

4. Entwicklung des Paradigmas

4.1. Allgemeine Grundlagen

Für die Darstellung motorischer Hirnareale durch die funktionelle Bildgebung sind unterschiedliche Paradigmen bekannt. Ein häufig verwendetes Paradigma zur Identifikation der Zentralregion mittels der fMRT ist das sogenannte „Fingertapping“. Hauptmerkmal des „Fingertappings“ ist eine nicht standardisierte Bewegung von Hand und Fingern, die vom Patienten aktiv durchgeführt wird. Die Finger werden abwechselnd gebeugt und gestreckt. 1997 konnte Yousry auf diese Weise das motorische Handareal in der „omega-förmigen“ Region des Sulcus centralis funktionell darstellen. Ein solches Paradigma kann jedoch bei Patienten mit motorischen Defiziten nur eingeschränkt eingesetzt werden. Zusätzlich können durch die aktiv durchgeführten Bewegungen ungewollte Artefakte bei der Datenauswertung entstehen.

Es ist daher von großem Interesse, Paradigmen zu entwickeln, die neue Informationen über die komplexe Verarbeitung von Bewegung beim Menschen ergeben. Aus diesem Grund werden zunehmend Paradigmen eingesetzt, die ermöglichen, Einzelaspekte einer erzeugten Bewegung getrennt darzustellen. Eine verwendete Aufgabenstellung fordert den Patienten auf, sich verschiedene Bewegungsabläufe mental vorzustellen (Stephan, 1995; Rao, 1997; Grafton, 1998; Roth, 1996; Cohen, 1996; Gerardin, 2000). Diese Form des Paradigmas wird als „mental movement“ bzw. „motor imagery“ bezeichnet. Die mentalen Bewegungsaufgaben wurden entwickelt, um die bei der Durchführung von Bewegung assoziierten Areale zu erfassen und besser zu verstehen. Stephan (1995) berichtete in einer fMRT Studie mit „motor imagery“ als Paradigma über Aktivierungen des posterioren parietalen Kortex und ging davon aus, dass vorgestellte Bewegung eine besondere Form von motorischem Verhalten ist. Eine weitere Studie konnte mit einem ähnlichen Paradigma zusätzlich Aktivierungen im lateralen prämotorischen Kortex nachweisen (Rao, 1997).

Kritisch bleibt, dass beim „mental movement“ nicht kontrolliert werden kann, ob und wie sich der Patient individuell motorische Aktivität vorstellt. Dieser Unsicherheitsfaktor wird auch durch ein zur Kontrolle parallel durchgeführtes Elektromyogramm (EMG) nicht hinreichend berücksichtigt (Stephan, 1995). Selbst wenn die Aufgabe von allen Patienten gleichartig verstanden wird, wird für die Umsetzung die Phantasie jedes einzelnen Patienten benötigt. Dabei

wird ein hohe Aufmerksamkeit des Patienten vorausgesetzt. Dieses hohe Maß an kognitiver Variabilität sollte in der vorgestellten Arbeit vermieden werden. Es galt ein Paradigma zu entwickeln, das allen Probanden eine vergleichbare Vorstellung von Bewegung durch den Raum vermittelt, ohne dass dabei das individuelle Vorstellungsvermögen eingesetzt werden musste.

Weiterhin mussten bei der Entwicklung des Paradigmas die engen räumlichen Gegebenheiten des Kernspintomographen berücksichtigt werden. Da die Vermittlung von Bewegungs- und Lageveränderungen durch direkte Manipulation der Körperposition bei der fMRT nur eingeschränkt durchführbar ist, sollte die induzierte Bewegung auf visuellem Weg vermittelt werden.

