

Kortikale Repräsentation der Bewegungsvorstellung

K. M. Stephan¹, C. Dettmers², G. R. Fink¹, S. Geyer³, R. J. Seitz¹

¹ Neurologische Universitätsklinik Düsseldorf, ² Neurologische Universitätsklinik Jena,

³ Anatomisches Institut der Universität Düsseldorf

Zusammenfassung

Motorische Vorstellung wird seit langem beim Erlernen und Verbessern motorischer Fähigkeiten von Athleten und Patienten nach Hirnschädigung genutzt. Moderne elektrophysiologische Methoden und die funktionelle Bildgebung helfen uns, die physiologischen Grundlagen der Bewegungsvorstellung besser zu verstehen. Dabei sind neben den Gemeinsamkeiten zwischen Bewegungsvorstellung und -ausführung, die sich in den gemeinsamen PET-Aktivierungen von parietalen und prämotorischen Arealen manifestieren, besonders auch die Unterschiede zwischen den beiden motorischen Aktivitäten im primär motorischen Cortex und im Cingulum von Interesse. Aus anatomischen Untersuchungen gibt es eine Fülle von Kenntnissen und Hypothesen über die Struktur-Funktionsbeziehungen einzelner Hirnareale. Ein direkter Vergleich zwischen den Resultaten von PET Untersuchungen und diesen Ergebnissen erlaubt, diesen Wissensschatz verstärkt in das Verständnis (patho-)physiologischer Vorgänge beim Menschen einzubeziehen, auch wenn hierfür noch viele Hürden überwunden werden müssen.

Schlüsselwörter: Bewegungsvorstellung, motorisches Lernen, PET, MEP

Cortical representation of motor imagery

K. M. Stephan

Abstract

Motor imagery is a popular tool for athletes and patients who try to improve their motor performance. Electrophysiological methods and functional imaging help us to understand its neurophysiological basis. Whereas activations of parietal and premotor areas are common to motor imagery and motor performance, both forms of motor behaviour show marked differences with regard to primary motor and cingulate area involvement. Anatomical studies have provided a wealth of information about the relationship between function and structure. Integration of this information with functional imaging data using a common reference system, provides an interesting opportunity to further our understanding of the physiological basis of motor behaviour in man.

Key words: motor imagery, motor learning, PET, MEP

Neurol Rehabil 1998; 4 (3-4): 125-128

Hintergrund

Bewegungsvorstellung kann zur Verbesserung unterschiedlicher Aspekte motorischer Funktionen führen: Geschwindigkeit, Genauigkeit, Kraft und Zuverlässigkeit der Durchführung [3, 13, 14]. Lee [7] konnte zeigen, daß diese Verbesserung dabei nicht hauptsächlich von der Konzentration oder einer positiven Grundstimmung abhängt, sondern von der Relevanz der vorgestellten Bewegungssequenz für die eigentliche Aufgabe.

Als Ursache für diese Verbesserung wurden sowohl Veränderungen innerhalb des peripheren Nervensystems als auch Veränderungen der muskulären Eigenschaften und des zentralen Nervensystems angenommen. Die Beobachtung, daß ein interhemisphärischer Transfer einer verbesserten motorischen Leistung möglich ist [6, 14], läßt auf eine herausragende Bedeutung zentraler Mechanismen bei der

motorischen Vorstellung schließen. In den achtziger Jahren beobachteten Roland et al. [9] und Fox et al. [4] mit Hilfe der Positronenemissionstomographie eine Aktivierung der supplementärmotorischen Area und prämotorischer Areale während der Bewegungsvorstellung, nicht jedoch des primär sensomotorischen Cortex, der nur bei der eigentlichen Bewegungsausführung signifikant aktiviert wurde. Decety und Jeannerod zeigten, daß physiologische Parameter wie Atemfrequenz und Herzfrequenz sich während der Bewegungsvorstellung in ähnlicher Weise ändern wie während der Bewegungsdurchführung [2]. Bewegungsvorstellung ist somit zwar verwandt, jedoch nicht identisch mit Bewegungsausführung.

