
Aus dem Universitätsklinikum Münster
Institut für klinische Radiologie
-Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Walter Leonard Heindel-

**Optimierungsansätze motorischer fMRT-Paradigmen
zur selektiven Darstellung primärmotorischer
Kortexareale**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des doctor medicinae

der Medizinischen Fakultät

der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von:

Epping, Ruth, geb. Hagemann

aus Bergisch-Gladbach

2007

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. V. Arolt

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med. W. L. Heindel

2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. H. W. Bothe

Tag der mündlichen Prüfung: 08.03.2007

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Institut für klinische Radiologie
-Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Walter Leonard Heindel-
1. Referent: Prof. Dr. med. W. L. Heindel
2. Referent: Prof. Dr. med. H. W. Bothe

ZUSAMMENFASSUNG

Optimierungsansätze motorischer fMRT-Paradigmen zur selektiven Darstellung primärmotorischer Kortexareale

Epping, Ruth

Ziel: Das präoperative Auffinden des primärmotorischen Areals (SM1) in der fMRT stellt bei verschobenen anatomischen „landmarks“, z.B. aufgrund eines Hirntumores eine besondere Schwierigkeit dar. Eine Aktivierung durch kontralaterale Fingerbewegungen ist eine gut untersuchte Methode, das SM1 auffindig zu machen und intraoperativ schonen zu können. Ziel dieser Arbeit waren Optimierungsansätze motorischer fMRT-Paradigmen, um möglichst selektiv das primärmotorische Areal detektieren zu können, insbesondere bei Patienten die keine kontralaterale Bewegung ausführen können.

Methoden: fMRT-Studien wurden an insgesamt 24 gesunden, rechtshändigen Probanden in einem 1,5 Tesla MRT durchgeführt, bei Darstellung von 1% und 5% der aktiven Voxel (1%-Map und 5%-Map). Eine Aktivierung erfolgte durch Finger-tapping, die prozentuale Aktivierung der einzelnen motorischen Cortexareale wurde statistisch für die ipsi- und kontralateralen Areale ausgewertet. Die Untersuchung der Vorstellung einer Fingerbewegung und eine Messreihe mit sehr kurzen Messzeiten (Short-TR) schlossen sich an. Dabei wurden die Time courses mit verschiedenen Referenzfunktionen auf eine hohe Übereinstimmung mit dem SM1 geprüft.

Ergebnisse: In der kontralateralen Hemisphäre lagen die meisten aktivierten Voxel im SM1 vor, in der 1%-Map ausgeprägter als in der 5%-Map. Unabhängig von der Map war „Rechts gegen Links“ das beste Bewegungsparadigma, gefolgt von dem Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“. Bei Letzterem stellte sich die ipsilaterale Mitaktivierung des SM1 statistisch signifikant geringer aktiviert dar. Die Ergebnisse der kontralateralen Seite bei einer realen „Bewegung gegen Vorstellung einer Bewegung“ glichen den Vorergebnissen, die ipsilateralen Ergebnisse zeigten keine statistisch signifikante Differenz zur Kontrollbedingung „Ruhe“. In der Messreihe mit kurzen Messzeiten (Short-TR) zeigte keine der erstellten Referenzfunktionen einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen dem Time course des SM1.

Diskussion: Das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ ist das beste Paradigma zur Lokalisation des SM1, wobei eine 1%-Map einer 5%-Map überlegen ist. Zur Beurteilung der sekundärmotorischen Areale ist die 5%-Map der 1%-Map vorzuziehen, da sich hier mehr aktive Voxel in den sekundärmotorischen ROIs finden. Wenn eine einseitige Bewegung nicht möglich ist, kann das Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ eingesetzt werden, das kontralaterale SM1 erscheint jedoch signifikant geringer aktiviert als bei „Rechts gegen Links“. Ipsilateral besteht bei dem Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ die Gefahr der Verwechslung mit dorsal gelegenen Arealen insbesondere bei veränderter Hirnstruktur. Die Hinzunahme der „Vorstellung einer Bewegung“ als Vergleichsparadigma brachte keine signifikante Besserung. In der Short-TR fand sich keine Referenzfunktion, die signifikant den Time course des SM1 bevorzugt und den des PPC hinten anstellt.

Tag der mündlichen Prüfung: 08.03.2007

Meinen Eltern in Liebe und Dankbarkeit

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | <i>Aspekte der funktionellen Gliederung des ZNS</i> | 2 |
| 1.2 | <i>Lokalisation funktioneller Areale</i> | 6 |
| 1.3 | <i>MRT und funktionelle MRT</i> | 8 |
| 1.3.1 | Allgemeines | 8 |
| 1.3.2 | Funktionelles MRT (fMRT) | 9 |
| 1.4 | <i>Pathologie des ZNS und relevante Auswirkungen</i> | 16 |
| 1.5 | <i>Eigene Untersuchungsansätze</i> | 17 |
| 1.5.1 | Problemstellung | 18 |
| 1.5.2 | Lösungsansatz | 19 |
| 2 | Material und Methoden | 20 |
| 2.1 | <i>Allgemeiner Versuchsaufbau</i> | 20 |
| 2.1.1 | Technische Bedingungen | 20 |
| 2.1.2 | Probanden | 21 |
| 2.1.3 | Aufklärung | 21 |
| 2.1.4 | Verwendete Paradigmen | 22 |
| 2.1.5 | Kartierung mit Regions of Interest | 23 |
| 2.1.6 | Datennachbearbeitung & Map-Erstellung | 24 |
| 2.1.7 | Datenauswertung & statistische Verfahren | 25 |
| 2.2 | <i>Detaillierter Versuchsaufbau</i> | 25 |
| 2.2.1 | Paradigmen mit „Bewegung“ und „Ruhe“ als Kontrollbedingung (1%- & 5%-Map) | 25 |
| 2.2.2 | Paradigmen mit „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung (5%-Map) | 26 |
| 2.2.3 | Short-TR: Time courses mit verkürzter Periodenzeit (5%-Map) | 26 |
| 3 | Ergebnisse | 30 |
| 3.1 | <i>Paradigmen mit „Bewegung“ und „Ruhe“ als Kontrollbedingung (1%- & 5%-Map)</i> | 30 |
| 3.1.1 | „Bewegung gegen Ruhe“ (1%- & 5%-Map) | 30 |
| 3.1.2 | „Rechts gegen Links“ (1%- & 5%-Map) | 35 |
| 3.1.3 | Einfluss der Paradigmenwahl auf die Lokalisierung von SM1 | 37 |
| 3.1.4 | Einfluss der Map auf die Lokalisierung von SM1 | 38 |
| 3.2 | <i>Paradigmen mit „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung (5%-Map)</i> | 39 |
| 3.2.1 | „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ (5%-Map) | 39 |
| 3.2.2 | Einfluss der „Vorstellung“ auf die Lokalisierung des SM1 | 41 |
| 3.3 | <i>Short-TR: Time courses mit kurzer Periodenzeit (5%-Map)</i> | 43 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1 | Short-TR: „Rechts gegen Ruhe“ – Anstieg der Time courses | 43 |
| 3.3.2 | Short-TR: „Links gegen Ruhe“ – Anstieg der Time courses | 47 |
| 3.3.3 | Einfluss der Short-TR auf die Lokalisierung des SM1 | 49 |
| 4 | Diskussion | 50 |
| 4.1 | <i>Paradigmen mit „Bewegung“ und „Ruhe“ (1%- & 5%-Map)</i> | 50 |
| 4.1.1 | Wichtige Ergebnisse: | 50 |
| 4.1.2 | Ergebnisdiskussion vor dem Hintergrund der Literatur | 52 |
| 4.1.3 | Fazit 1 bis 5 | 56 |
| 4.2 | <i>Paradigmen mit „Bewegung gegen Vorstellung“ (5%-Map)</i> | 57 |
| 4.2.1 | Wichtige Ergebnisse | 57 |
| 4.2.2 | Ergebnisdiskussion vor dem Hintergrund der Literatur | 58 |
| 4.2.3 | Fazit 6 | 61 |
| 4.3 | <i>Short-TR: Time courses mit kurzer Periodenzeit (5%-Map)</i> | 62 |
| 4.3.1 | Wichtige Ergebnisse | 62 |
| 4.3.2 | Ergebnisdiskussion vor dem Hintergrund der Literatur | 62 |
| 4.3.3 | Fazit 7 | 63 |
| 4.4 | <i>Schlussfolgerungen:</i> | 63 |
| 5 | Literaturverzeichnis | 65 |
| 6 | Danksagung | 70 |
| 7 | Curriculum vitae | 71 |
| 8 | Anhang | I |

Einleitung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Lokalisierung funktionell definierter Areale des menschlichen Gehirns mit Hilfe der funktionellen Kernspintomographie.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist die anatomische Darstellung der von außen nicht sichtbaren Organe des Menschen zunehmend zu einer wesentlichen diagnostischen Stütze geworden. Neben Sonographie und Computertomographie werden seit Anfang der 80er Jahre mit der Magnetresonanztomographie (MRT) Schnittbilder des Körperinneren gewonnen. Im Gegensatz zu den Messverfahren mit ionisierten Strahlen funktioniert die MRT nach dem physikalischen Prinzip der magnetischen Kernresonanz ohne Strahlenbelastung. Wie bei keinem anderen Messverfahren ist es bei der MRT möglich, den Informationsgehalt der Messergebnisse gezielt der medizinischen Fragestellung anzupassen und neben rein anatomischen Bildern selektiv z.B. fett- oder wasserhaltige Gewebe darzustellen.

In den letzten 25 Jahren seit der Entstehung der Kernspintomographie hat sich eine rasante Entwicklung bezüglich der Darstellung des menschlichen Gehirns gezeigt. Während der 80er Jahre richtete sich der Schwerpunkt der Forschung vorwiegend auf die Verbesserung der morphologisch-anatomischen Darstellung. Seit dem Beginn der 90er Jahre wird der Blick zunehmend auf die neurokognitive Forschung und die Verbindung von den so dargestellten Funktionsarealen mit der strukturellen Bildgebung gerichtet (Reiser et al. 1995).

1991 beschrieben Belliveau et al. erstmals die funktionelle Untersuchung des Gehirns mit der MRT. Sie benutzten eine kontrastmittelunterstützte Perfusions-Technik, bei der die Sehrinde nach visueller Stimulation sichtbar gemacht werden konnte (Belliveau et al. 1991). Es entstanden verschiedene Arbeitsgruppen, die schon kurz nach dieser Entdeckung MR-Signalveränderungen nach Stimulation ohne Kontrastmittelgabe in T2-gewichteten Bildern des menschlichen Kortex darstellen konnten (Ogawa et al. 1992; Kwong et al. 1992; Bandettini et al. 1992; Blamire et al. 1992).

Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) bot die erste Möglichkeit, kortikale Reaktionen auf definierte Reize ohne Strahlenexposition und nichtinvasiv mit guter räumlicher- und zeitlicher Auflösung darzustellen und direkt den anatomischen Gegebenheiten zuzuordnen. Die dargestellten Funktionen entstehen aus der Messung des unterschiedlichen Verhaltens von Blutvolumen und -fluss sowie dem lokalen

Oxygenierungsgrad des Blutes, der den entscheidenden Parameter bezüglich der Signalintensität darstellt. Mit verschiedenen Methoden können so die körpereigenen Vorgänge zur bildlichen Darstellung der funktionsbildenden Areale genutzt werden. Es kann daher auf eine früher übliche Kontrastmittelgabe mit Nebeneffekten und unerwünschten Wirkungen verzichtet werden (Henning et al. 1995).

Mittlerweile gibt es sehr viele neurophysiologische fMRT Untersuchungen sowohl im Bereich einfacher sensomotorischer Funktionen, als auch im Bereich komplexerer Funktionen des Gehirns wie Sprache, Erinnerung und Lernen (Karni et al. 1995; Le Bihan et al. 1995; Papke et al. 1999; Deppe et al. 2000). Zur Zeit liegt der Schwerpunkt der fMRT noch im Bereich der Forschung, sie wird aber zunehmend im klinischen Alltag eingesetzt, z.B. zur präoperativen Lokalisierung kritischer Hirnareale bei Hirntumoren oder bei der Therapiekontrolle einer Infarktrehabilitation (Gallen et al. 1994; Kober et al. 2001; Pujol et al. 1998; Pujol et al. 1996; Krings et al. 2001; Roberts et al. 2000).

Die hier vorliegende Studie hat ihren Schwerpunkt in der Untersuchung der klinischen Bedeutung des fMRT mit motorischen Paradigmen (finger-tapping). Besondere Schwierigkeiten gibt es derzeit noch beim Auffinden der primärmotorischen Areale, z.B. zum präoperativen Staging bei Patienten, die nicht in der Lage sind, eine motorische Aufgabe mit der kontralateralen Seite einer Läsion in einer Hemisphäre durchzuführen. Dieses Problem wird in der vorliegenden Studie mit verschiedenen Bewegungs- und Vorstellungsparadigmen angegangen.

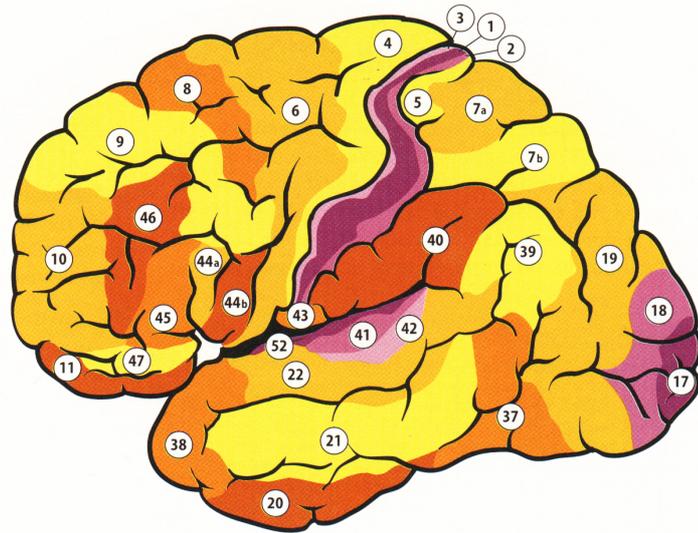
1.1 Aspekte der funktionellen Gliederung des ZNS

Das menschliche Gehirn ist ein sehr komplexes System, das sowohl Sinneseindrücke von 'außen' aufnimmt und verarbeitet, als auch die Organisation und Koordination menschlicher Reaktion steuert. Das Spektrum umfasst die Verarbeitung von Sinneseindrücken und Emotionen genauso wie die Steuerung der Stützmotorik und das Erstellen komplexer willkürlicher Bewegungsprogramme. Seitdem der französische Chirurg Pierre Paul Broca 1861 von einem Patienten berichtete, der nach einer Hirnverletzung nicht mehr imstande war vollständige Sätze zu bilden und bei dem in der nach dem Tod durchgeführten Autopsie das Sprachzentrum lokalisiert werden konnte, träumen Neurobiologen davon, eine funktionelle Karte des menschlichen Hirns zu erstellen (Broca 1861). Dabei ließen sich einfache, gut umschriebene Funktionen bereits bestimmten

Die primären somatosensorischen Areale (Area 1, 2, 3) sind im Gyrus postcentralis lokalisiert und stellen das Ende der Sinnesbahnen aus der Körperperipherie dar, d.h. hier liegen die Projektionsfelder für den Tast-, Temperatur- und Schmerzsinne. Die vom Kopf stammenden 'höheren' Sinne haben eigene Projektionsfelder, so z.B. das Sehen im Lobus occipitale (Area 17, 18) oder das Hören im Temporallappen (Area 41, Heschl-Windung).

