligt wären. Im Falle der motorischen Vorstellung einer Bewegung sei es allerdings – anders als bei der tatsächlichen Ausführung von Bewegungen – für die Beteiligten erforderlich, jedes verfügbare deklarative Wissen über alle Komponenten der Bewegung zu besitzen. *Jeannerod* [28] hat die Rolle der vorher stattgefundenen Ausführung von Bewegungen für eine naturgetreue kinästhetische Vorstellung derselben hervorgehoben. Gleiches gilt anscheinend auch für die Ausformung der inneren Replika einer Bewegung, um sie später durch Beobachtung aktivieren zu können [43]. Aus diesem Grunde können sowohl die Bewegungsbeobachtung als auch die Vorstellung motorischer Bewegungen nur als ergänzende Techniken zu dem tatsächlichen motorischen Training durch eigene aktive Bewegungsausführung gelten. Die Effekte der mentalen Trainingsmethoden sind im Vergleich zum aktiven Bewegungstraining als nur gering einzuschätzen [15], was möglicherweise auf das Fehlen des sensomotorischen Feedbacks zurückzuführen ist. So könnten auch die geringeren Fortschritte beim motorischen Training von Läsionspatienten erklärt werden [24].

Die Vorstellung motorischer Aktivität kann die Dynamik der Ausführung der vorgestellten Bewegungen (z.B. der Bewegungstrajektorien) verbessern [21, 51]. So fanden z.B. *Yue und Cole* [52], dass ein vierwöchiges Training über motorische Vorstellungen ohne über die Ruheaktivität erhöhte EMG-Aktivität und ohne messbaren Zuwachs der Muskelmasse die Stärke der isometrischen Bewegungen signifikant erhöhen kann. Diese Zunahme der Kontraktions-

kraft kann am besten durch plastische Adaptation der zentral-neuronalen Mechanismen erklärt werden.

In der funktionellen Bildgebungsstudie von *Lafleur et al.* [32] wurde nach Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen der Ausführung und Vorstellung von sequentiellen Fußbewegungen gesucht. Unter beiden Bedingungen wurde eine Aktivierung während der späten und der frühen Trainingssequenz im linken orbitofrontalen Cortex und im bilateralen Striatum gefunden. Ebenfalls wurde unter beiden Bedingungen eine Aktivierung in dem linken inferioren Parietallappen während der ersten Phase des Trainings gefunden, wobei die Aktivierung unter der Vorstellungsbedingung mehr anterior-inferior parietal lag. Ein Unterschied zwischen den Ergebnissen unter beiden Bedingungen fand sich in der Abnahme der zerebellären Aktivierung bei der Bewegungsausführung im Laufe eines ca. vierwöchigen Trainings [37], der eine Zunahme der Aktivierung in den Basalganglien folgte [11].

Sakamoto und Kollegen [46] haben vorgeschlagen, dass die wiederholte Aktivierung von motorischen Netzwerken, deren Aktivität für die Ausführung einer Bewegungssequenz charakteristisch ist, möglicherweise zu einer Verstärkung der synaptischen Transmission führt – ähnlich wie bei der Ausführung von Bewegungen. So zeigte sich, dass die mentalen Techniken die motorischen Leistungen von Leistungssportlern verbessern [12]. So konnte beispielsweise in einem Versuch von *Roure et al.* [45] eine positive Korrelation zwischen der Quantifizierung der motorischen Vorstellung, gemessen an autonomen Parametern (wie Anstieg der Pulsrate, der Atemfrequenz und der Hautleitfähigkeit), und der Verbesserung der Leistungen beim Basketballspielen gefunden werden. Das heißt, je besser die Fähigkeit zur mentalen Repräsentation von Bewegungen ist, um so höher sind die Effekte der Vorstellungstechniken auf die Leistung. Interessant ist, dass trainierte Berufs- und Leistungssportler die mentalen Techniken viel stärker als Amateure zu nutzen scheinen [9].

Die Rolle der mentalen Techniken in der neurologischen Rehabilitation

Gemäß den oben präsentierten Daten könnten sowohl die Bewegungsbeobachtung als auch die Vorstellung einer motorischen Aktivität einen positiven Effekt auf die motorische Erholung nach Hirnschädigung haben. Es ist jedoch offensichtlich, dass keine von diesen mentalen Techniken für sich alleine zur Rehabilitation ausreicht [26, 36, 52] und sie nur zusätzlich zu der aktiven Bewegungsausführung angewandt werden sollten. Zusammen mit der aktiven Ausübung der beobachteten oder der vorgestellten Bewegungen angewandt, dürften diese Techniken jedoch eine signifikante Verbesserung der Ergebnisse physiotherapeutischer Übungen erzielen. Da hierbei keine aktive Bewegung notwendig ist, sollte eine Anwendung dieser mentalen Techniken in einer frühen Phase nach dem Auftreten einer motorischen Störung (z. B. bei einem noch plegischen Patienten) bereits möglich sein und zur Vorbereitung der späteren Physiotherapie dienen.