In der Literatur bisher beschriebene Experimente zur Bewegungswahrnehmung und Identifizierung kortikaler Areale, die Bewegungsreize verarbeiten, setzen zweidimensionale Signale ein. So wird ein Eindruck von Bewegung im Raum durch eine zweidimensionale Präsentation von sich bewegenden Punkten vermittelt (Freitag, 1998). Häufig werden als Paradigma so genannte optische Flussmuster („optical flow“) genutzt, die erstmals von Gibson (1950) beschrieben wurden. Diese optischen Flussmuster stellen eine Vorwärtsbewegung von Objekten durch das visuelle Feld dar und vermitteln somit eine Wahrnehmung von Bewegung im Raum (De Jong, 1994; Turano, 1994, Li, 2000). Paradis (2000) beschrieb, dass durch die Präsentation eines optischen Flussmusters zusätzlich auch eine Tiefenwahrnehmung der Umgebung erfolgt und dadurch ein dreidimensionaler Eindruck von Bewegung im Raum vermittelt werden kann. Im Rahmen dieser Studien konnte weiterhin gezeigt werden, dass das Flussmuster nicht nur einen Eindruck von Eigenbewegung durch den Raum vermittelt, sondern auch eine Anpassung der Körperstellung des Beobachters auf die wahrgenommene, veränderte Position im Raum hervorruft, ohne zusätzliche sensorische Signale zu benötigen (Bossom, 1974; Stoffregen, 1985; Andersen, 1986; Warren, 1992). Beinhaltet diese optischen Flussmuster neben einer translativen Komponente, also einem nach vorwärts gerichteten Bewegungseindruck, auch eine rotierende oder kurvenlineare Stimulation, wird die Anpassung des Körpers an die räumliche Veränderung verstärkt.

Zusammenfassend wurden die Erkenntnisse über den durch die optischen Flussmuster vermittelten Bewegungseindruck bei der Entwicklung des in dieser Arbeit vorgestellten Paradigmas berücksichtigt.

4.2. Berücksichtigte Kriterien

Bei der Entwicklung des neuen Paradigmas wurden verschiedene aus der Literatur bekannte Kriterien berücksichtigt.

Für die kortikale Verarbeitung von wahrgenommener Bewegung im Raum ist die Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit der Probanden ein wichtiges Kriterium (De Jong, 1994; Corbetta, 1991, 1993). Daher sollte eine subjektive Attraktivität des Paradigmas unter Berücksichtigung von Kontrast, Farbgebung und Textur (Corbetta, 1990; Büchel, 1998) sicher gestellt werden, um die Aufmerksamkeit der Probanden über die Länge des Versuches zu erhalten. Als Farbe wurde ein Blauton in helleren und dunkleren Varianten gewählt, um subjektive Einflüsse durch die Farbgebung zu verhindern. Die Wahl der Textur war erschwert, da ein Muster erstellt werden sollte, das beim Probanden keine zusätzlichen Assoziationen zu realen Strukturen hervorrufen würde, um Erinnerungen an bekannte Bewegungsabläufe zu vermeiden. Daher schieden bekannte bzw. natürlich vorkommende Texturen, wie z.B. der Film einer Fahrt mit der Achterbahn, aus. Für das Paradigma wurde durch ein Computerprogramm eine Textur erzeugt, die aus kleinen, aneinander liegenden Punkten, so genannter fraktaler Elemente, zusammengesetzt wurde. Insgesamt wurde somit ein den optischen Flussmustern (siehe Kapitel 4.1.) angepasster Reiz nachempfunden, der eine Strömungsbewegung des visuellen Feldes simulierte, wie sie durch die reale Fahrt durch einen kurvenreichen Tunnel entstehen würde.

Die Bewegung der Tunnelfahrt fand überwiegend in Richtung der Sichtlinie (z-Achse) statt, also im Sinne einer vorwärts gerichteten Bewegung. Zusätzlich führte die Tunnelfahrt eine nach links und rechts gerichtete, in beide Richtungen ausgeglichene Kurvenbewegung durch. Für dieses Kriterium des Tunnel-Paradigmas wurden tierexperimentelle Studien (Bench, 1993; Corbetta, 1991, 1993; Petersen, 1987) berücksichtigt, die darauf verweisen, dass der superiore parietale Kortex insbesondere dann beansprucht wird, wenn die Aufmerksamkeit kontinuierlich auf verschiedene Stellen im Raum gerichtet wird. Dabei wurde eine ausgeglichene Abfolge von Rechts- und Linkskurven festgelegt. Der Kurvenverlauf wurde mit einer diskreten Auf- und Abwärtsbewegung konstruiert, um den Eindruck zu verstärken, dass sich der Betrachter während der Präsentation des Paradigmas „in die Kurve legt“. Das Zentrum der Tunnelbewegung, auf welches sich der Blick des Probanden fixierte, verlagerte sich bei der

Kurvenbewegung nur gering aus dem Bildzentrum, so dass ein zuverlässiger Bewegungseindruck vermittelt wurde (Abbildung 5). Die Parameter des Tunnel-Paradigmas werden im Kapitel 5.3.1. beschrieben.