Abbildung 2:

Karte der zytoarchitektonischen Felder nach Brodmann (1909), mit der von ihm erstellten Nummerierung. Die verschiedenen Areale sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Der Sulcus centralis trennt den primärmotorischen Cortex (Area 4) vom primär sensomotorischen Gyrus postcentralis (Area 1,2,3). Area 17 ist die primäre Sehrinde, Area 41 die primäre Hörrinde in der Heschl-Windung.
Aus Schmidt Thews Physiologie des Menschen. 26. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995



Das primäre motorische Feld (Area 4, SM1) liegt im Gyrus praecentralis z.T. im Sulcus centralis versteckt und bildet den Beginn der Pyramidenbahn. Die hier liegenden Neurone sind direkt oder nur mit wenigen Umschaltungen mit den motorischen Zielorganen verbunden, es können hier durch elektrische Reize motorische Antworten ausgelöst werden (Wiesendasser 1995; Rao et al. 1996; Roland 1984).

Die sekundärmotorischen Representationsfelder weisen eine deutlich weniger ausgeprägte Somatotopie (s.u.) und eine erhöhte Reizschwelle auf. Insbesondere bei komplexen motorischen Aufgaben kommen den sekundärmotorischen Arealen Steuerungs- und Koordinationsaufgaben zu (Deecke et al. 1969; Shibasaki et al. 1993; Tanji 1994; Sadato et al. 1996). Bei PET- und fMRT-Studien konnte nachgewiesen werden, dass mit zunehmender Komplexität einer motorischen Aufgabe diese sekundärmotorischen Areale einen früheren Beginn ihrer Aktivierung und eine ausgeprägtere Aktivierung an sich aufwiesen (komplexassoziierte Aktivitätsmodulation). Dabei konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass bereits die Planung einer Bewegung bzw. eine rein imaginierte Bewegung mit modulierten Aktivitätsänderungen in prämotorischen Arealen einherging (Boecker et al. 1994 & 1998; Tanji & Shima 1994).

In den primären Arealen liegen die Neurone in somatotoper Anordnung, sie repräsentieren den Körper in einer jeweils typischen Gewichtung. Schon im primär sensorischen Gebiet erscheint das Gesicht und die Hand vergrößert und der Rumpf geringer repräsentiert zu sein. Vor allem wird dies aber im primärmotorischen Zentrum im Gyrus praecentralis deutlich. Hand und Mund nehmen einen Großteil des stark verzerrt erscheinenden Körpers ein, hier benötigen Bewegungen eben auch ein komplexes Zusammenspiel sehr vieler kleiner Muskelgruppen, z.B. für die Feinmotorik der Handbewegungen oder für die komplizierte Koordination der Gesichtsmuskeln zur Sprachproduktion. Dieser von Penfield und Boldrey schon 1938 beschriebene „Homunculus“ konnte durch verschiedene funktionelle Untersuchungen sehr genau lokalisiert werden und bildet eine der am besten verstandenen Regionen des menschlichen Gehirns (Penfield & Boldrey 1937; Penfield & Rasmussen 1950). Dieser „Homunculus“ wird normalerweise auf die Oberfläche des Gyrus praecentralis projiziert. Die exakte Beschreibung einzelner funktioneller Regionen zeigt deren Beziehung zueinander, zur Sylvischen oder medianen Fissur oder zum zentralen Sulcus auf.

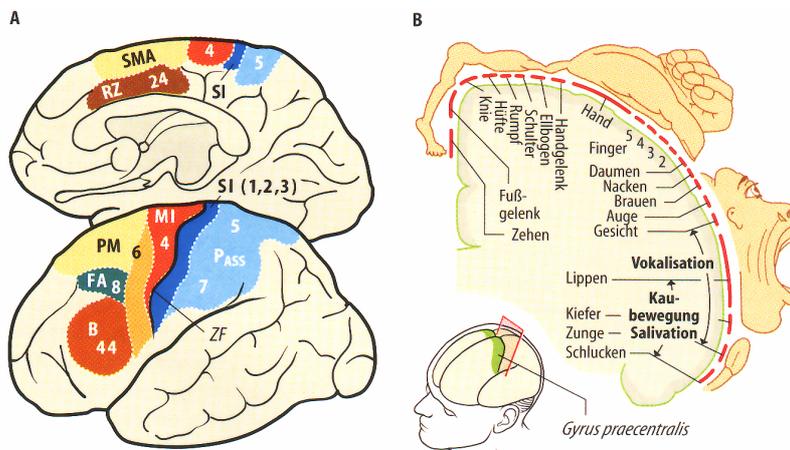


Abbildung 3: Sensomotorische Repräsentationsfelder der menschlichen Hirnrinde.

A: MI / Area : primärmotorischer Kortex, PM: prämotorischer Kortex, SMA: supplementär-motorische Area. Area 8: Frontales Augenfeld, Area 44: Expressives Sprachzentrum (Broca-Zentrum), Area 5: Primär-sensorisches Areal, Area 7: parietaler Assoziationskortex.

B: Motorischer Homunculus mit verzerrter Darstellung entsprechend der ungleichen somatotopischen Repräsentation im primär-motorischen Kortex (nach Penfield & Rasmussen)

Aus: Schmidt/Thews: Physiologie des Menschen. 26. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

Während die im primärmotorischen Kortex gelegenen Neurone die Kontraktion kleiner Muskeln direkt auslösen können, z.B. die Bewegung einzelner Finger, benötigen komplexere Bewegungen übergeordnete Zentren zur Vorbereitung und Steuerung. Dieses

sekundärmotorische Projektionsfeld liegt weiter medial und rostral und steuert umfassendere Bewegungen, wie z.B. eine Drehung des Rumpfes.

Die Pyramidenbahnen haben einen hohen Anteil kreuzender Fasern, jedoch kreuzen ca. 10 bis 15% der absteigenden corticospinalen Bahnen nicht auf die gegenüberliegende Seite. Diese ipsilateral zu einer Bewegung gelegenen, nicht-kreuzenden corticospinalen Bahnen scheinen die motorischen Bewegungsabläufe mit zu planen und zu sichern, wie in Studien mit elektrischer corticaler Reizung zusammengefasst in einer ausführlichen Übersichtsarbeit von Wassermann et al. gezeigt werden konnte (Bucy et al. 1933; Wassermann et al. 1994). Eine genaue anatomische und funktionelle Zuordnung der einzelnen Bahnen wird jedoch noch weiter erforscht. Eine ipsilaterale Mitaktivierung von primärmotorischen Arealen kann auf nicht-kreuzende Bahnen zurück geführt werden (Papke et al. 2000; Nyberg-Hansen et al. 1963). Die hauptsächliche Aktivierung zur Planung einer Bewegung scheint sich auf beide Hemisphären zu verteilen und schlägt sich dort im fMRT als Aktivierung der sekundärmotorischen Areale nieder (Chen et al. 1997).

1.2 Lokalisation funktioneller Areale

Das Auffinden der motorischen Regionen wird traditionell anhand von anatomischen Landmarken wie dem Sulcus centralis oder dem „motor knob“ an anatomischen Schnittbildern durchgeführt. Zum anatomischen Auffinden des Sulcus centralis bzw. der daran anschließenden Regionen der Primärmotorik (Gyrus praecentralis) und primär sensorischen Areale (Gyrus postcentralis) eignen sich insbesondere transversale MRT oder CT-Schnitte des ZNS. Dabei ist die MRT dem CT bezüglich der Zuverlässigkeit, des Kontrastes zwischen weißer und grauer Substanz sowie der Artefaktreduzierung deutlich überlegen (Lanfermann et al. 1997; Mao und Berns 2002).

Mit sagitalen MRT-Bildern lassen sich der anteriore aufsteigende Ast der Sylvii'schen Fissur sowie der inferiore praecentrale Sulcus identifizieren, die die primären Motorareale und das Broca-Zentrum umgeben. In über 90% ist der inferiore Sulcus praecentralis der Sulcus hinter dem anterioren aufsteigenden Ast der Sylvii'schen Fissur (Ebeling et al. 1989; Kido et al. 1980; Steinmetz et al. 1990; Rumeau et al. 1994; Naidich et al. 1995).

Das anatomische Handareal auf dem Gyrus praecentralis lässt sich in dem so genannten „motor knob“ lokalisieren. In sagitalen MRT-Bildern zeigt sich dies als hakenförmige, in axialen Bildern als omega- oder epsilonförmige Struktur am Kreuzungspunkt des praecentralen- mit dem centralen Sulcus. Dieser „motor knob“ kann als neuroanatomischer

Orientierungspunkt zur Identifikation des praecentralen Gyri genutzt werden, er stimmt mit dem „mittleren Knie“ des Sulcus centralis überein (Yousry et al. 1995; Kahn et al. 1996; Yousry et al. 1996; Yousry 1997).



Abbildung 4: Yousry et al 1997: MRT-Schnittbild mit ‚motor knob‘ (Pfeile und Schraffur)

Es ergeben sich allerdings besondere Schwierigkeiten bei Vorliegen intracranieller Raumforderungen, kortikaler Reorganisation oder anatomischer Varianten, da die eigentliche funktionell bedeutsame Hirnregion von der anatomischen verschieden sein kann (Sobel et al. 1993; Yousry et al. 1995).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten dennoch die eigentliche funktionelle Region ausfindig zu machen. Eine nichtinvasive Methode stellt die fMRT dar, die direkt die funktionellen Daten auf die anatomischen Schnittbilder mit hoher räumlicher Auflösung überträgt (Ebeling et al. 1991). Es können neben dem primär motorischen Kortex auch supplementär motorische Areale, sensorische Gebiete, visuelle und auditive Zonen etc. dargestellt werden. Besonders schwierig sind dabei vor allem die Unklarheit über den Zusammenhang der tatsächlichen Lokalisation der neuronalen Aktivität und den gemessenen hämodynamischen Veränderungen sowie die Schwierigkeit der Bewegungs- und Blutflussartefakte.

1.3 MRT und funktionelle MRT

1.3.1 Allgemeines

Anfang der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts entstand aus der Röntgentechnik die Computertomographie. Aus hochauflösenden Schichtaufnahmen ließen sich erstmals dreidimensionale Bilder des lebenden Hirns konstruieren. Zunächst waren sowohl die Computer- als auch die in den 80er Jahren entwickelte Magnetresonanztomographie (MRT) vorwiegend für anatomische Studien einsetzbar, über die Funktionsweise des Gehirns ließen sich noch keine genauen Aussagen treffen. Aber schon kurz darauf entstand die Positronenemissionstomographie (PET) und Anfang der 90er Jahre die funktionelle MRT (fMRT), die es erlauben, eine Aussage über die Struktur und die Funktion des Gehirns zu treffen (Colebatch et al. 1991; Deiber et al. 1991; Kwong et al. 1992; Connely et al. 1993; Frahm et al. 1994).

Die Magnetresonanz- oder auch Kernspintomographie erfolgt durch das Anlegen verschiedener Magnetfelder an den Patienten/Probanden. Dieser befindet sich in einem statischen Magnetfeld, einem durch schnell geschaltete Gradienten hervorgerufenen magnetischen Wechselfeld sowie kurzzeitigen Hochfrequenzeinstrahlungen durch HF-Sendespulen. Das statische magnetische Hauptfeld wird mit einem großen Magneten erzeugt, dem Permanent-, Widerstands- oder meistens supraleitenden Magneten. Der zu Untersuchende ist bei der Messung umgeben von Gradientenspulen zur Ortskodierung und speziellen Spulen für die Sendung und den Empfang von Hochfrequenzsignalen im Nahbereich sowie für die Reduktion von Rauschartefakten. Aufgrund des Aufenthaltes in einem starken Magnetfeld müssen die Probanden/Patienten darüber aufgeklärt werden, dass keine ferromagnetischen Materialien in den Untersuchungsraum gebracht werden dürfen. Insbesondere gilt dies wegen der Unfallgefahr für Geldstücke oder andere eisenhaltige Gegenstände, wegen des Funktionsverlusts für Uhren und Chequekarten und zur Vermeidung von Artefakten für Reißverschlüsse, Ohrringe etc.. Menschen mit Herzschrittmachern dürfen aufgrund des Funktionsverlustes, Patienten mit magnetischen Prothesen oder dislozierbaren ferromagnetischen Fremdkörpern wegen der Wärmeentwicklung nicht kernspintomographisch untersucht werden. Beachtet werden muss, dass wechselnde Gradientenmagnetfelder in elektrischen Leitern Ströme induzieren können. Dies ist auch in biologischen Geweben möglich und kann zu Depolarisation elektrisch stimulierbarer Zellen führen, was sich in Hautempfindungen, Muskelkontraktionen und kardialen Arrhythmien äußern kann. Bei den klinisch

verwendeten Geräten von bis zu 2 Tesla sind die Gradientenanstiege zu kurz, um die Effekte subjektiv zu bemerken. Es wurden bislang keine biologisch relevanten hämodynamischen oder neuronalen Nebenwirkungen bei Anwendungen bis zu 2 Tesla nachgewiesen. Eine geringe Erwärmung des Gewebes ist möglich, bei Menschen mit normaler Thermoregulation ist aber keine spürbare Temperaturerhöhung zu befürchten (Henning et al. 1995).

1.3.2 Funktionelles MRT (fMRT)

Beim Versuch, die kognitiven und mentalen Fähigkeiten bestimmten Hirnarealen zuzuordnen, orientierte man sich lange Zeit an Patienten mit Erkrankungen des ZNS. Unklar blieb, ob die Ergebnisse auch für das gesunde Hirn Gültigkeit haben. Daher wendete sich die Wissenschaft zunehmend dem gesunden Gehirn zu, wobei dabei die Frage nach der funktionellen Organisation im Vordergrund stand. In den letzten Jahren konnte in der Forschung an gesunden Probanden mittels fMRT und anderen funktionellen Messmethoden viel über die Funktionsweise der Hirnregionen z.B. im Bereich der Willkürmotorik und der visuellen und auditiven Schrinde herausgefunden werden. Dennoch bestehen bislang noch lückenhafte Kenntnisse von grundlegenden kognitiven Prozessen wie z.B. der Aufmerksamkeit oder dem Lernen (Blamire et al. 1992; Turner et al. 1993; Karni et al. 1995; Culham & Kanwisher 2001; Grezes & Decety 2001).

PET und fMRT stoßen dort an ihre Grenzen, wo sehr schnelle Hirnprozesse vorliegen. Manche Vorgänge - wie zum Beispiel das Lernen - lassen sich mit fMRT gut verfolgen, viele kognitive Prozesse spielen sich jedoch nicht im Sekunden-, sondern im Millisekundenbereich ab. Nicht nur die zeitliche, sondern auch die räumliche Auflösung stellt ein Problem dar, da Aktivierungen unter einem Millimeter Größe sich mit PET und fMRT nicht auffinden lassen. Hier wird die Bildgebung mit zunehmendem Fortschreiten der Technik oder erhöhten Tesla-Bereichen in Zukunft noch weiter verfeinert werden.

Die fMRT hat gegenüber anderen Verfahren zur Untersuchung der Hirnfunktion einige Vorteile: Die hohe räumliche Auflösung (1-4 mm in der Bildebene) sowie eine relativ hohe zeitliche Auflösung (0,1–1 Sek.). Zudem ist sie eine nicht-invasive, leicht zu wiederholende Methode mit minimaler Patientenvorbereitung. Es können anatomische und funktionelle Untersuchungen in einem Arbeitsschritt durchgeführt werden und sie kann mit den meisten klinisch eingesetzten MR-Scannern durchgeführt werden (Detre et al. 2001; Culham et al. 2001).