Noch schwieriger zu definieren ist der Unterschied zwischen Bewegungsvorstellung und Bewegungsverbereitung. Adams und Mitarbeiter [1] haben gezeigt, daß Herz- und Atemfrequenz sich direkt zu Beginn einer motorischen

Aufgabe ändern, bevor metabolische Faktoren einen Einfluß haben können. Vermutlich führt die Planung einer Aufgabe bereits zur (vorweggenommenen) Adaptation dieser physiologischen Parameter [8]. Bei beiden Aufgaben, Bewegungsvorstellung und Bewegungsverbreitung, richten die Ausführenden bereits ihre Aufmerksamkeit auf die durchzuführende Aufgabe. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, daß sie während der Bewegungsvorstellung bereits die »Bewegung« mental durchführen, während sie bei der Bewegungsverbreitung zwar alles vorbereiten, den eigentlichen Ablauf aber eben nicht in Gedanken durchgehen. Bewegungsverbreitung kann so als Initialstadium einer Bewegung gesehen werden, während Bewegungsverbreitung sehr viel mehr Komponenten mit Bewegungsverbreitung gemein hat, z. B. den vorgestellten Ablauf und das vorgestellte sensorische »Feedback«.

Das Ziel der folgenden Darstellung ist es, die Beziehung zwischen Bewegungsvorstellung, -vorbereitung und -ausführung näher zu untersuchen. Als Ausgangsbasis dienen dabei elektrophysiologische Daten, bei denen mit Hilfe von EMG und MEP Bewegungsverbreitung und -vorstellung näher charakterisiert werden. Anhand einer Untersuchung mit PET wird dann dargestellt, welche kortikalen Areale bei der Bewegungsvorstellung aktiviert werden können. Beide Studien wurden in London am Institute of Neurology und am Hammersmith Hospital durchgeführt. Schließlich wird durch den Vergleich mit den im anatomischen Institut der Universität Düsseldorf gewonnenen zytoarchitektonischen Daten kritisch evaluiert, inwieweit funktionelle bildgebende Daten mit weiteren physiologischen Daten über die Funktion »kortikaler Systeme« kombiniert werden können, um so eine genauere Charakterisierung der Bewegungsverbreitung zu gewinnen.

Elektromyographie und motorisch evozierte Potentiale

Bei der Bewegungsverbreitung werden die Muskeln, die zur Ausführung dieser Bewegungen notwendig sind, nur in Gedanken angesteuert. Wir verglichen in einer Gruppe von fünf Probanden die elektromyographischen Ableitungen (EMG) dieser Zielmuskeln während Ruhe, Vorstellung einer isometrischen Fingerbewegung und Ausführung dieser Fingerbewegung mit dem rechten Zeigefinger. Während eines zweiten Versuchsdurchganges wurden dabei magnetische Stimulationen über dem jeweiligen kortikalen Repräsentationsareal mit Hilfe einer Magnetspule durchgeführt und das EMG des Zielmuskels nach den Stimulationen von den Zielmuskeln abgeleitet (Motorisch evozierte Potentiale (MEP), siehe [11]). Wie die folgenden Ergebnisse bei einer Einzelperson exemplarisch zeigen, besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den drei Versuchsbedingungen (Abb. 1).

Die EMG-Ableitungen in der linken Spalte spiegeln dabei jeweils die Muskelaktivität des ersten Musculus interosseus

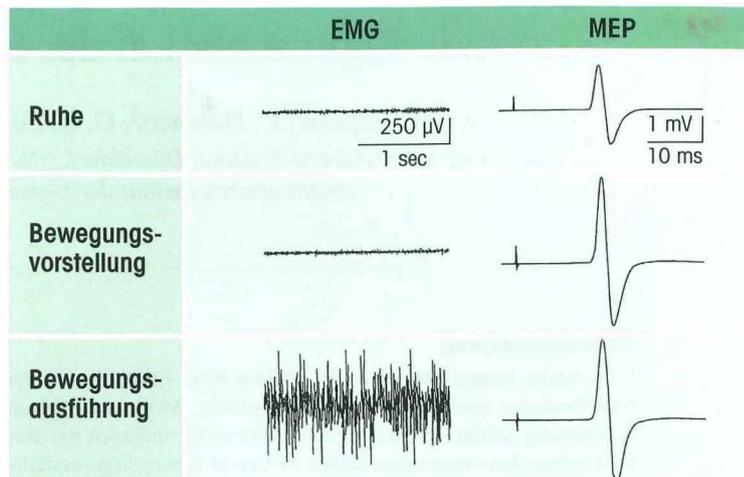


Abb. 1: EMG und MEP bei einer Einzelperson während drei Versuchsbedingungen

während der drei Bedingungen wider, die Kurven in der rechten Spalte das gemittelte EMG-Signal von fünf Ableitungen nach kortikaler Magnetstimulation ebenfalls vom ersten Musculus interosseus (Magstim 200 Stimulator mit einer »figure-of-eight-coil«, 5 % oberhalb der motorischen Schwelle; Details bei [11]).