Da das Paradigma durch ein besonderes optisches System präsentiert wurde (Beschreibung erfolgt im Kapitel 5.7. Versuchsaufbau) konnte der Proband dem Paradigma mit beiden Augen folgen, so dass eine binokulare Wahrnehmung der Tiefenebene erfolgen konnte. Auf diese Weise wurde der Eindruck von Bewegung im dreidimensionalen Raum für den Probanden verstärkt.

Zusammenfassend wurde ein neuartiges Paradigma entwickelt, das den Probanden durch die visuelle Präsentation einer kurvenreichen Tunnelfahrt den Eindruck von Eigenbewegung durch einen dreidimensionalen Raum simuliert. Dieses Paradigma wurde als der „Tunnel“ bezeichnet.

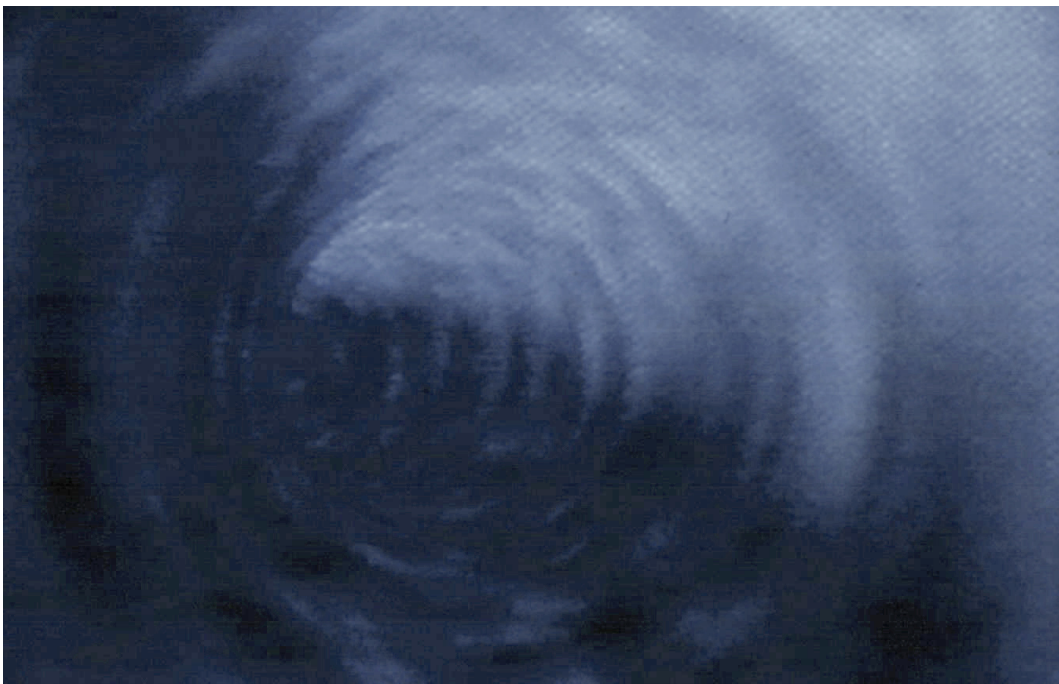


Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Tunnel –Paradigma

4.3. Ergänzende Versuche

4.3.1. Geschwindigkeit

Verschiedene Studien sowohl beim Macaquen als auch beim Menschen berichten von einer möglichen Beteiligung des posterioren parietalen Kortex bei der Diskriminierung verschiedener Geschwindigkeiten (Turano, 1994; Grennee, 1997; Büchel, 1998; Phinney, 2000). Bei diesen Studien konnte jedoch nicht geklärt werden, ob das verwendete Paradigma verstärkt posteriore parietale Areale angesprochen hat, weil eine Diskriminierung verschiedener Geschwindigkeiten erfolgte oder ob durch die Aufgabenstellung eine erhöhte Aufmerksamkeit beim Verfolgen des Paradigmas benötigt worden war.

Die Geschwindigkeit als ein Kriterium für das Paradigma sehend, wurde in dieser Arbeit die optimale Geschwindigkeit der subjektiv empfundenen „Tunnelfahrt“ in Voruntersuchungen ermittelt. Jeweils fünf Probanden sahen sich unter den eigentlichen Messbedingungen im Kernspintomographen das Tunnel-Paradigma in einer „langsamen“ und in einer „schnellen“ Version an. Bei der „langsamen“ Tunnelversion wurde ein Fließmuster appliziert, das den Probanden den Eindruck vermittelte, sie würden langsam einen kurvenreichen Weg durch einen Raum durchschreiten. Die Parameter der beiden Tunnelversionen werden im Kapitel 5.3. erläutert.