1.3.2.1 Grundlagen

Das menschliche Gehirn besteht aus vielen Arealen, die dafür zuständig sind, Tätigkeiten zu koordinieren und zu steuern (siehe Kapitel 1.1). Die funktionelle MRT (fMRT) stellt aktive Hirnareale mit Hilfe verschiedener Effekte bildlich dar. Jede zerebrale Aktivierung geht mit Sauerstoffverbrauch und nachfolgender Erhöhung des Blutflusses und -volumens einher, um das aktive Gebiet ausreichend zu versorgen (Fox & Raichle 1986). Der Sauerstoffverbrauch in Kombination mit einer erhöhten Durchblutung führt zu einer messbaren Signaländerung, das Blut verhält sich somit wie ein körpereigenes Kontrastmittel. Die Signalsteigerung kann dem anatomischen MR-Bild mit hoher Auflösung zugeordnet werden und zeigt damit ein funktionelles Hirnareal als „hot spot“ im Bild an. Die Signalveränderungen sind sehr gering, ebenso wie die gesuchten Gebiete auf der „Hirn-Landkarte“. Zusätzlich erschwert wird die Untersuchung durch die Entstehung von Artefakten, z.B. durch Bewegungen oder durch das Abfließen des magnetisch aktivierten Blutstromes. Dennoch macht es eine wiederholte Messung der Schichten funktioneller Aktivierung möglich, eine statistisch signifikante Signaländerung „herauszufiltern“, die damit das erwartete Areal markiert (Sunaert & Yousry 2001; Naidich et al. 2001). Bei einem Teil der Untersuchungen werden nicht bekannte Lokalisationen der Aktivierung gesucht und dazu das gesamte Gehirn untersucht. Dies erfordert ein „Scannen“ in vielen Schichten mit größerem Abstand und mit möglichst schnellen Sequenzen. Wenn eine bekannte Region bei einer Aktivierung untersucht werden soll, um z.B. den zeitlichen Verlauf eines Signals darzustellen, ist eine höhere Zeitauflösung bei geringerem Schichtumfang notwendig.

1.3.2.2 Bildsequenzen und BOLD-Effekt

Verschiedene Bedingungen müssen erfüllt sein, damit ein funktionelles MR-Bild erstellt werden kann. Zum einen sorgen BOLD- und INFLOW-Effekt im Gehirn für eine Signaländerung, zum anderen müssen spezielle T2-gewichtete Sequenzen (EPI, Flash 2D) zur Messung herangezogen werden. Die voraussehbaren Artefakte sollten möglichst vermieden bzw. abgeglichen werden, sowie das Hintergrundrauschen mit eingeplant werden.

Desoxygeniertes Hämoglobin im Blut ist paramagnetisch und induziert in Gefäßnähe einen lokalen Magnetfeldgradienten. Mit geeigneten Messsequenzen (EPI o.ä.) gemessen, führt dies zu einer lokalen Signalverminderung, dem sogenannten Suszeptibilitätseffekt. Dieser Effekt nimmt ab, wenn mit Sauerstoff beladenes diamagnetisches Hämoglobin in den

lokalen Magnetfeldgradienten gelangt. Dies zeigt sich in einem Anstieg des Messsignals (Belliveau et al. 1991; Henning et al. 1995). Bei der Aktivierung zerebraler Zentren wird der erhöhte Sauerstoffbedarf lokal durch vermehrte Abgabe aus dem Blut gedeckt, das Desoxy-Hämoglobin steigt in den Erythrozyten an. Das präkapillare Strombett dilatiert, um den Nachschub an O₂-haltigem Blut für die aktivierten Gebiete sicherzustellen. Mit dem einströmenden Blut gelangen vermehrt ungesättigte Spins aus der Umgebung in das aktive Areal, wodurch das magnetische Signal erhöht wird (INFLOW-Effekt) (Henning et al. 1995). Mit der Erhöhung des regionalen Blutflusses fließt mehr sauerstoffgeladenes Blut in das benötigende Gebiet. Somit übersteigt der Sauerstoffgehalt den Verbrauch und es kommt zu einer Zunahme der Sauerstoffkonzentration im abtransportierenden venösen Kapillarnetz. Mit diesem Überschuss an oxygeniertem im Verhältnis zum desoxygenierten Hämoglobin verlängert sich die Zeit, in der die Protonenspins dephasieren, da das HbO₂ diamagnetisch ist. Es kommt zu einer Verlängerung der lokalen T₂-Zeit. In speziellen T₂-gewichteten Sequenzen (EPI, Flash) kommt es damit zu einem Signalanstieg, der die lokal aktiven Gebiete in der Bildgebung anzeigt. Diese Technik wird auch als blood-oxygen-level-dependant-Effekt bezeichnet (BOLD) (Belliveau et al. 1991; Ogawa et al. 1992 & 1993).

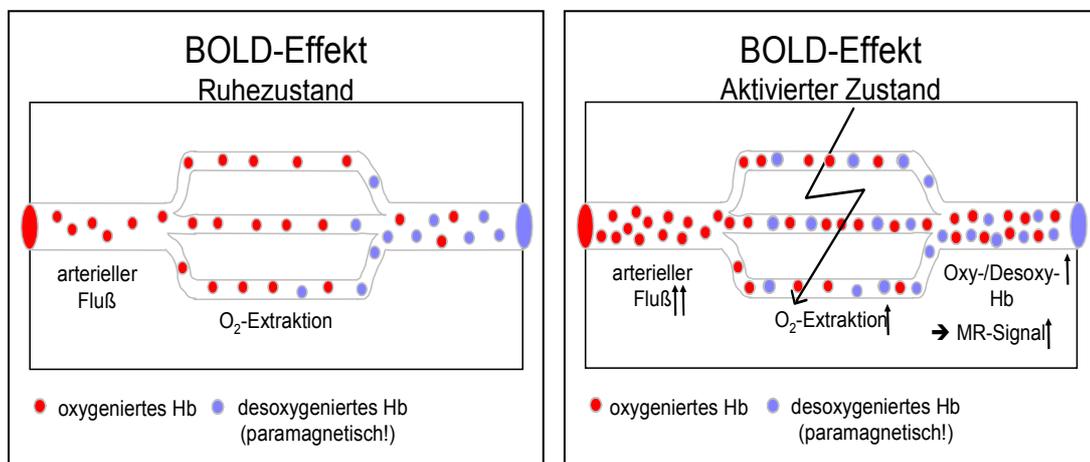


Abbildung 5 und 6: BOLD-Effekt: Nach Aktivierung eines Areales durch z.B. eine motorische Aufgabe erhöht sich zunächst die lokale O₂-Extraktion, gefolgt von einem erhöhten arteriellen Fluss. Dies führt zu einem gesteigerten Verhältnis von Oxy-/Desoxy-Hb, welches zu einem gesteigerten MRT-Signal führt.

Auf BOLD- und Inflow-Effekten beruht die Messmethode des fMRT, da ein physiologischer Vorgang dazu benutzt wird, die Aktivität in einem funktionellen Gebiet des Gehirns darzustellen. Dabei muss kein paramagnetisches oder anderes Kontrastmittel von

außen zugegeben werden. Der Signalanstieg im MR-Bild beträgt ca. 3,5% (Yousry et al. 1995; Kim et al. 1997; Papke et al. 2000). Ein BOLD-Effekt lässt sich wie oben beschrieben mittels T2-gewichteten Sequenzen nachweisen, da sich die lokale T2-Zeit als Phase der Dephasierung von Protonenspins verlängert. Speziell dafür geeignete Sequenzen sind die Gradientenecho- oder Echo-Planar-Sequenzen (EPI). Insbesondere die EPI-Sequenzen haben den Vorteil, für Datenaufnahmen weniger als 100 ms pro Bild zu benötigen und so Bewegungsartefakte zu verringern (Wildgruber et al. 1997).

1.3.2.3 Funktionelle Messung motorischer Paradigmen

Zur selektiven Aktivierung einer bestimmten Gehirnregion muss ein geeignetes Paradigma ausgewählt werden. Ein Paradigma besteht dabei aus einem systematischen Wechseln einer Aktivitäts- und einer Kontrollbedingung. Motorische Hirnareale können durch Fingerbewegungen, die Sehrinde durch Lichtblitze und höhere kognitive Zentren z.B. durch Sprachaufgaben aktiviert werden. Visuelle, auditive und andere sensorielle Reize erfordern einen relativ hohen Aufwand zur ungestörten Reizdarbietung, insbesondere da metallische Materialien ausgeschlossen werden müssen. Motorische Reize hingegen können nach einer Schulung und der erfolgten Aufforderung ohne größeren apparativen Aufwand ausgeführt werden. Im einfachsten Fall gehört dazu eine definierte Bewegung, z.B. eines oder mehrerer Finger, die durch Wiederholung und Erhöhung der kognitiven Leistung kompliziert werden können. In der Regel ist es erforderlich, eine Aufgabe in einer Messung mehrmals zu wiederholen, um einen Signalunterschied zwischen Ruhe- und Aktivierungszustand messen und ihn von zufälligen Signaländerungen abgrenzen zu können. Daher ist es sinnvoll Blockparadigmen einzusetzen, bei denen sich die Aktivitäts- und Kontrollbedingungen abwechseln und so direkt hintereinander gemessen werden können. Diese repetitiven Messungen führen zu minimalen Aktivitätsunterschieden der Voxel, welche mit geeigneten statistischen Verfahren so „verstärkt“ werden, dass sie als aktivierte Voxel vom „Rauschen“ differenziert werden können.

| fMRT Einfaches Blockparadigma | | | | | | |
|----------------------------------|-------|--------|-------|--------|---------|---------|
| Zeit [sec] | 0-30 | 31-60 | 61-90 | 91-120 | 121-150 | 151-180 |
| Serie | 1-10 | 11-20 | 21-30 | 31-40 | 41-50 | 51-60 |
| Bedingung | Aktiv | Kontr. | Aktiv | Kontr. | Aktiv | Kontr. |

Abbildung 7: Einfaches Blockparadigma mit einer je 10 Messungen dauernden Aktivierungsphase alternierend mit der ebenfalls 10 Messungen dauernden Kontrollphase.

Der Signalanstieg in aktiven Hirnregionen während der Aktivierungsphasen lässt sich mit geeigneten statistischen Methoden als Signaldifferenz zu Ruhebildern der gleichen Region messen. Diese Signaldifferenzen bewegen sich in einer Größenordnung von 1-5% bei einer Feldstärke von 1,5 Tesla. Die aktivierten Voxel werden über ein anatomisches Bild gelagert und können somit bestimmten Regionen zugeordnet werden (Mao & Berns 2002).

In dieser Arbeit wurde als Aktivierungsparadigma immer die weiter unten genauer beschriebene alternierende Bewegung der Finger 2 bis 5 an den Daumen gewählt, die Kontrollbedingung bestand entweder ebenfalls aus einer Bewegung, der Vorstellung derselben oder einer Ruhephase. Es spielen die Präzision einer Bewegung, die ausgeführte Kraft, die Komplexität, die Tatsache einer eigenständig durchgeführten oder auf Anweisung ausgeführten Bewegung eine Rolle.

Die im Gehirn aufgetretene Aktivierung der Voxel wird „herausgefiltert“, indem eine vorher gewählte prozentuale Anzahl der aktiven Voxel angezeigt wird, in diesem Fall 1% bzw. 5%. Ein Voxel entspricht einer Signal-Zeit-Kurve mit der Auflösung der entsprechenden Zeit, wie z.B. in den ersten Versuchsteilen 3 Sekunden. Um ein Voxel als aktiviert „herauszufiltern“, werden die möglichen Voxel mit einer Schar von einfachen Box-Referenzfunktionen korreliert. Die Voxel mit einer hohen Korrelation verhielten sich in ihrem Aktivitätsmuster ähnlich dem durchgeführten Bewegungsparadigma.

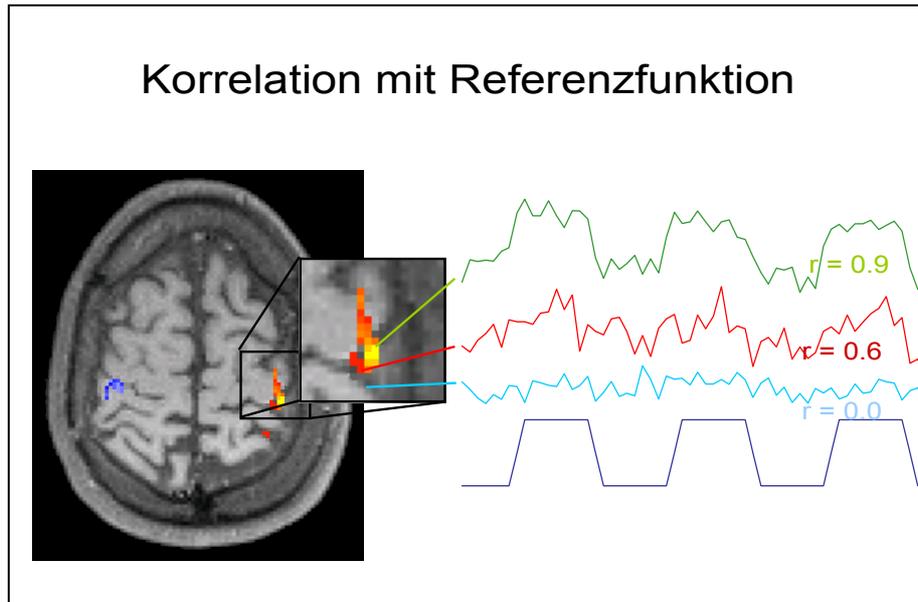


Abbildung 8: Korrelation von als aktiviert angezeigten Voxeln im SM1 mit einer Box-Referenzfunktion: Die zentral im motorischen Kortex lokalisierten Voxel korrelieren hoch, diejenigen im Randgebiet zeigen noch eine Übereinstimmung, während die extralokal liegenden Voxel nicht mit der Referenzfunktion korrelieren.

Dabei wird ein individueller Schwellenwert des Korrelationskoeffizienten, ab dem ein Voxel als aktiviert angesehen wird, willkürlich so gewählt, dass 1% bzw. 5% der Voxel als aktiviert angesehen werden. Je niedriger diese individuelle Schwelle gewählt wird, umso mehr aktive Voxel sind sichtbar. Daher finden sich bei einem niedrigeren Schwellenwert mit einer höheren Anzahl der als aktiviert angezeigten Voxel (z.B. 5%-Map) vermehrt solche, die nicht sehr hoch korrelieren, das Rauschen ist erhöht und die Bilder werden „unschärfer“. Wird der Schwellenwert höher gewählt, werden insgesamt weniger Voxel als aktive Voxel angezeigt (z.B. 1%-Map), das Rauschen ist geringer und die Bilder werden schärfer, es können jedoch auch tatsächlich aktivierte Voxel „herausgefiltert“ werden. Daher verschiebt sich das Bild zugunsten der Voxel, die hoch korrelieren, welche sich vor allem im SM1 finden. Die Wahl des individuellen Schwellenwertes mit Erstellen der 1%-Map bzw. 5%-Map führte zu einer interindividuellen Normierung, nach diesem Arbeitsgang können die Daten der einzelnen Personen miteinander verglichen werden. Dabei entstehen Gehirn-Maps mit 1% oder 5% der aktiven Voxel, welche sich auf die motorischen Areale projizieren. Dort können sie über die anatomisch gebildeten Regions of Interest (ROIs) seitenunabhängig erfasst und weiter ausgewertet werden. Zunächst kann dabei die Anzahl der aktiven Voxel in einer ROI ausgezählt und dann prozentual mit den anderen ROIs verglichen werden.

Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung der fMRT rückt zunehmend eine zeitlich orientierte Analyse des Aktivierungsverhaltens innerhalb definierter intracerebraler Areale in den Vordergrund. Dabei können die Time courses von aktivierten Arealen miteinander verglichen und bezüglich Differenzen des Beginnes der Aktivierung, des Anstiegswinkels und des Abfalles nach einem Plateau verglichen werden. In der Literatur liegt die durchschnittliche Zeit im SM1 zwischen dem Beginn einer Bewegung und der Signalveränderung in der ROI bei ca. 2 bis 7 Sekunden (Weilke et al. 2001; Halsband et al. 1994; Ugurbil et al. 1999; Kwong et al. 1992). Eine Bewegung wird zunächst in einem sekundärmotorischen „Planungszentrum“ vorbereitet und dann über das primärmotorische Areal an die Peripherie weitergeleitet. In einigen Studien konnte diese zeitliche Reihenfolge bereits nachgewiesen werden (Mohamed et al. 2003; Weilke et al. 2001; Lee et al. 1999; Richter et al. 1997; Kim et al. 1997). Weitere Untersuchungen zeigten einen zeitlichen Unterschied in dem Beginn des aktivierten Signales zwischen den benachbarten Venen und dem eigentlichen Parenchym, in dem das eigentliche motorische Zentrum liegt, wobei die hämodynamischen Veränderungen in den Venen im Mittel eine etwas längere Zeit zur Aktivierung aufwiesen (Krings et al. 1999; Frahm et al. 1994). Zudem weisen mehrere Studien eine unterschiedlich starke Aktivierung der einzelnen Areale bei der Planung oder der konkreten Ausführung einer Bewegung nach (Richter et al. 1997; Kim et al. 1997; Hara et al. 2001). Diese Tatsachen führen dazu, dass weiterhin an Paradigmen und fMRT-Auswertungsmethoden gearbeitet wird, um die einzelnen (motorischen) Areale voneinander unterscheiden zu können.

1.3.2.4 Bewegungsartefakte

Es entstehen während einer Untersuchung verschiedene Bildartefakte durch Bewegungen. Dabei sind für die MRT zum einen Artefaktquellen durch Herzschlag, Atmung etc. (aliasing) wichtig (Glover & Noll 1993; Yousry et al. 2001). Zum anderen bereiten Kopfbewegungen besondere Schwierigkeiten, da sie im Gegensatz zu den anderen Artefaktquellen häufig mit den Bewegungsparadigmen assoziiert sind. Diese Kopfbewegungen treten vermehrt bei aktiven willkürlichen Bewegungsparadigmen auf, seltener bei passiven sensiblen Untersuchungen. Sie reduzieren nicht nur das Signal-zu-Rausch-Verhältnis in aktivierten Regionen, sondern produzieren auch meist randständig oder zwischen den Fissuren des Gehirns gelegene „Pseudoaktivierungen“. Diese aktivierten Voxel führen zu enormen Problemen in der Auswertung der Daten (Hajnal et al. 1994; Bucher et al. 1995).

1.3.2.5 Probleme und Grenzen der fMRT

Eine häufige Fragestellung an die fMRT ist die Lokalisierung der primär-motorischen Kortexareale am Sulcus centralis vor chirurgischen Eingriffen bei Raumforderungen in diesem Hirngebiet. Wünschenswert ist eine möglichst genaue Aussage über die Lagebeziehungen einer Raumforderung zu funktionell bedeutenden Kortexarealen, um diese während einer Resektion möglichst zu schonen und Risiken einer Operation genau abwägen zu können. Speziell das primärmotorische Areal hat dabei eine besondere Bedeutung, da hier eine Zerstörung durch einen operativen Eingriff nicht von anderen Arealen kompensiert werden kann und es zu unwiederbringlichen Ausfallserscheinungen kommt, die möglichst vermieden werden sollten. Das motorische Hand-Areal spielt dabei aufgrund der hohen Wichtigkeit der Benutzung einer Hand eine herausragende Rolle. Die meisten Raumforderungen im Gehirn infiltrieren das primärmotorische Areal nicht, sondern verdrängen und komprimieren das umliegende Hirngewebe und erschweren die anatomische Lokalisation (Steinmetz et al. 1990; Sobel et al. 1993).

Einige Arbeitsgruppen konnten zeigen, dass sich motorische Areale mittels fMRT funktionell darstellen lassen, auch wenn eine Verdrängung des umliegenden Hirngewebes stattgefunden hatte (Gallen et al. 1994; Kahn et al. 1996; Pujol et al. 1996 & 1998; Holodny et al. 2000; Roberts et al. 2000; Krings 2001; Moller et al. 2005).

Gerade bei anatomischen Veränderungen, wie z.B. bei Massenverschiebungen, erschwert eine Mitaktivierung der sekundärmotorischen Areale jedoch eine Identifikation des primärmotorischen Areals oder macht sie unmöglich. Zusätzlich ergibt sich das Problem der Lokalisation mittels fMRT, wenn ein Patient nicht mehr in der Lage ist, eine Bewegung durchzuführen, wie z.B. bei einer Hemiparese.

1.4 Pathologie des ZNS und relevante Auswirkungen

Sind Raumforderungen in der Nähe wichtiger funktioneller Hirnregionen lokalisiert, wie z.B. dem primären motorischen Kortex, besteht intraoperativ ein hohes Risiko ein neurologisches Defizit hervorzurufen, wenn dieses funktionelle Areal nicht genau den anatomischen Strukturen zugeordnet werden kann. Insbesondere bei Massenverschiebungen durch raumfordernde Prozesse, aber auch durch Ödembildung fällt die Orientierung an anatomischen „Landmarks“, wie dem Sulcus centralis, schwer und das

primärmotorische Zentrum kann lediglich spekulativ zugeordnet werden. Intraoperative Stimulation zur präzisen Lokalisation ist dabei von großem Nutzen, hat jedoch deutliche Nachteile gegenüber Methoden, die eine genaue präoperative Diagnostik und Planung ermöglichen (Ojemann et al. 1996; Skirboll et al. 1996). Es wurden daher eine Reihe von nichtinvasiven Methoden zur genauen Lokalisation funktioneller Areale entwickelt, wie das MEG (Gallen et al. 1994), das EEG (Buchner et al. 1994), das PET (Leblanc et al. 1992) und andere elektrophysiologische Untersuchungstechniken (Krings et al. 1997). Diese Methoden erlauben gute Aussagen über funktionell wichtige Areale, jedoch ist die Zuordnung zu anatomischen Strukturen, wie sie in der präoperativen Planung nötig wäre, weiterhin schwierig. Noch dazu ist die PET aufgrund der radioaktiv markierten Tracer nicht beliebig oft wiederholbar. Die fMRT eignet sich in besonderer Weise für die präoperative Planung, da nicht invasiv und ohne bekannte Nebenwirkungen ein funktionelles Bild erstellt und direkt mit einem strukturellen Bild korreliert werden kann. Diese Verbindung aus anatomischer und physiologischer Aussage macht die fMRT zu einer idealen Methode zur präoperativen Diagnostik, OP-Planung und Verlaufskontrolle. (Orrison et al. 1992; Bucholz 1993; Sobel 1993; Schulder et al. 1997 & 1998; Lundquist et al. 1997; Gering und Weber 1998; Krings et al. 1998; Roux et al. 1999; Holodny et al. 2000; Suanert & Yousry 2001).

1.5 Eigene Untersuchungsansätze

In der vorliegenden Studie wurden verschiedene Kombinationsmuster motorischer Aufgaben im MRT des Schädels untersucht. Die gesunden, rechtshändigen Probanden führten eine Finger-Daumen-Opposition (finger-tapping) durch. Es wurde der Vergleich aktivierter Voxel in primärmotorischen und sekundärmotorischen Kortexarealen gezogen, nachdem diese als anatomische „Regions of interest“ (ROI) markiert worden waren. Zusätzlich wurden selektive Referenzfunktionen erstellt und statistisch ausgewertet. Zum Vergleich der prozentualen Aktivierung der ROI wurde der Zeitverlauf der aktivierten Voxel während einer sehr raschen Untersuchungsreihe mit Vergleichsfunktionen beobachtet.

Ziel dieser Arbeit war eine Optimierung der Lokalisation des primärmotorischen Kortexareals mittels fMRT. Wie oben dargelegt, lassen sich mit funktionellen MRT-Untersuchungen mittels koordinierter Fingerbewegungen sowohl in der kontra- als auch in der ipsilateral zu einer Bewegung gelegenen Hemisphäre primärmotorische und

sekundärmotorische Areale darstellen. Bei einer zugrunde gelegten Schwelle bei der entweder 1% aktive Voxel (1%-Map) oder 5% aktive Voxel (5%-Map) angezeigt werden, lassen sich vier motorische Zentren einer Hemisphäre zuordnen. Das primärmotorische Areal (SM1) lokalisiert sich dabei regelrecht vor dem Sulcus centralis auf den anatomischen „motor knob“ des Gyrus praecentralis. Von den drei sekundärmotorischen Arealen projiziert sich der posteriore parietale Kortex (PPC) dorsal des Sulcus centralis auf den Gyrus postcentralis. Daher besteht insbesondere zwischen diesen beiden Arealen eine hohe Verwechslungsgefahr. Das prämotorische Areal (PMA) sowie das supplementärmotorische Areal liegen weiter rostral und können daher bei regulären anatomischen Strukturen besser vom SM1 differenziert werden.

Bei einer neurochirurgischen Intervention eines nahe am primärmotorischen Areal gelegenen pathologischen Prozesses besteht intraoperativ ein hohes Risiko, ein neurologisches Defizit, wie z.B. eine Hemiparese hervorzurufen, wenn dieses funktionelle Areal nicht genau den anatomischen Strukturen zugeordnet werden kann.

1.5.1 Problemstellung

Bei den meisten der bislang verwendeten fMRT-Bewegungsparadigmen zeigt sich, dass Fingerbewegungen vorwiegend zu einer Aktivierung der kontralateralen primärmotorischen Areale führen. Wie unter anderem die Arbeitsgruppe Papke et al. 2000 zeigen konnte, eignet sich das Paradigma alternierender Hände „Rechts gegen Links“ (Aktivierungsbedingung Finger-Tapping der rechten Hand gegen die Kontrollbedingung Finger-tapping der linken Hand) am besten, um das primärmotorische Areal SM1 sicher zuordnen und vor allem vom nahegelegenen PPC abgrenzen zu können. Probleme stellen sich dann ein, wenn eine kontralaterale Handbewegung nicht möglich ist, zum Beispiel wenn eine Raumforderung vorliegt, welche bereits zu einer Hemiparese geführt hat. Eine rein anatomische Zuordnung ist häufig genau in diesen Fällen nicht mehr möglich, wenn die anatomischen „landmarks“ durch eine Raumforderung oder ein Ödem verschoben sind.

Es ist gerade bei diesen Patienten besonders wichtig eine funktionelle Zuordnung der gegebenen anatomischen Strukturen durchzuführen, um das primärmotorische Zentrum intraoperativ weitestgehend zu schonen und im besten Fall postoperativ ein Wiedererlangen der Bewegung zu ermöglichen, wenn z.B. das Ödem abschwillt.

1.5.2 Lösungsansatz

Ein möglicher Ausweg findet sich in der bekannten Mitaktivierung der ipsilateral zur Bewegung liegenden motorischen Kortextareale, da diese Hand noch bewegt werden kann. Wie sich bei Papke et al. 2000 zeigte, liegt bei der ipsilateralen Mitaktivierung eine deutlich geringere Aktivierung des SM1 gegenüber den sekundärmotorischen Arealen vor als dies in der kontralateralen Hemisphäre der Fall ist. Daher kann die ipsilaterale Mitaktivierung nicht alleine zur sicheren Zuordnung des SM1 herangezogen werden. Die vorliegende Arbeit sucht aus diesem Grund nach anderen Lösungsansätzen, um ein Bewegungsparadigma mit möglichst genauer Differenzierung der motorischen Zentren zu finden.

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile.

Im ersten Versuchsteil wurden Bewegungsparadigmen mit „Bewegung“ und „Ruhe“ miteinander verglichen und auf ihre statistische Signifikanz getestet. Dabei wurde der Einfluss des Paradigmas betrachtet und der Einfluss eines unterschiedlichen Schwellenwert mit Darstellung von 1% oder 5% der aktiven Voxel untersucht.

Im Weiteren wurde nach Alternativen bei Vorliegen einer Parese mit dem daraus resultierenden Unvermögen der Fingerbewegung gesucht. Dabei wurde während des zweiten Versuchsteiles die „Vorstellung einer Bewegung“ als alternative Kontrollbedingung untersucht, da diese auch bei einer Hemiparese durchführbar ist.

Im letzten Versuchsteil wurde eine Messung mit sehr kurzen Messzeiten und vor allem verkürzten Pausen zwischen den Messungen durchgeführt. In der Auswertung der Daten wurden verschiedene Referenzfunktionen mit den Time courses verglichen, um den Anstieg der aktivierten Voxel aufzuzeigen. Die verschiedenen Referenzfunktionen wurden auf ihre Korrelation mit den einzelnen motorischen Zentren überprüft, um eine für das primärmotorische Areal möglichst spezifische permissive Map zu erstellen. Ausgehend davon, dass sekundär- und primärmotorische Kortextareale eine unterschiedliche Zeit bis zum Aktivierungsbeginn im Kortex und ein verschiedenes Aktivierungsniveau haben, war es das Ziel, mit den verschiedenen experimentell hergestellten Referenzfunktionen auch bei einer überwiegenden Aktivierung der sekundärmotorischen Zentren sicher das ipsilateral zur Bewegung gelegene primärmotorische Zentrum auffinden zu können (permissive Map).

2 Material und Methoden

2.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Den drei im folgenden beschriebenen Versuchen lag grundsätzlich der gleiche technische Versuchsablauf zugrunde, je nach Fragestellung variierten einzelne Untersuchungsanteile. Daher folgt zunächst eine allgemeine Beschreibung des Ablaufes, die jeweiligen Veränderungen werden dann in den Unterpunkten aufgeführt.

Nach Erfassung der Probandendaten und der Aufklärung über das MRT und die vorgesehenen Untersuchungsparadigmen erfolgte die Lagerung des Kopfes in der Spule mit den dafür vorgesehenen Haltekissen. Der Proband wurde mit dem Kopf voran in den Tomographen geschoben, nach dem Schließen der Tür fertigte das Gerät den Übersichtsscout automatisch an. Es folgten die Anfertigungen des sagittalen Scouts zur Lokalisation, das Positionieren der Schichtebene sowie das Erstellen der anatomischen T1-gewichteten Bilder zur späteren Korrelation mit den erhobenen funktionellen Daten. Anschließend wurden die eigentlichen funktionellen Messungen durchgeführt. Dabei wurde der Proband nach dem Aufrufen des Programmes über den Messbeginn und das durchzuführende Bewegungsparadigma informiert und daran erinnert, Kopfbewegungen und Bewegungen der Arme möglichst zu vermeiden. Ein Mitzählen der Messungen sollte vermieden werden, es erfolgte vor dem Start einer Bewegung die kurze erneute Ansage z.B. „Rechts“, „Links“ oder „Ruhe“ etc. Nach 10 Messungen wurde die Bewegung durch die Ansage „Stop“ unterbrochen, eine Kontrolle war optisch durch das Konsolenfenster möglich. Für jeden neuen Durchlauf mit einem Bewegungsparadigma wiederholte sich der Vorgang. Am Ende der Untersuchungen wurde der Proband aus dem MRT gefahren, die Schichtennummern und Besonderheiten wurden im Protokoll vermerkt. Anschließend konnten die Daten gespeichert, weiterverarbeitet und ausgewertet werden.