Die Bewegungsverbreitung geht mit einer gegenüber der Ruhebedingung deutlich erhöhten kortikalen Erregbarkeit einher, ohne daß es zu sichtbaren oder im EMG nachweisbaren Muskelkontraktionen kommt. Während der isometrischen Fingerbewegung sind hingegen sowohl die kortikale Erregbarkeit als auch die periphere EMG-Ableitung ohne magnetische Stimulation gegenüber der Ruhebedingung erhöht. Dieses Resultat steht im Einklang mit EEG- und MEP-Ergebnissen, die ebenfalls eine höhere Erregbarkeit des kortikalen sensomotorischen Systems zeigen.

Positronenemissionstomographie

Die bisher gezeigten elektrophysiologischen Daten erlauben eine Aussage über die Beteiligung der direkten kortiko-spinalen Systeme des primär motorischen Cortex an der Bewegungsverbreitung. Besonders bei komplexeren Bewegungen spielen jedoch auch parietale und frontale sowie prämotorische kortikale Areale eine wesentliche Rolle. Wir haben deren Beteiligung an der Bewegungsverbreitung untersucht, indem wir sechs normale Probanden während einer Positronenemissionstomographie (PET)-Untersuchung baten, sich eine »joy stick«-Bewegung in vier unterschiedliche Richtungen vorzustellen und durchzuführen. Als Kontrollbedingung diente diesmal allerdings nicht Ruhe, sondern die Bereitschaft zur Bewegungsverbreitung [10]. Wir maßen dann die unterschiedlichen Aktivierungsniveaus in den einzelnen kortikalen Arealen nach Injektion von radioaktiv markiertem ^{15}O .

Die Abb. 2 zeigt bei einer Einzelperson die relativen Unterschiede der kortikalen Aktivierung von Bewegungsverbreitung verglichen mit Bewegungsverbreitung auf der linken Seite und Bewegungsverbreitung verglichen mit Bewegungsverbreitung auf der rechten Seite. Das Ergebnis zeigt,

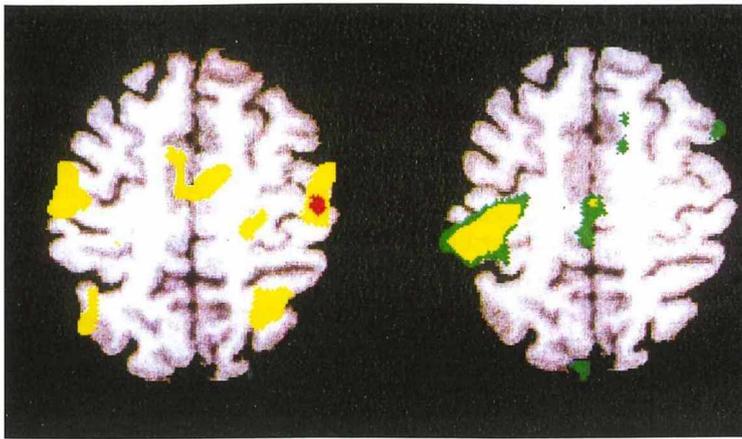


Abb. 2: Relative Unterschiede der kortikalen Aktivierungen bei Bewegungsvorstellung vs. -vorbereitung (li) und Bewegungsdurchführung vs. -vorstellung (re) bei einer Einzelperson (rechte Seite=rechte Hemisphäre)

anatomische Areale	Bewegungsvorstellung		Bewegungsausführung	
	rechte Hem.	linke Hem.	rechte Hem.	linke Hem.
SMA und prämotorische Areale	+	+	+	+
primär sensomotorische Areale (lateral)		+		+
primär sensomotorische Areale (im Sulcus)				++
parietale Areale	+	+	+	+

Tab. 1: Übersicht über die relative Zunahme der Aktivierungen während der Bewegungsvorstellung und Bewegungsdurchführung jeweils verglichen mit der Kontrollbedingung Bewegungsvorbereitung (Gruppenergebnis, n=6)

unsere Ergebnisse	Bewegungsvorstellung lateralen präzentralen Gyrus anteriore Area 4	Bewegungsdurchführung zusätzlich in der Tiefe des Sulcus centralis posteriore Area 4
beim Affen (Aotus) Stepniewska et al. [12]	rostrale (anteriore) M1: enge Verbindungen zu prämotorischen und parietalen Arealen	kaudale (posteriore) M1: enge Verbindungen zu primär sensiblen Arealen
Hypothese von Stepniewska et al. [12]	Die rostrale M1 ist hauptsächlich beteiligt während der Anfangsphase des Greifens	Die kaudale M1 ist hauptsächlich beteiligt während der Schlußphase des Greifens