Zu dem Einfluss der motorischen Beobachtung auf die Ergebnisse der Neurorehabilitation gibt es bisher keine publizierten Daten. Die ersten Studien zu diesem Thema wurden jedoch bereits gestartet, und es bleibt abzuwarten, ob der positive Trend, den man bei den ersten Patienten dieser Untersuchungen beobachten konnte, sich bei größeren Patientenzahlen bestätigen lässt. Die starken Hinweise für die Existenz von Spiegelneuronen beim Menschen und deren Einfluss auf das motorische Lernen scheinen eine vielversprechende physiologische Basis für die Entwicklung entsprechender neurologischer Rehabilitationsmaßnahmen zu bilden. Eine aktuelle Studie zu diesem Thema wird unten vorgestellt.

Viel mehr Daten als zu den Auswirkungen von Bewegungsbeobachtungen bei der Rehabilitation existieren bereits zu der Anwendung der motorischen Vorstellung in der Therapie nach Schlaganfall. Die bisher ausschließlich experimentell durchgeführten Studien haben ausgewählte Patientenkollektive verwendet: chronische Patienten mit guter Fähigkeit zur mentalen Vorstellung und wenigen neuropsychologischen Ausfällen [34, 50]. Ein positiver Effekt der motorischen Vorstellung konnte bei dieser Patientengruppe nachgewiesen werden – er war jedoch weniger ausgeprägt als bei dem tatsächlichen Bewegungstraining. Der Vergleich der konventionellen Physiotherapie mit der Kombination aus Physiotherapie und der motorischen Vorstellung von Handbewegungen zeigte bei Patienten mit subakutem Schlaganfall eine eindeutig bessere Erholung der Handfunktion nach der Teilnahme an der kombinierten Therapie [35]. Interessanterweise konnten weitere positive Effekte durch die Einführung der Beobachtung von im Spiegel präsentierten passiv geführten Bewegungen der nicht betroffenen Hand erzielt werden [34, 47]. Diese zusätzlichen Effekte könnten auf der Ergänzung des somatosensorischen Feedbacks durch zusätzliche visuelle Informationen beruhen. Möglicherweise spielen die Spiegelneurone auch dabei eine entscheidende Rolle.

Basierend auf der oben bereits gut begründeten Annahme einer Existenz der Spiegelneurone beim Menschen und ihres Einflusses auf das motorische Lernen, ist davon auszugehen, dass die Komponente der Bewegungsbeobachtung einen zusätzlichen positiven Effekt auf den Ausgang der Physiotherapie haben müsste. Die konventionellen physiotherapeutischen Trainingsmethoden konzentrieren sich auf die aktive oder passive Ausübung von Bewegungen, stimulieren somit hauptsächlich die somatosensorischen und motorischen Systeme des Patienten. Durch die Einführung der Bewegungsbeobachtung werden zusätzlich die visuellen Kanäle stimuliert, die in der sensomotorischen Koordination von Bewegungen eine wichtige Rolle spielen [33]. Weiterhin werden mit Hilfe des Spiegelneuronensystems in den sekundären Assoziationsarealen gespeicherte Bewegungsmuster aktiviert, die für die Reaktivierung oder für das Wiedererlernen von solchen Bewegungsmustern einen wichtigen Beitrag leisten können. In der gegenwärtig von uns durchgeführten Studie verwenden wir alle bisher gewonnen Erkenntnisse über die Eigenschaften des Spiegel-

neuronensystems und über die Anwendung von mentalen Techniken, um ein neues effektives Therapieverfahren für die neurologische Rehabilitation zu kreieren. In diesem neuen Therapieverfahren wird die Beobachtung von alltagsrelevanten Hand- und Armbewegungen mit der anschließenden Übung dieser Bewegungen kombiniert. Angefangen mit einfachen Bewegungen wie dem Abwischen eines Tisches mit einem Stofftuch sind die Patienten gehalten, diese Bewegung für wenige Minuten auf einem standardisierten Videofilm aufmerksam zu beobachten und anschließend für eine ebenso lange Zeitspanne die beobachtete Bewegung repetitiv auszuführen. Die Komplexität der Bewegungen wird im Laufe der Therapie konsekutiv gesteigert, so dass gegen Ende der Therapie die Patienten Bewegungen wie das Bedienen eines Wasserhahns meistern sollten. Wir gehen davon aus, dass die durch die Beobachtung angeregten Bewegungsmuster durch die anschließende wiederholte Ausführung der Bewegung verstärkt und gefestigt werden.