2.1.1 Technische Bedingungen

Sämtliche Untersuchungen wurden an einem MR-Tomografen mit einer Feldstärke von 1,5 Tesla (Siemens Magnetom Vision) mit einer speziellen Gradientenspule für schnelle Bildgebung durchgeführt. Der Kopf wurde in einer zirkulär polarisierten Kopf- und Oberflächenspule mit spezieller Vorrichtung zur Fixierung des Kopfes gelagert.

Es wurde eine blood oxygen level dependent (BOLD) sensitive multi-slice EPI Sequenz benutzt (10 Schichten, 3 mm Dicke, FOV 210 mm, Matrix 128 x 128). Während der repetitiven Akquisition von EPI-Bildern wurden zyklisch alternierende Phasen von Bewegung und Ruhe durchgeführt. Zusätzlich zu den funktionellen Datensätzen mit niedriger Auflösung wurden zur anatomischen Korrelation T1-gewichtete Bilder mit höherer Auflösung erstellt.

Bereits während der Datenerhebung wurden die ersten Schritte der Datenverarbeitung automatisiert durchgeführt. Nach der Bewegungskorrektur wurden die Daten auf eine externe Arbeitsstation übertragen (Sun-Sparc-Workstation) und hier weiterverarbeitet. Gleichzeitig erfolgte die Speicherung der Quellbilder auf MOD.

2.1.2 Probanden

Funktionelle MRT-Untersuchungen wurden an 24 gesunden, rechtshändigen Probanden durchgeführt, die unentgeltlich an der Studie teilnahmen. Es handelte sich um 10 weibliche und 14 männliche Freiwillige im Alter von 24 bis 38 Jahren. Bei 12 Probanden (4 Frauen und 8 Männern) wurde zusätzlich zu den rein motorischen Vergleichsparadigmen die Vorstellung einer Bewegung untersucht, bei 9 der Probanden wurde zusätzlich eine Short-TR durchgeführt.

2.1.3 Aufklärung

Alle Untersuchungen wurden nach einer regulären Aufklärung über die Untersuchungsmethode und deren Dauer sowie nach einer Erläuterung der Bewegungsparadigmen durchgeführt. Die Reihenfolge der Abläufe wurde variiert, um Lernvorgängen und ggf. systematischen Beeinflussungen vorzubeugen.

Die bekannten Risiken und Ausschlusskriterien einer MRT-Untersuchung wurden wie im klinischen Routinebetrieb gehandhabt. Probanden wurden wie unter klinischen Routinebedingungen aufgeklärt, Kontraindikationen wie Schrittmacher oder Metallimplantate wurden gezielt erfragt. Zusätzlich wurde auf den experimentellen Charakter der Untersuchung hingewiesen. Das Einverständnis zu der Teilnahme an der Studie wurde nach Klärung aller offenen Fragen schriftlich fixiert. Es wurde zusätzlich darauf hingewiesen, dass die erhobenen Bilder nicht diagnostisch ausgewertet wurden, und daher eine evtl. vorliegende Erkrankung nicht sicher erkannt wurde. Während der

Untersuchung konnten die zu untersuchenden Personen durch Drücken eines pneumatischen Balles die Unterbrechung bzw. den Abbruch der Untersuchung herbeiführen.

2.1.4 Verwendete Paradigmen

Bei dem durchgeführten Bewegungsparadigma bestand die Aktivitätsbedingung aus einer festgelegten motorischen Aufgabe, der Bewegung der Finger einer Hand. Als Kontrollbedingung wurden entweder ebenfalls eine motorische Aufgabe, eine Ruhephase oder die Vorstellung einer definierten Fingerbewegung verwendet.

Während der fMRT-Untersuchung bewegten die Probanden ihre Hände nach einem festgelegten Schema, das ihnen vorher erklärt wurde. Die Finger sollten so schnell wie möglich in der Reihenfolge 2 – 3 – 4 – 5 – 4 – 3 – 2 – fortlaufend an den Daumen tippen, ohne dass dabei die Hand, der Arm oder der Kopf mitbewegt werden sollte. Die ersten fünf Messungen erfolgten unter Ruhebedingungen, dann erfolgte das Startsignal zur Bewegung durch das Mikrophon. In der kurzen Pause zwischen 15. und 16. Messung kam die Anweisung für die nächsten zehn Messungen, d.h. die folgende Bewegung oder das Ruhe-Signal. Es folgten zwei bis vier weitere Zyklen aus je zehn Messungen mit der ersten Aktivitätsbewegung abwechselnd mit der Kontrollbedingung. Die letzten fünf Messungen wurden wieder ohne Bewegung durchgeführt.

Es ergaben sich sechs Paradigmen mit verschiedenen Möglichkeiten, die Fingerbewegungen einer Hand mit der anderen Seite zu koordinieren, die Zyklen wurden je drei mal wiederholt:

Tabelle 1: Darstellung des Ablaufes der 6 verwendeten Paradigmen mit den jeweiligen Aktivierungszuständen.

| Messung | 0-5 | | 6-15 | | 16-25 | | 26-35 | | 36-45 | | 46-55 | | 56-65 | | 66-70 | |
|-------------------|-------|-----|--------|-----|----------|-----|--------|------|----------|------|---------|------|----------|------|---------|--|
| Zeit (Sek) | 0-15 | | 16-45 | | 46-75 | | 76-105 | | 106-135 | | 136-165 | | 166-195 | | 196-210 | |
| 1. Parad. | Ruhe | | Rechts | | Ruhe | | Rechts | | Ruhe | | Rechts | | Ruhe | | Ruhe | |
| 2. Parad. | Ruhe | | Links | | Ruhe | | Links | | Ruhe | | Links | | Ruhe | | Ruhe | |
| 3. Parad. | Ruhe | | Rechts | | Links | | Rechts | | Links | | Rechts | | Links | | Ruhe | |
| 4. Parad. | Ruhe | | Rechts | | V Links | | Rechts | | V Links | | Rechts | | V Links | | Ruhe | |
| 5. Parad. | Ruhe | | Links | | V Rechts | | Links | | V Rechts | | Links | | V Rechts | | Ruhe | |
| 6. Parad. | Ruhe | Re | Ruhe | Li | Ruhe | Re | Ruhe | Li | Ruhe | Re | Ruhe | Li | Ruhe | Re | Ruhe | |
| Messung | 0-5 | -15 | -25 | -35 | -45 | -55 | -65 | -75 | -85 | -95 | -105 | -115 | -125 | -130 | | |
| Zeit (Sek) | 0-7,5 | -23 | -38 | -53 | -68 | -84 | -99 | -114 | -129 | -144 | -160 | -175 | -190 | -198 | | |

1. Paradigma: „Rechts gegen Ruhe“ (ReRu):

Bewegung der rechten Hand abwechselnd mit Ruhestellung beider Hände.

2. Paradigma: „Links gegen Ruhe“ (LiRu):

Bewegung der linken Hand abwechselnd mit Ruhestellung beider Hände.

3. Paradigma: „Rechts gegen Links“ (ReLi):

Abwechselnde Bewegung der rechten und linken Hand.

4. Paradigma: „Rechts gegen Vorstellung Links“ (ReVLi):

Bewegung der rechten Hand abwechselnd mit Vorstellung der Bewegung der linken Hand.

5. Paradigma: „Links gegen Vorstellung Rechts“ (LiVRe):

Bewegung der linken Hand abwechselnd mit Vorstellung der Bewegung der rechten Hand.

6. Paradigma: „Kurze Time repeats“ (Short-TR):

Bewegung der rechten Hand, Ruhigstellung beider Hände, Bewegung der linken Hand, Ruhigstellung beider Hände, etc.

2.1.5 Kartierung mit Regions of Interest

Die Regions of Interest (ROIs) wurden an den oben beschriebenen anatomischen „Landmarks“ orientiert eingezeichnet, unterstützt von den dargestellten aktiven Voxeln. Zunächst wurde eine ROI um die einzelne Hemisphäre erstellt, damit die prozentuale Aktivierung von 1% bzw. 5% der aktiven Voxel zum interindividuellen Vergleich erfolgen konnte. Es wurde eine individuelle Schwelle ermittelt, bei der 1% bzw. 5% der aktiven Voxel sichtbar waren. Anschließend wurden die motorischen ROIs erstellt, dabei lag der Schwerpunkt auf den 4 motorischen Arealen: SM1 als primärmotorisches Areal auf dem Gyrus praecentralis, PPC auf dem Gyrus postcentralis, PMA rostral vor dem SM1 und SMA medial vorne.

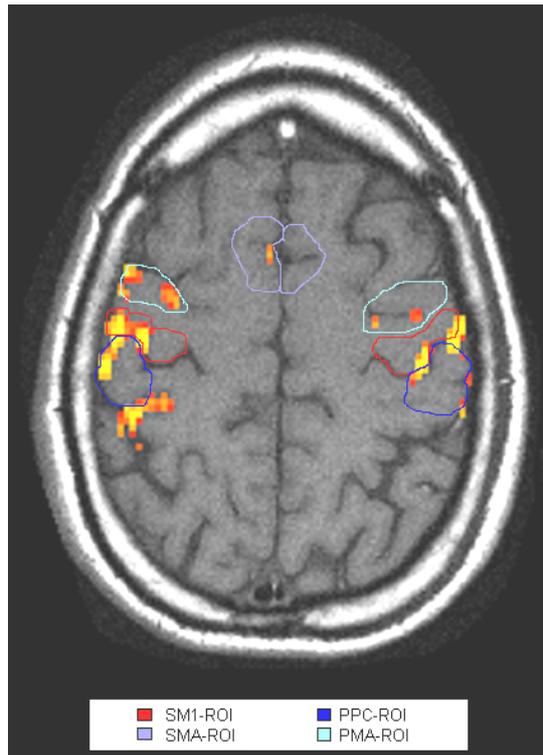


Abbildung 9:
Eingezeichnete ROIs
„Regions of Interest“
der einzelnen
motorischen Areale.

2.1.6 Datennachbearbeitung & Map-Erstellung

Zur Elimination von Rauschen mit hohen Ortsfrequenzen (einzelne falsch positive Voxel) wurde ein Cluster-Filter zur Glättung eingesetzt, bei dem ein Voxel als aktiviert angesehen wurde, wenn mindestens 2 benachbarte Voxel ebenfalls aktiv erschienen .

Anschließend erfolgte die Datenübertragung auf eine SUN SPARC Ultra Arbeitsstation sowie eine Datensicherung der Quellbilder auf MOD. Es erfolgte die weitere Bearbeitung mit dem Software-Package STIMULATE 5.0 (Strupp 1996).

Zur Reduzierung von Bewegungsartefakten wurde der Kopf fest in der Spule fixiert. Zur Verminderung bereits aufgetretener Artefakte wurden über Koregistrationsalgorithmen translatorische und rotatorische Bewegungen des Kopfes erfasst, so konnte eine Abweichung der Achse festgestellt werden und die Daten entweder von den Artefakten bereinigt oder von der Auswertung ausgeschlossen werden. In diesem Versuch wurde eine Massenschwerpunktanalyse (COM =center of mass) durchgeführt. Hierbei wurde die mögliche Veränderung in x-, y- und z-Achse im Zeitverlauf analysiert und als Zeitachse dargestellt (cine mode). Eine Untersuchung wurde ausgeschlossen, wenn die COM-Analyse Bewegungsartefakte über 0.5 Voxel-Dimensionen überschritt.

Bei jeder einzelnen Person findet sich eine unterschiedliche Anzahl aktivierter Voxel, welche interindividuell relativ stark voneinander abweichen kann. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die prozentuale Verteilung von aktivierten Voxeln in den verschiedenen ROI intraindividuell vergleichbar ist. Daher muss zunächst eine intraindividuelle Normierung durchgeführt werden, um die aktiven Voxel miteinander vergleichen zu können. Es wird eine individuelle Schwelle herausgefunden und eingestellt, bei der 1% bzw. 5% der aktiven Voxel angezeigt werden. Die so erstellten 1%-Maps bzw. 5%-Maps können nun auch zwischen einzelnen Personen verglichen werden. Im Folgenden werden diese 1%- bzw. 5%-Maps als Grundlage zum intraindividuellen Vergleich genommen.

2.1.7 Datenauswertung & statistische Verfahren

Um Daten auswerten zu können, bei denen eine Differenz aus Ruhe- und Aktivitätsparadigmen verglichen werden sollen, kommen bei der Annahme normalverteilter Daten der Student-T-Test oder bei abhängigen Datenreihen, wie in dieser Untersuchung, der Wilcoxon-Test in Frage. Die Daten wurden z.T. als prozentualer Anteil der aktiven Voxel in den ROIs statistisch mit dem Wilcoxon-Test miteinander verglichen (Versuchsteil 1 und 2). Im 3. Versuchsteil wurde zunächst der Intensitäts-Zeit-Verlauf in den Voxeln der aktivierten Bildmatrix von einer geeigneten Referenzfunktion subtrahiert, anschließend wurden die Abweichungssummen gebildet. Das Absolutmaß dieser Abweichungssummen wurde dann mit dem Wilcoxon-Test auf eine statistisch signifikante Differenz getestet (Bandettini et al. 1993; Friston et al. 1994; Turner et al. 1998).

2.2 Detaillierter Versuchsaufbau

2.2.1 Paradigmen mit „Bewegung“ und „Ruhe“ als Kontrollbedingung (1%- & 5%-Map)

Während des ersten Versuchsteiles wurde ein Blockparadigma mit „Bewegung“ als Aktivierungsbedingung und entweder ebenfalls „Bewegung“ oder „Ruhe“ als Kontrollbedingung verwendet. Dabei fand sich nach der Untersuchung der ersten 12 Probanden unter zu Grunde liegender 1%-Map eine Verteilung der Voxel zu Gunsten des SM1, so dass bei 12 weiteren Probanden die gleichen Blockparadigmen durchgeführt wurden und mit einer 5%-Map nachbearbeitet wurden, da hier in den sekundärmotorischen

Arealen mehr aktive Voxel sichtbar waren. Das Vorgehen beider Versuchsreihen lief nach den oben beschriebenen Arbeitsschritten ab. Die in den ROIs ausgezählten Voxel wurden erfasst und ihr prozentualer Anteil errechnet, wobei sortiert wurde nach ipsilateraler und kontralateraler Hemisphäre zu der Bewegung, die die Aktivierungsbedingung darstellte. Die Daten wurden in Tabellen erfasst, graphisch dargestellt und mit dem Wilcoxon-Test statistisch auf einen signifikanten Unterschied ausgewertet.

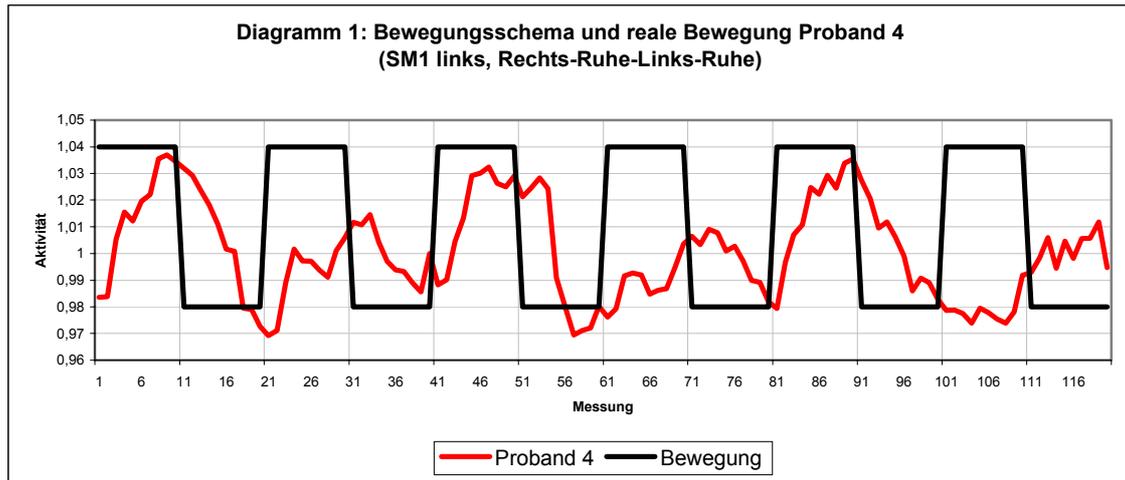
2.2.2 Paradigmen mit „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung (5%-Map)

Bei 12 der Probanden, die den ersten Versuchsteil durchliefen, wurde als Kontrollbedingung die „Vorstellung einer Bewegung“ eingesetzt. Dabei wurde die Aktivitätsbedingung wie im ersten Versuchsteil belassen. Die „Vorstellung der Bewegung“ sollte eine möglichst plastische und chronologische Vorstellung der oben beschriebenen Fingerbewegungen sein. Die weitere Nachbearbeitung und Auswertung erfolgte wie im ersten Versuchsteil.