Tab. 2: PET-Ergebnisse und zytoarchitektonische Daten bei Menschen und Affen

daß die meisten prämotorischen und parietalen Areale schon während der Bewegungsvorstellung aktiviert werden. Zusätzlich werden während der Bewegungsausführung vor allem der kontralaterale primär sensomotorische Cortex und die angrenzenden prämotorischen und parietala-

len Areale aktiviert sowie mittelliniennahe Areale im Gebiet des Cingulums und der supplementär motorischen Area (SMA). Das Gruppenergebnis zeigte im Bereich des Gyrus präcentralis eine interessante Dissoziation: Während der laterale Teil nahe der Cortexoberfläche schon während der Bewegungsvorstellung aktiviert wurde, kam es in der Tiefe des Sulcus centralis erst während der Bewegungsausführung zu einer signifikanten Aktivierung der primär motorischen und sensorischen Areale. Die Ergebnisse sind in der Tab. 1 noch einmal zusammengefaßt.

Vergleich mit zytoarchitektonischen Daten

Die Dissoziation des Aktivierungsmusters innerhalb des Gyrus präcentralis war für uns von besonderem Interesse, da kürzlich über eine Unterteilung des primär motorischen Cortex in zwei unterschiedliche zytoarchitektonische Areale (Areale 4a und 4p) berichtet wurde [5]. Ein direkter Vergleich beider Datensätze mit Hilfe eines Standardhirns zeigte, daß während der Bewegungsvorstellung im Gyrus präcentralis hauptsächlich das vordere und laterale Gebiet des primär motorischen Cortex (Area 4a) und prämotorische Areale aktiviert wurden, während die Bewegungsdurchführung zusätzlich neuronale Populationen innerhalb der weiter hinten und medial gelegenen Area 4p aktivierte. Eine solche zytoarchitektonische Unterscheidung ist von Interesse, da ähnliche Unterschiede auch bei anderen Primaten (Aotus) beobachtet worden sind (Areale M1 rostral und M1 kaudal von Stepniewska et al. [12]). Durch vergleichende anatomische und physiologische Untersuchungen ist bei diesen Affen noch mehr über den Zusammenhang zwischen den kortikalen und subkortikalen Netzwerken von Neuronen und ihre Bedeutung für genau charakterisierte Bewegungen (z. B. Greifbewegungen) bekannt (Tab. 2).

Bei den untersuchten Affen haben Neurone, die in einem vorderen Anteil des primär motorischen Areals liegen (rostrale M1), besonders enge Verbindungen zu prämotorischen und parietalen Arealen, während Neurone in weiter hinten gelegenen Anteilen des primär motorischen Cortex (kaudale M1) enge Verbindungen zu primär sensiblen Arealen haben [12]. Unter Berücksichtigung elektro-physiologischer Daten stellen die Autoren die Hypothese auf, daß die Neurone in der vorderen M1 insbesondere während der Planungs- und Anfangsphase einer Greifbewegung aktiv sind, während die

in der Tiefe des Sulcus gelegenen Neurone vor allem während der (sensibel kontrollierten) Endphase des Greifens eine Rolle spielen. Es ist verführerisch, die genannten Einzelheiten zu einem Gesamtbild zusammenzufügen. Während der Bewegungsvorstellung werden von Nervenzellen

in vorderen Anteilen des primär motorischen Cortex Sequenzierung und Ablauf von Bewegungen geplant und das Zusammenspiel mit Neuronen in prämotorischen und parietalen Arealen eingeübt, während das Training der letzten sensomotorischen »Feinabstimmung« auf die tatsächliche Bewegungsausführung angewiesen ist.

Ein solcher Versuch der Gesamtschau greift aber zu kurz, denn er beruht auf zu vielen bisher unbewiesenen Annahmen. Zum einen wird die Gleichsetzung von vorderen und hinteren primär motorischen Arealen bei Affen und Menschen zwar vermutet, sie ist jedoch noch nicht bewiesen. Weiterhin ist der Zusammenhang zwischen frühen und späten Phasen des Greifens und den Neuronen in unterschiedlichen Arealen im primär motorischen Cortex eine Hypothese, die für Affen entwickelt wurde und die nicht ohne weiteres auf den Menschen übertragbar ist. Und nicht zuletzt ist das im PET verwandte Paradigma nur eines von vielen möglichen. Wir wissen nicht, ob bei einer leicht modifizierten Aufgabenstellung, z. B. einer Konzentration auf das sensorische Feedback während der Bewegungsvorstellung, ein anderes Aktivierungsmuster zu beobachten gewesen wäre.