Literatur:

- Bandura A: Social Learning Theory. Morristown, New York 1971
- Binkofski F, Amunts K, Stephan KM, Posse S, Schormann T, Freund H-J, Zilles K, Seitz R: Broca's region subserves imagery of motion: a combined cytoarchitectonic and fMRI study. *Human Brain Mapping* 2000; 11: 273-285
- Binkofski F, Buccino G: Motor functions of the Broca's region. *Brain and Language* (in press)
- Brass M, Bekkering H, Wohlschlaeger A and Prinz W: Compatibility between observed and executed finger movements: comparing symbolic, spatial and imitative cues. *Brain and Cognition* 2000; 44: 124-143
- Buccino G, Binkofski F, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Seitz RJ, Zilles K, Rizzolatti G and Freund H-J: Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur J Neurosci* 2001; 13: 400-404
- Buccino G, Lui F, Canessa N, Patteri I, Lagravinese G, Benuzzi F, Porro CA, Rizzolatti G: Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconspecifics: an fMRI study. *J Cogn Neurosci* 2004; 16 (1): 14-26
- Carey DP, Perrett DI and Oram MW: Recognizing, understanding and reproducing actions. In: M Jeannerod & J Grafman (Eds.): *Handbook of Neuropsychology – Action and Cognition*. Elsevier, Amsterdam 1997, 111-130
- Cochin S, Barthelemy C, Roux S and Martineau J: Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography. *Eur J Neurosci* 1999; 11: 1839-1842
- Cumming J, Hall C: Deliberate imagery practice: the development of imagery skills in competitive athletes. *J Sports Sci* 2002; 20: 137-145
- Decety J, Grezes J, Costes N, Perani D, Jeannerod M, Procyk E, Grassi F, Fazio F: Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain* 1997; 120: 1763-1777
- Doyon J, Owen AM, Petrides M, Sziklas V, Evans AC: Functional anatomy of visuomotor skill learning in human subjects examined with position emission tomography. *Eur J Neurosci* 1996 ; 8: 637-648
- Driskell JE, Copper C, Moran A: Does mental imagery enhance performance? *J Appl Psychol* 1994; 79: 481-492
- Fadiga L, Fogassi L, Pavesi G and Rizzolatti G: Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *J Neurophysiol* 1995; 73: 2608-2611
- Ferrari PF, Gallese V, Rizzolatti G and Fogassi L: Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *Eur J Neurosci* 2003; 17: 1703-1714
- Fetz DL and Landers DM: The effect of mental practice on motor skill learning and performance. A meta-analysis. *J Sport Psychol* 1983; 5: 25-57
- Foerster O: Motorische Felder und Bahnen. In: *Hanbuch der Neurologie*, ed. H Bumke und O Foerster. Vol. 6. Springer, Berlin 1936, 1-37
- Fogassi L, Gallese V, Fadiga L and Rizzolatti G: Neurons responding to the sight of goal-directed hand/arm movements in the parietal area PF (7b) of the macaque monkey. *Society for Neuroscience Abstracts* 1998; 24: 154
- Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G: Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 1996; 119: 593- 609
- Gallese V, Fogassi L, Fadiga L and Rizzolatti G: Action representation and the inferior parietal lobule. In: W Prinz, & B Hommel (Eds.): *Attention & Performance XIX. Common mechanisms in perception and action*. Oxford University Press, Oxford, U.K. 2002, 334-355
- Gallese V: La molteplice natura delle relazioni interpersonali: la ricerca di un commune meccanismo neurofisiologico. *Networks* 2003; 1: 24-47
- Gandevia SC, Petersen N, Butler JE, Taylor JL: Impaired response of human motoneurons to corticospinal stimulation after voluntary exercise. *J Physiol* 1999; 521: 749-59
- Gangitano M, Mottaghy FM and Pascual-Leone A: Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport* 2001; 12: 1489-1492
- Grèzes J, Costes N and Decety J: Top-down effect of strategy on the perception of human biological motion: a PET investigation. *Cognitive Neuropsychology* 1998; 15: 553-582
- Han L, Law-Gibson D, Reding M: Key neurological impairments influence function-related group outcomes after stroke. *Stroke* 2002; 33: 1920-1924
- Hari R, Forss N, Avikainen S, Kirveskari E, Salenius S and Rizzolatti G: Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. *Proceedings of National Academy of Science USA* 1998; 95: 15061-15065
- Herbert RD, Dean C, Gandevia SC: Effects of real and imagined training on voluntary muscle activation during maximal isometric contractions. *Acta Physiol Scand* 1998 ; 163: 361-8
- Jackson PL, Lafleur MF, Malouin F, Richards C, Doyon J: Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 2001; 82: 1133-1141
- Jeannerod M: The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral Brain Research* 1994; 17: 187-245
- Jeannerod M: Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia* 1995; 33: 1419-1433
- Jeannerod M, Arbib MA, Rizzolatti G, Sakata H: Grasping objects: the cortical mechanism of visuomotor transformation. *Trends Neurosci* 1995; 18: 314-320
- Koehler E, Keysers C, Umiltà MA, Fogassi L, Gallese V and Rizzolatti G: Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science* 2002 ; 297: 846-848
- Lafleur MF, Jackson PL, Malouin F, Richards CL, Evans AC, Doyon J: Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imitation of sequential foot movements. *Neuroimage* 2002; 16: 142-157
- Milner A and Goodale M: *The visual brain in action*. Oxford University Press, Oxford 1995
- Miltner R, Simon U, Netz J, Hömberg V: Motor imagery in the therapy of patients with central motor deficit. *Neurol Rehabil* 1999; 5: 66-72
- Page SJ, Levine P, Sisto S, Johnson MV: A randomized efficacy and feasibility study of imagery in acute stroke. *Clin Rehabil* 2001; 15: 233-240
- Pascual-Leone A, Dang N, Cohen LG, Basil-Neto J, Cammarota A, Hallett M: Modulation of motor responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol* 1995; 74: 1034-1045
- Penhune VB and Doyon J: Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *J Neurosci* 2002; 22: 1397-1406
- Perrett DI, Harries MH, Bevan R, Thomas S, Benson BJ, Mistlin AJ, Chitty AJ, Hietanen JK, Ortega JE: Frameworks of analysis for the neural representation of animate objects and actions. *Journal of experimental Biology* 1989; 146: 87-113
- Rizzolatti G, Camarda R, Fogassi L, Gentilucci M: Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. II. Area F5 and the control of distal movements. *Exp Brain Res* 1988; 71: 491-507
- Rizzolatti G, Arbib MA: Language within our grasp. *Trends in Neuroscience* 1998; 21: 188-194
- Rizzolatti G, Luppino G and Matelli G: The organization of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 1998; 106: 283-296

42. Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L: Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cogn Brain Res* 1996; 3: 131-141
43. Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V: Neurophysiologic mechanisms underlying the understanding and imitation of actions. *Nature Reviews Neuroscience* 2001; 2: 661-670
44. Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V: Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Curr Opin Neurobiol* 2002; 12: 149-154
45. Roure R, Collet C, Deschaumes-Molinario C, Delhomme G, Dittmar A, Vernet-Maury E: Imagery quality estimated by autonomic response is correlated to sporting performance enhancement. *Physiol Behav* 1999; 66: 63-72
46. Sakamoto T, Porter LL, Asanuma H: Long-lasting potentiation of synaptic potentials in the motor cortex produced by stimulation of the sensory cortex in the cat: a basis of motor learning. *Brain Res* 1987; 413 (2): 360-4
47. Stevens JA, Stoykov ME: Using motor imagery in the rehabilitation of hemiparesis. *Arch Phys Med Rehabil* 2003; 84: 1090-1092
48. Strafella AP and Paus T: Modulation of cortical excitability during action observation: a transcranial magnetic stimulation study. *Neuroreport* 2000; 11: 2289-2292
49. Umiltà MA, Koehler E, Gallese V, Fogassi L, Fadiga L, Keysers C and Rizzolatti G: I know what you are doing: a neurophysiological study. *Neuron* 2001; 31: 155-165
50. Weiss T, Hansen E, Rost R, Beyer L, Merten F, Nichelmann C, Zippel C: Mental practice of motor skills used in poststroke rehabilitation has own effects on central nervous action. *Int J Neurosci* 1994; 78: 157-166
51. Yaguez L, Nagel D, Hoffman H, Canavan AG, Wist E, Homberg V: A mental route to motor learning: improving trajectorial kinematics through imagery training. *Behav Brain Res* 1998; 90 (1): 95-106
52. Yue G and Cole KJ: Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J Neurophysiol* 1992; 67: 1114-1123

Korrespondenzadresse:

PD Dr. med. Ferdinand Binkofski
Neurologische Klinik
Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck
Ratzeburger Allee 160
23538 Lübeck
E-Mail: ferdinand.binkofski@neuro.uni-luebeck.de