2.2.3 Short-TR: Time courses mit verkürzter Periodenzeit (5%-Map)

In der dritten Versuchsreihe wurden bei 9 Probanden Serien mit verkürzter Periodenzeit durchgeführt. Dabei betrug die Messzeit 1,02 Sekunden pro Messung, gefolgt von einer Pause von 0,5 Sekunden, dies entspricht einer Dauer von 1,52 Sekunden pro Periodenmesspunkt. Die ersten und letzten 5 Messzeitpunkte waren unter Ruhebedingungen und dienten dem „Eichen“ auf eine 0-Linie. Die übrigen 120 Messungen ergaben 3 Zyklen von je 10 Messungen „Rechts“, 10 Messungen „Ruhe“, 10 Messungen „Links“ und 10 Messungen „Ruhe“ (6. Paradigma).

Nach der Messung erfolgte die primäre Bearbeitung der Daten wie oben beschrieben, es wurde eine 5%-Map zu Grunde gelegt. Es ergaben sich für jeden Probanden und jede ROI eine Zahlenreihe mit 120 Messzeitpunkten mit dem für jeden Probanden individuellen Aktivierungsgrad.



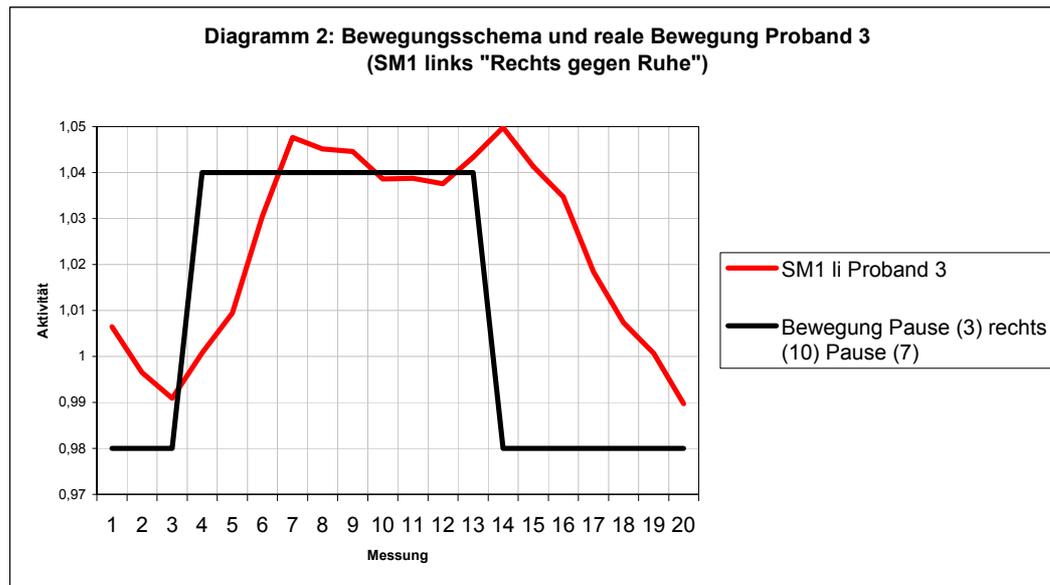
In der Nachbearbeitung erfolgte zunächst eine Normierung der Daten auf Werte um 1, um die individuellen Time courses zwischen den einzelnen Probanden vergleichen zu können. Dabei wurden die Mittelwerte der Pausenzeiten 4-7 gebildet, da in diesen keine Restaktivität, wie z.B. noch abfallende Aktivierungen der Voxel am Ende der Bewegung zu erwarten war. Jeder einzelne Zeitwert wurde durch den für den Probanden individuellen Mittelwert dividiert. So entstand eine Zeitreihe mit auf „1“ normierter Aktivität. Im Anschluss erfolgte eine Addition der Zahlenreihen nach folgendem Schema:

Tabelle 2: Short-TR Mittelwerte als Zeitreihe

| Messzeitpunkt | 1-3 | 4-13 | 14-20 |
|---------------|--------------|----------------|--------------|
| Short-TR | Pausen 8 -10 | Rechts / Links | Pausen 1 - 7 |

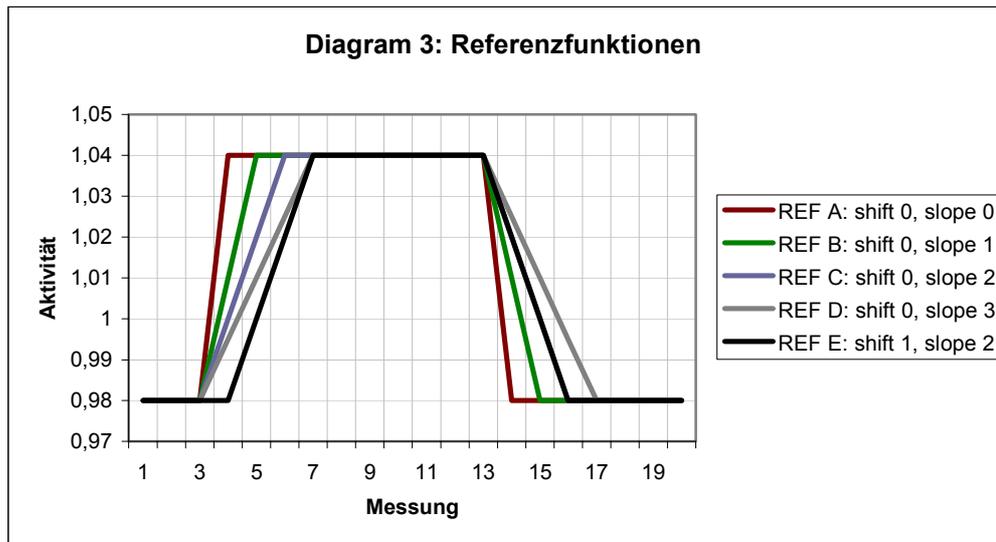
1. bis 3. Messwert: Pausen 8, 9 und 10 vor der entsprechenden Bewegung,
4. bis 13. Messwert: Bewegung (Rechts oder Links),
14. bis 20. Messwert: Pausen 1 bis 7 nach der entsprechenden Bewegung.

Diese gemittelte Zeitreihe mit nun 20 Messzeitpunkten konnte so auf den Anstieg und Verlauf der Kurve mit den Referenzfunktionen verglichen werden.



Insgesamt lag eine solche Zeitreihe für jede der acht möglichen ROIs eines jeden Probanden für die Paradigmen „Rechts gegen Ruhe“ und „Links gegen Ruhe“ vor. Da die normierten Kurven nun miteinander verglichen werden konnten, wurden die Mittelwerte der Kurven erstellt und optisch als Graphiken dargestellt.

Als nächster Schritt konnten anhand der optischen Graphiken Referenzfunktionen (REF) zum Vergleich erstellt werden. Die Referenzfunktionen variierten zum einen im Beginn des Anstieges (Shift), dabei begann der Anstieg bei den Referenzfunktionen A, B, C und D zum Zeitpunkt des Bewegungsbeginnes (Shift = 0). Zudem variierten sie bezüglich des Anstiegswinkels, welcher sich in der Zeit darstellt, in der das Referenzparadigma seine volle Höhe erreicht hat (Slope). Dabei war REF A ein Blockparadigma ohne einen verzögerten Anstieg, REF B wies einen Slope von +1 auf, REF C und E zeigten einen Slope von +2 und REF D von +3 Messzeitpunkten.



Diese zu testenden Referenzfunktionen wurden Punkt für Punkt von den Zeitreihen der jeweiligen ROI subtrahiert, vom Ergebnis jedes Punktes wurde der Absolutwert genommen und die gesamten Werte wurden summiert. Diese Abweichsumme gilt als Maß dafür, wie stark der tatsächliche Time course von der Referenzfunktion abweicht. Niedrige Werte zeigen eine hohe Übereinstimmung, hohe Werte ein größeres Abweichen an. Es ergab sich ein Wert für jede Referenzfunktion zu jeder ROI von jedem Probanden.

Im letzten Schritt der statistischen Auswertung wurde mittels des Wilcoxon-Testes getestet, für welche Referenzfunktion die Abweichung des SM1-Time courses von der REF signifikant kleiner ist als die Abweichung der ROIs der sekundären Areale von der zu testenden REF.

3 Ergebnisse

3.1 Paradigmen mit „Bewegung“ und „Ruhe“ als Kontrollbedingung (1%- & 5%-Map)

Im folgenden Ergebnisteil wird die prozentuale Verteilung der aktivierten Voxel auf die 4 verschiedenen motorischen Areale einer Hemisphäre dargestellt. 100% entspricht dabei der Anzahl aller in den 4 motorischen Arealen einer Hemisphäre als aktiviert angesehenen Voxel in der 1%-Map bzw. der 5%-Map. Die tabellarische Auszählung und die prozentuale Berechnung der einzelnen Probanden findet sich im Anhang, die im folgenden aufgeführten Werte sind über die Probanden gemittelt.

3.1.1 „Bewegung gegen Ruhe“ (1%- & 5%-Map)

3.1.1.1 „Rechts gegen Ruhe“ (1%-Map)

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Ruhe“ in der zur Bewegung ipsilateral gelegenen rechten Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 38,2%. Die restlichen 61,8% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 13,2%, das PPC mit 30,0% und das PMA mit 4,2%.

In der zur Bewegung kontralateralen linken Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 50,6%. Die restlichen 49,4% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 9,5%, das PPC mit 25,2% und das PMA mit 14,7%.

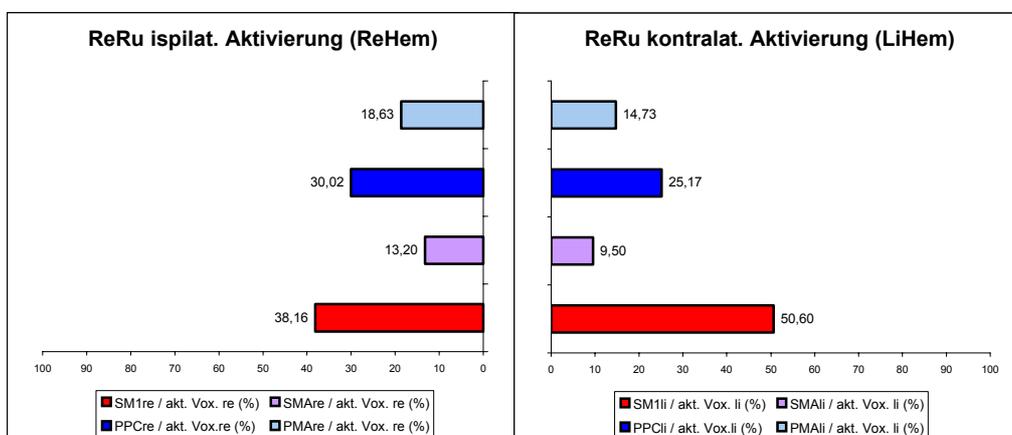


Diagramm 4 & 5: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Ruhe“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

3.1.1.2 „Links gegen Ruhe“ (1%-Map)

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Links gegen Ruhe“ in der zur Bewegung ipsilateral gelegenen linken Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 20,2%. Die restlichen 79,8% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 36,5%, das PPC mit 22,8% und das PMA mit 20,6%.

In der zur Bewegung kontralateralen rechten Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 54,6%. Die restlichen 45,4% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 5,7%, das PPC mit 24,4% und das PMA mit 15,4%.

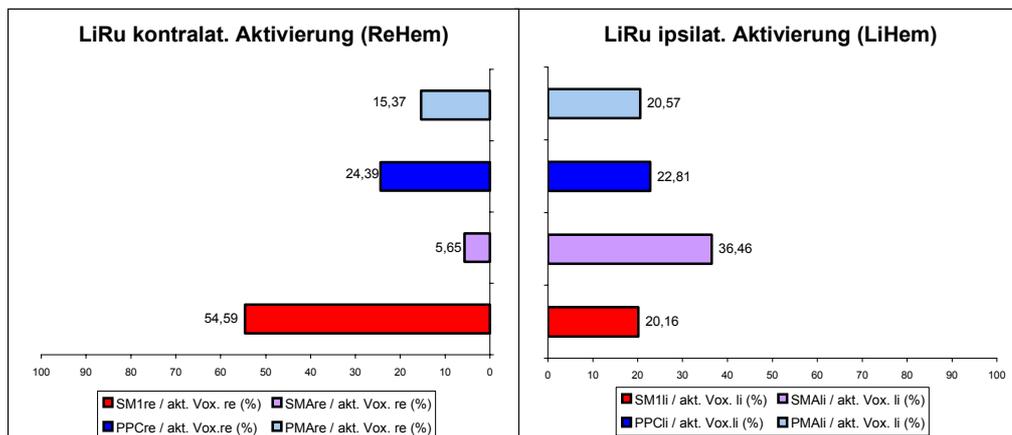


Diagramm 6 & 7: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Links gegen Ruhe“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

3.1.1.3 Zusammenfassung „Bewegung gegen Ruhe“ (1%-Map)

Es besteht keine statistisch signifikante Differenz zwischen den jeweilig als ipsilateral bzw. kontralateral anzusehenden Hemisphären bezüglich der Bewegungsparadigmen „Rechts gegen Ruhe“ und „Links gegen Ruhe“, getestet mit dem Wilcoxon-Test.

Daher können die beiden Bewegungsparadigmen gemittelt werden und als Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ gemeinsam betrachtet werden.

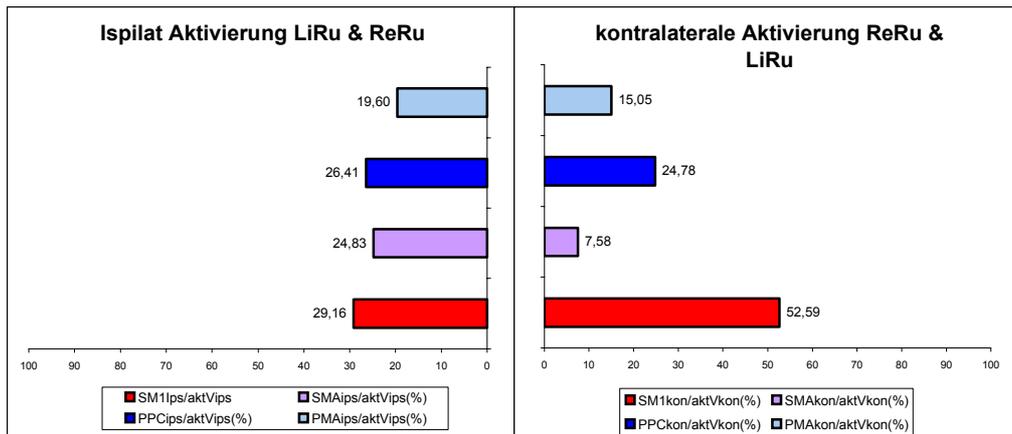


Diagramm 8 & 9: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

Zusammenfassend ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ aus den gemittelten Paradigmen „Rechts gegen Ruhe“ und „Links gegen Ruhe“ in den zur Bewegung ipsilateral gelegenen Hemisphären eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 29,2%. Die restlichen 70,8% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 24,8%, das PPC mit 26,4% und das PMA mit 12,4%.