Beide Darstellungsformen wurden hinsichtlich ihrer subjektiven Wirkung bzw. Bewegungsempfindung beurteilt und die durch die fMRT bestimmten Aktivierungsareale in ihrer Größe und Ausdehnung betrachtet. Bei der Auswertung der fMRT-Bilder zeigte sich, dass beide Versionen des Paradigmas vergleichbare Aktivierungen erzeugten. Nach Abschluss der Untersuchung wurde für den Hauptversuch die „schnelle“ Version gewählt.

4.3.2. Elektrophysiologische Untersuchung

Bei der Präsentation der Tunnelfahrt wurde eine posturale Anpassungsreaktion des Körpers auf die wahrgenommene Bewegung im Raum beobachtet. Die Probanden berichteten, dass sie beim aufmerksamen Verfolgen des Kurvenverlaufs den Eindruck erhielten, sich „mit in die Kurven zu legen“. Dabei bemerkten sie eine Anspannung der unteren Rücken- und Glutealmuskulatur.

Zum besseren Verständnis dieses Eindrucks wurde eine elektrophysiologische Untersuchung durchgeführt, um zu klären, ob es zu einer tonischen Aktivierung der Rücken- bzw. Glutealmuskulatur während der Präsentation des Tunnels kam. Diese Aktivierung konnte bei den hierfür untersuchten Probanden nachgewiesen werden. Da es aber durch die beschriebene Anspannungsreaktion der unteren Rückenmuskulatur während der fMRT zu keinen zusätzlichen Bewegungsartefakten kam, wurde der beschriebene Effekt während des Versuchs toleriert.

4.3.3. Kalorische Spülung

Nach der Präsentation des Tunnel-Paradigmas berichteten die Probanden von einem während des Versuchs aufgetretenem Schwindelgefühl. Um eine gegebenenfalls zusätzliche vestibuläre kortikale Aktivierung durch das Paradigma erklären zu können, wurde eine kalorische Spülung im Kernspintomographen durchgeführt. Bei diesem Experiment zeigten sich keine dem Paradigma entsprechenden Aktivierungen, so dass von einer Fortführung dieser ergänzenden Untersuchung des Gleichgewichtsystems abgesehen wurde.

4.3.4. Fingertapping

Bei einigen Probanden sollte zusätzlich das motorische Handareal im Bereich des Gyrus praecentralis lokalisiert werden. Dies wurde in einer frühen Untersuchungsphase dazu genutzt, die räumliche Beziehung der Untersuchungsareale zur motorischen Zentralregion zu klären. Für die Bestimmung des Handareals mussten die Probanden eine aktive Bewegungsaufgabe, das sogenannte „Fingertapping“, wie im Kapitel 5.8.5. beschrieben wird, durchführen.

4.4. Kontrollbedingung

Für die Erstellung funktioneller Bilder ist es notwendig, den aktivierten Zustand des Gehirns mit einer Kontrollbedingung, der so genannten Ruhebedingung, zu vergleichen. Die Wahl einer geeigneten Ruhebedingung stellt ein Problem bei der Erfassung und Quantifizierung kognitiver Funktionsabläufe dar. Ein neuronaler Grund- bzw. Ruhezustand kann bei einem wachen, denkenden Menschen nicht festgelegt oder experimentell erzeugt werden. Bei einem Paradigma, welches die Verarbeitung motorischer Aufgaben untersucht, kann der Proband zur

Erstellung eines Ruhezustandes aufgefordert werden, ruhig liegen zu bleiben und die Augen zu schließen. Hierbei geht man von der Vorstellung aus, dass motorische Ruhe gleich bedeutend ist mit dem Zustand der „Nichterregung“ motorischer Hirnareale.

Funktionelle PET-Untersuchungen (Belleman, 1995; Kosslyn, 1993) haben jedoch gezeigt, dass beim Schließen der Augen unerwünschte Aktivierungen erzeugt werden. Daher wurde in der vorgestellten Arbeit als Ruhebedingung ein Standbild des Tunnels gewählt, bei der die untersuchten Gehirnareale mit hoher Wahrscheinlichkeit einen niedrigen Aktivierungszustand haben. Der Vorteil des Standbildes liegt aus methodischer Sicht darin, dass zwischen dem „aktivierenden“ Paradigma und der Ruhebedingung theoretisch nur der Bewegungsmoment einen Unterschied bildet.