Ergebnisse und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, daß die Bewegungsvorstellung viele Gemeinsamkeiten mit Bewegungsvorbereitung und -durchführung hat. Der Hauptunterschied zur Bewegungsvorbereitung ist die zusätzliche Aktivierung parietaler und prämotorischer Areale im PET-Experiment. Diese zusätzliche Aktivierung spiegelt vermutlich die gedankliche Sequenzierung der Bewegung unter Berücksichtigung des vorgestellten »Feedbacks« wider. Der Hauptunterschied zur Bewegungsausführung besteht darin, daß die primär motorischen Areale gerade nicht mitbeteiligt sind. Dies erlaubt während der Bewegungsvorstellung eine Konzentration auf bestimmte Aspekte der Bewegungsausführung, ohne daß dieses mentale Einüben von der eigentlichen Bewegung »gestört« wird.

Der Vergleich mit den zytoarchitektonischen Daten zeigt weiterhin, daß die wünschenswerte Kombination von bildgebenden Daten mit zytoarchitektonischen und somit letztendlich auch tierexperimentell gewonnenen Daten zur Entwicklung eines physiologischen Gesamtbildes zwar in Ansätzen möglich wird; zur Entwicklung einer integrativen Gesamtsicht sind aber noch viele weitere Schritte nötig.

Danksagung

Die vorgestellten Resultate sind Ergebnisse von Gruppenarbeiten und -diskussionen. In London im Bereich der Human Movement and Balance Unit vor allem mit: C. Dettmers, M. Ridding und J. Rothwell, hinsichtlich der PET-Arbeit im Hammersmith Hospital mit G. R. Fink, C. Dettmers, R. Passingham, C. Frith und R. S. J. Frackowiak, sowie in Düsseldorf bezüglich der Zytoarchitektonik mit S. Geyer, A. Dabringhaus, R. Schleicher, R. Seitz und K. Zilles.

Literatur

1. Adams L, Guz A, Innes JA and Murphy K: The early circulatory and ventilatory response to voluntary and electrically induced exercise in man. *J Physiol* 1987; 383: 19-30
2. Decety J, Jeannerod M, Germain M and Pastene J: Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. *Behavioural Brain Research* 1991; 42: 1-5
3. Feltz DL, Landers DM: The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of Sport Psychology* 1983; 5: 25-57
4. Fox PT, Pardo JV, Petersen SE, Raichle ME: Supplementary motor and premotor responses to actual and imagined hand movements with positron emission tomography. *Society for Neuroscience Abstracts* 1987; 13: 1433
5. Geyer S, Ledberg A, Schleicher A, Kinomura S, Schormann T, Bürgel U, Klingenberg T, Larsson J, Zilles K, Roland PE: Two different areas within primary motor cortex of man. *Nature* 1996; 382: 802-807
6. Kohl RM, Roenker DL: Bilateral transfer as a function of mental imagery. *Journal of Motor Behaviour* 1980; 12: 197-206
7. Lee C: Psyching up for a muscular endurance task: Effects of image content on performance and mood state. *Journal of Sport and Exercise Psychology* 1990; 12: 66-73
8. Requin J, Brener J, Ring C: Preparation for action. In: Jennings JR, Coles MGH (eds): *Psychophysiology of human information processing*. Wiley 1991
9. Roland PE, Larsen B, Lassen NA, Skinhoj E: Supplementary motor area and other cortical areas in organisation of voluntary movements in man. *J Neurophysiol* 1980; 43: 118-136
10. Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, Frackowiak RSJ: Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol* 1995; 73: 373-386
11. Stephan KM, Frackowiak RSJ: Motor imagery – anatomical representation and electrophysiological characteristics. *Neurochem Res* 1996; 21: 1105-1116
12. Stepniewska I, Preuss TM, Kaas JH: Architectonics, somatotopic organization, and ipsilateral cortical connections of the primary motor area (M1) of owl monkeys. *J Comp Neurol* 1993; 330: 238-271
13. Vogt S: Presentation at the 17th annual meeting of the European Neuroscience Association (ENA). Vienna, 4-8th September 1994
14. Yue G, 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:

K. M. Stephan
Neurologische Klinik
Universität Düsseldorf
Moorenstr.5
D-40225 Düsseldorf