In den zur Bewegung kontralateralen Hemisphären zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 52,6%. Die restlichen 47,4% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 7,6%, das PPC mit 24,8% und das PMA mit 15,1%.

Das SM1 weist zwischen kontralateraler und ipsilateraler Hemisphäre im Wilcoxon-Test im Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ eine statistisch signifikante Differenz von $p \leq 0,0009$ auf. Der Quotient aus SM1 zu PPC beider Hemisphären zeigt im selben Testverfahren jedoch keine statistisch signifikante Differenz ($p \leq 0,02$).

3.1.1.4 „Rechts gegen Ruhe“ (5%-Map)

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Ruhe“ in der zur Bewegung ipsilateral gelegenen rechten Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 28,3%. Die restlichen 71,7% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 16,3%, das PPC mit 25% und das PMA mit 30,7%.

In der zur Bewegung kontralateralen linken Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 36,6%. Die restlichen 63,4% der aktivierten

sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 11,3%, das PPC mit 30,9% und das PMA mit 21,2%.

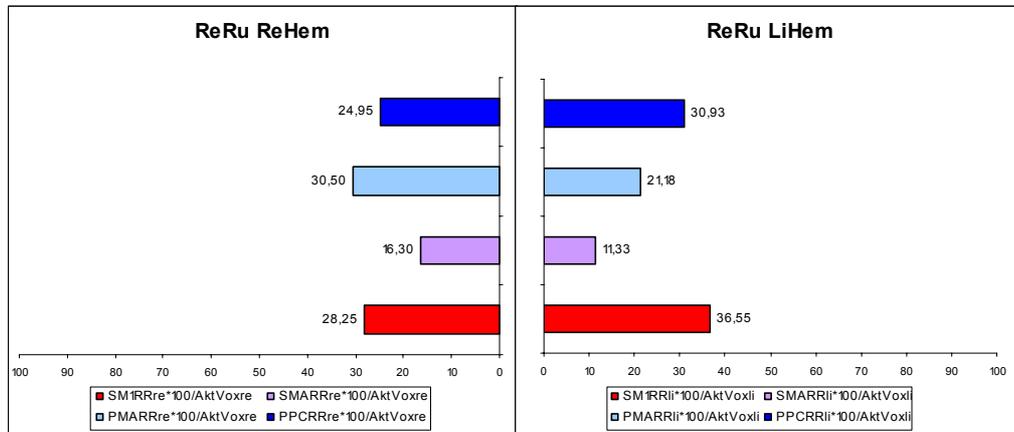


Diagramm 10 & 11: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Ruhe“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

3.1.1.5 „Links gegen Ruhe“ (5%-Map)

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Links gegen Ruhe“ in der zur Bewegung ipsilateral gelegenen linken Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 25,2%. Die restlichen 74,8% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 19,8%, das PPC mit 24% und das PMA mit 31%.

In der zur Bewegung kontralateralen rechten Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 40,4%. Die restlichen 59,6% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 8,9%, das PPC mit 27% und das PMA mit 23,7%.

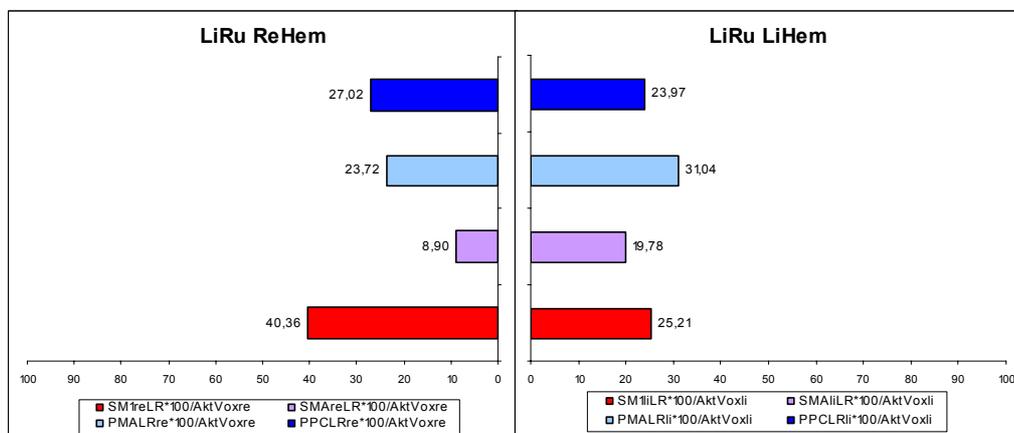


Diagramm 12 & 13: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Links gegen Ruhe“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

3.1.1.6 Zusammenfassung „Bewegung gegen Ruhe“ (5%-Map)

Es besteht keine statistisch signifikante Differenz zwischen den jeweilig als ipsilateral bzw. kontralateral anzusehenden Hemisphären bezüglich der Bewegungsparadigmen „Rechts gegen Ruhe“ und „Links gegen Ruhe“ getestet mit dem Wilcoxon-Test.

Daher können die beiden Bewegungsparadigmen gemittelt werden und als Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ gemeinsam betrachtet werden.

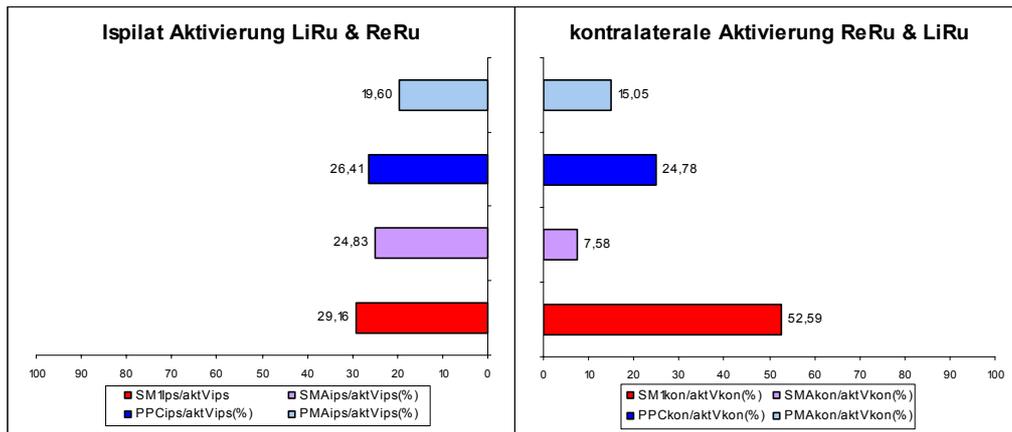


Diagramm 14 & 15: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

Zusammenfassend ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ aus den gemittelten Paradigmen „Rechts gegen Ruhe“ und „Links gegen Ruhe“ in den zur Bewegung ipsilateral gelegenen Hemisphären eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 26,7%. Die restlichen 73,3% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 18%, das PPC mit 24,5% und das PMA mit 30,8%.

In den zur Bewegung kontralateralen Hemisphären zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 38,5%. Die restlichen 61,5% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 10,1%, das PPC mit 29% und das PMA mit 22,4%.

3.1.2 „Rechts gegen Links“ (1%- & 5%-Map)

3.1.2.1 „Rechts gegen Links“ (1%-Map)

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ in der rechten Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 64,2%. Die restlichen 35,8% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 1,5%, das PPC mit 20,6% und das PMA mit 13,8%.

In der linken Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 64,7%. Die restlichen 35,3% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 3,7%, das PPC mit 21,6% und das PMA mit 9,9%.

Es fand sich keine statistisch signifikante Differenz in der Verteilung beider Hemisphären im Wilcoxon-Test.

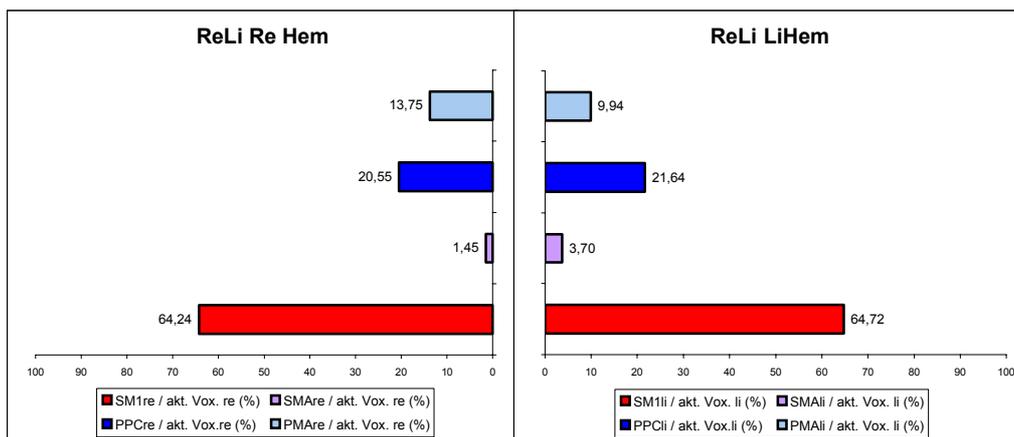


Diagramm 16 & 17: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ kontralateral zur Bewegung.

Zusammengefasst ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ in beiden Hemisphären eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 64,5%. Die restlichen 35,5% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 2,6%, das PPC mit 21,1% und das PMA mit 11,9%.

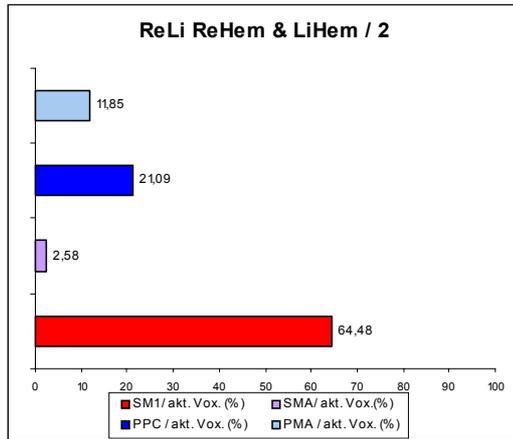


Diagramm 18: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Ruhe“ (beide Seiten zusammengefasst).

3.1.2.2 „Rechts gegen Links“ (5%-Map)

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ in der rechten Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 43,3%. Die restlichen 56,7% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 8,3%, das PPC mit 30,3% und das PMA mit 18,2%.

In der linken Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 42,5%. Die restlichen 57,5% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 7,7%, das PPC mit 30,4% und das PMA mit 19,4%.

Es fand sich keine statistisch signifikante Differenz in der Verteilung der Voxel in beiden Hemisphären, getestet mit dem Wilcoxon-Test.

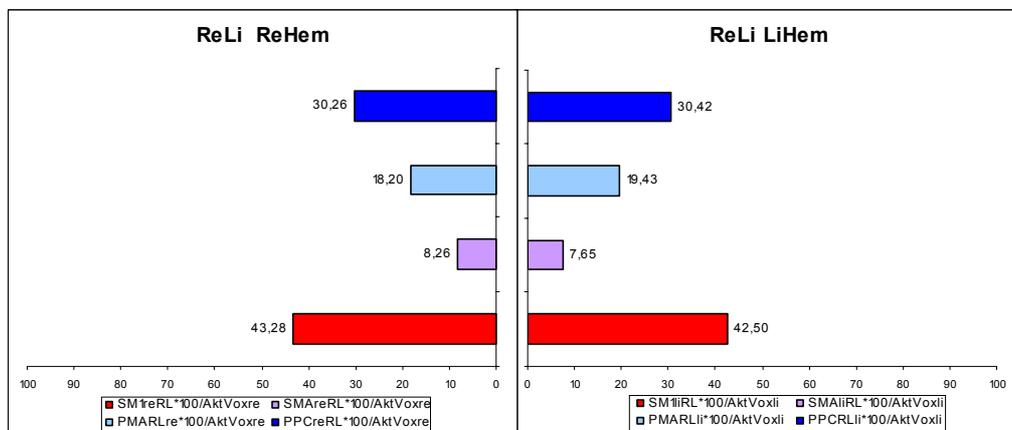


Diagramm 19 & 20: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ kontralateral zur Bewegung.

Zusammenfassend ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ in beiden Hemisphären eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 42,9%. Die restlichen 57,1% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 8,0%, das PPC mit 30,3% und das PMA mit 18,8%.

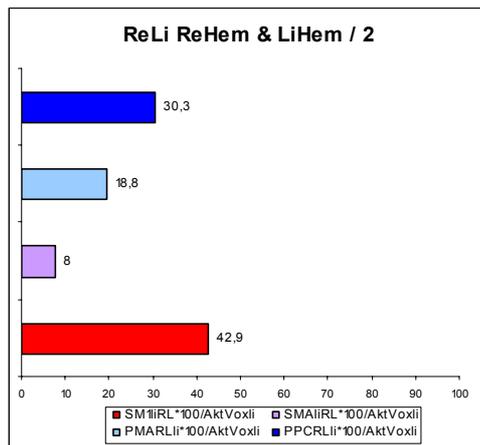


Diagramm 21: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Ruhe“ (beide Seiten zusammengefasst).

3.1.3 Einfluss der Paradigmenwahl auf die Lokalisierung von SM1

In der 1%-Map, d.h. bei 1% aktiver Voxel zeigte sich eine überwiegende Aktivierung des SM1 kontralateral zu der durchgeführten Bewegung. So fand sich im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ („ReLi“) das SM1 mit 64,5% aktiviert, die restlichen 35,5% verteilten sich auf das PPC (21,1 %), das SMA (2,6%) und das PMA (11,9%). Im Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ („ReRu“ und „LiRu“) zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied in den beiden Hemisphären bei den ausschließlich rechtshändigen Probanden. Das kontralaterale SM1 stellte ebenfalls den Hauptteil der aktivierten Voxel dar. Hier fanden sich 52,6% der aktiven Voxel, die restlichen 47,4% verteilten sich auf das PPC (24,8%), das SMA (7,6%) und das PMA (15,1%). Das ipsilateral zur Bewegung gelegene SM1 wies eine Aktivierung von 29,2% auf, die weiteren 70,8% verteilten sich mit beinahe gleichem Anteil auf das direkt benachbarte PPC (26,4%), auf das SMA (24,8%) und auf das PMA (12,4%). Statistisch liegt damit ein signifikanter Unterschied zwischen kontralateralem und ipsilateralem SM1 vor ($p < 0,00055$), getestet mit

dem Wilcoxon-Test. In der statistischen Auswertung des Quotienten aus SM1 zu PPC kontra- und ipsilateral fand sich keine statistisch signifikante Differenz ($p < 0,0205$). Auffällig war, dass bei einigen Probanden in einzelnen ROIs, aufgrund der sehr geringen Darstellung von nur 1% aller aktiven Voxel, wiederholt nur eine sehr geringe Voxelanzahl vorlag.

3.1.4 Einfluss der Map auf die Lokalisierung von SM1

Bei der statistischen Auswertung des Vergleiches von den Ergebnissen der 1%-Map zu denen der 5%-Map fanden sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 3: Statistischer Vergleich von SM1 mit dem PPC in der 1%- & 5%-Map

| Wilcoxon-Test : | | |
|---|------------------------|-------------------------|
| Vergleich SM1 und SM1/PPC (1%-Map versus 5%-Map) | | |
| | SM1 | Quotient SM1/PPC |
| ReLi (kon) 1% vs 5% | p <=0.005584 | p <=0.0007316 |
| Bewe/Ruhe (kon) 1% vs 5% | p <=0.004265 | p <=0.01937 |
| Bewe/Ruhe (ips) 1% vs 5% | p <=0.4025 | p <=0.795 |

Der Vergleich von SM1 und dem Quotienten aus SM1/PPC im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ zeigte eine statistisch signifikante Differenz zwischen 1%-Map und 5%-Map (SM1 $p <=0,006$; SM1/PPC $p <=0,0007$).

Im Vergleich der kontralateralen Hemisphären zwischen 1%-Map und 5%-Map bezüglich des Paradigmas „Bewegung gegen Ruhe“ zeigte sich eine statistische Signifikanz des SM1 ($p <=0,004$), der Quotient aus SM1/PPC wies keine statistisch signifikante Differenz auf ($p <=0,02$).

Die ipsilateralen Hemisphären des Bewegungsparadigmas „Bewegung gegen Ruhe“ zeigten weder bezüglich des SM1 noch bezüglich des Quotienten aus SM1/PPC eine statistisch signifikante Differenz (SM1 $p <=0,4$; SM1/PPC $p <=0,8$).

3.2 Paradigmen mit „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung (5%-Map)

3.2.1 „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ (5%-Map)

3.2.1.1 „Rechts gegen Vorstellung Links“

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Vorstellung Links“ in der zur realen Bewegung ipsilateral gelegenen rechten Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 27,3%. Die restlichen 72,7% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 9,1%, das PPC mit 29,7% und das PMA mit 33,9%.

In der zur realen Bewegung kontralateralen linken Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 37,8%. Die restlichen 62,2% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 8,6%, das PPC mit 32,7% und das PMA mit 20,9%.

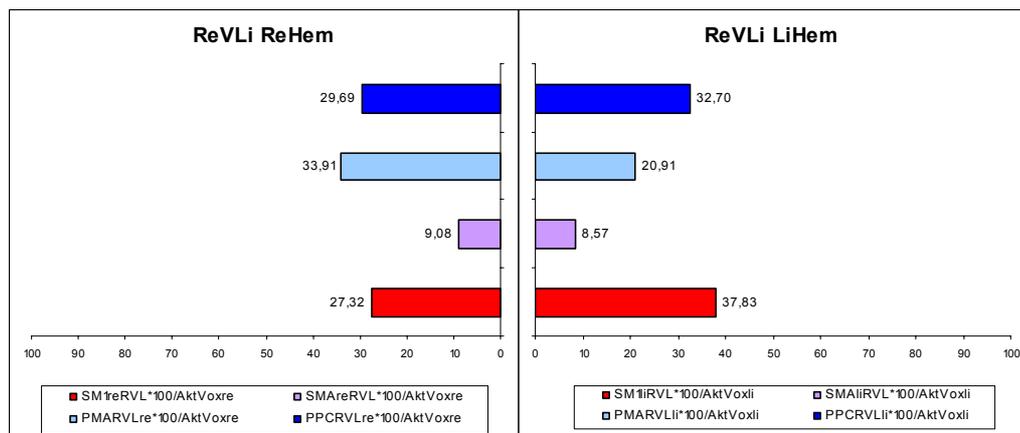


Diagramm 22 & 23: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Vorstellung Links“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

3.2.1.2 „Links gegen Vorstellung Rechts“

Es ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Links gegen Vorstellung Rechts“ in der zur realen Bewegung ipsilateral gelegenen linken Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 23,3%. Die restlichen 76,7% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 12,4%, das PPC mit 31,1% und das PMA mit 33,2%.

In der zur realen Bewegung kontralateralen rechten Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 41,8%. Die restlichen 58,2% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 6,8%, das PPC mit 30,6% und das PMA mit 20,8%.

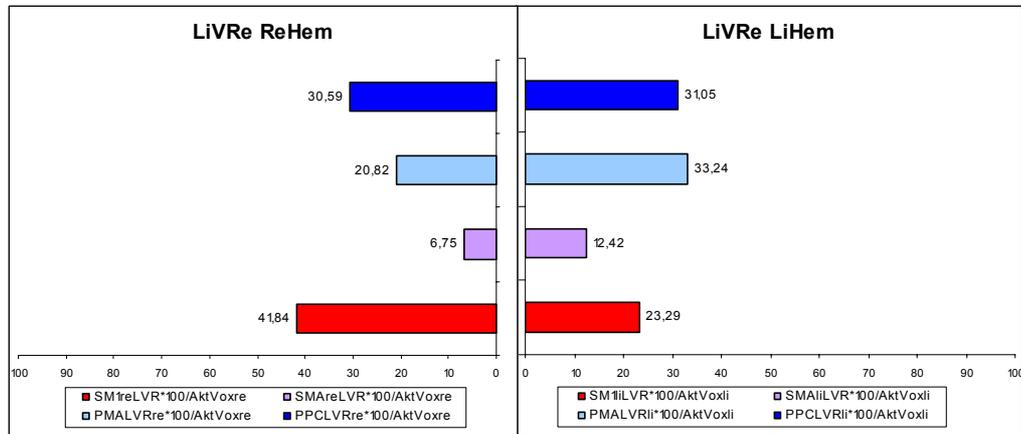


Diagramm 24 & 25: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Links gegen Vorstellung Rechts“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung.

3.2.1.3 Zusammenfassung „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“

Es besteht keine statistisch signifikante Differenz zwischen den jeweils als ipsilateral bzw. kontralateral anzusehenden Hemisphären bezüglich der Bewegungsparadigmen „Rechts gegen Vorstellung Links“ und „Links gegen Vorstellung Rechts“, getestet im Wilcoxon-Test. Daher können beide Paradigmen gemittelt werden und als Paradigma „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ gemeinsam betrachtet werden.

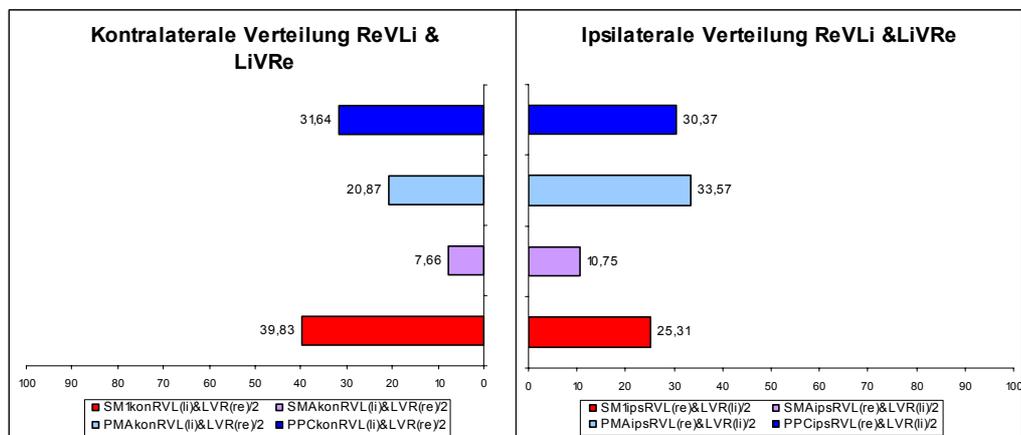


Diagramm 26 & 27: Prozentuale Verteilung der Voxel auf die motorischen Areale im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Vorstellung Links“ und „Links gegen Vorstellung Rechts“ kontra- und ipsilateral zur Bewegung, gemittelt.

Zusammenfassend ergibt sich für das Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ bestehend aus den gemittelten Paradigmen „Rechts gegen Vorstellung Links“ und „Links gegen Vorstellung Rechts“ in der zur realen Bewegung ipsilateral gelegenen Hemisphäre eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 25,3%. Die restlichen 74,7% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 10,8%, das PPC mit 30,4% und das PMA mit 33,5%.

In der zur realen Bewegung kontralateralen Hemisphäre zeigt sich eine Aktivierung des primärmotorischen Areals von 39,8%. Die restlichen 60,2% der aktivierten sekundärmotorischen Areale verteilen sich auf das SMA mit 7,7%, das PPC mit 31,6% und das PMA mit 20,9%.

3.2.2 Einfluss der „Vorstellung“ auf die Lokalisierung des SM1

Im Vergleich von SM1 und dem Quotienten aus SM1 zu PPC unter den verschiedenen Paradigmen ergaben sich folgende statistische Ergebnisse:

Tabelle 4: Statistischer Vergleich von SM1 und PPC zwischen verschiedenen Paradigmen in der 5%-Map

| Wilcoxon-Test | | |
|--|-------------------------|------------------------|
| Vergleich SM1 und SM1/PPC unter den verschiedenen Paradigmen (5%-Map) | | |
| | SM1 | Quotient SM1/PPC |
| ReLi vs Bewe/Ruhe (kon) | p <=0.04331 | p <=0.2145 |
| ReLi vs Bewe/Vorst (kon) | p <=0.126 | p <=0.3708 |
| Bewe/Ruhe (kon) vs Bewe Vorst (kon) | p <=0.8625 | p <=0.795 |
| Bewe/Ruhe (ips) vs Bewe Vorst (ips) | p <=0.2482 | p <=0.141 |
| ReLi vs Bewe/Ruhe (ips) | p <=7.662e-05 | p <=0.1572 |
| ReLi vs Bewe/ Vorst (ips) | p <=7.662e-05 | p <=0.002946 |
| Bewe/Ruhe (kon) vs Bewe Vorst (ips) | p <=7.662e-05 | p <=0.0404 |
| Bewe/Ruhe (ips) vs Bewe Vorst (kon) | p <=6.788e-05 | p <=0.5637 |

Im Vergleich der kontralateralen Hemisphären miteinander zeigte sich weder für das SM1, noch für den Quotienten aus SM1/PPC eine statistisch signifikante Differenz, unabhängig von den Bewegungsparadigmen. Gegeneinander getestet wurden die Paradigmen „Rechts gegen Links“ versus „Bewegung gegen Ruhe“ (SM1 $p <=0,04$; SM1/PPC $p <=0,2$), „Rechts gegen Links“ versus „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ (SM1 $p <=0,1$; SM1/PPC $p <=0,4$) und „Bewegung gegen Ruhe“ versus „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ (SM1 $p <=0,9$; SM1/PPC $p <=0,8$).

Die ipsilateralen Hemisphären der Paradigmen „Bewegung gegen Ruhe“ versus „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ zeigten ebenfalls keine statistisch signifikante Differenz für SM1 ($p \leq 0,2$) und für den Quotienten aus SM1/PPC ($p \leq 0,1$).

Im Vergleich des kontralateralen SM1 des Paradigmas „Rechts gegen Links“ mit dem ipsilateralen SM1 des Paradigmas „Bewegung gegen Ruhe“ und dem ipsilateralen SM1 des Paradigmas „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ fand sich bei beiden Paradigmen im Wilcoxon-Test eine statistisch signifikante Differenz von $p \leq 7,6e^{-05}$. Der Quotient aus SM1/PPC wies für die Paradigmen „Rechts gegen Links“ versus „Bewegung gegen Ruhe“ keine statistische Signifikanz auf ($p \leq 0,2$). Es fand sich jedoch eine statistisch signifikante Differenz des Quotienten aus SM1/PPC im Vergleich der Paradigmen „Rechts gegen Links“ versus „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ ($p \leq 0,003$).

Auch im Vergleich der Bewegungsparadigmen „Bewegung gegen Ruhe“ versus „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ zeigte sich eine statistisch signifikante Differenz zwischen kontra- und ipsilateraler Hemisphäre ($p \leq 7,6e^{-05}$ kontralaterales SM1/ ipsilateralem SM1; $p \leq 6,8e^{-05}$ ipsilaterales SM1/kontralateralem SM1). Es fand sich in beiden Vergleichen ebenfalls keine statistische Signifikanz bezüglich des Quotienten aus SM1/PPC ($p \leq 0,04$ kontralateraler Quotient/ ipsilateralem Quotienten; $p \leq 0,6$ ipsilateraler Quotient/ kontralateralem Quotienten).

3.3 Short-TR: Time courses mit kurzer Periodenzeit (5%-Map)

Wie im Kapitel Material und Methoden beschrieben, wurden in mehreren Arbeitsschritten die Time courses bearbeitet und zu Zeitreihen zusammengefasst, in denen je ein gemittelter Anstieg einer Bewegung dargestellt ist (3 Messungen „Ruhe“, 10 Messungen Bewegung „Rechts“ oder „Links“ und 7 Messungen „Ruhe“). Die zu testenden Referenzfunktionen wurden von den Time courses der jeweiligen ROI subtrahiert und die Absolutwerte wurden addiert (die Tabellen befinden sich im Anhang). Diese Abweichsummen können so statistisch mit dem Wilcoxon-Test ausgewertet und auf signifikante Unterschiede hin beurteilt werden (die statistischen Ergebnisse finden sich in Tabellenform ebenfalls im Anhang).

3.3.1 Short-TR: „Rechts gegen Ruhe“ – Anstieg der Time courses

Die Mittelwerte der Time courses ergaben nach der oben beschriebenen Bearbeitung ein für kontralateral und ipsilateral typisches Verteilungsmuster.

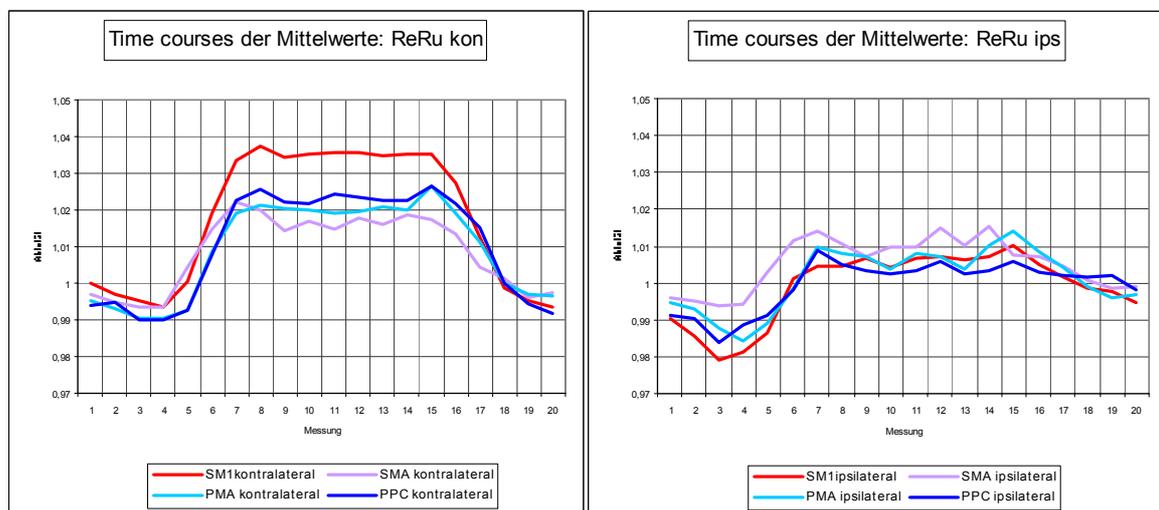


Diagramm 28 & 29: Verlauf der Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Rechts gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

Dabei zeigt sich kontralateral ein höherer Ausschlag des SM1-Time course, die sekundärmotorischen Areale verhalten sich sehr ähnlich. Ipsilateral findet sich optisch keine wesentliche Differenz bezüglich aller Time courses in den 4 ROIs.

3.3.1.1 REF A: Referenzfunktion A (Shift 0, slope 0)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF A im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

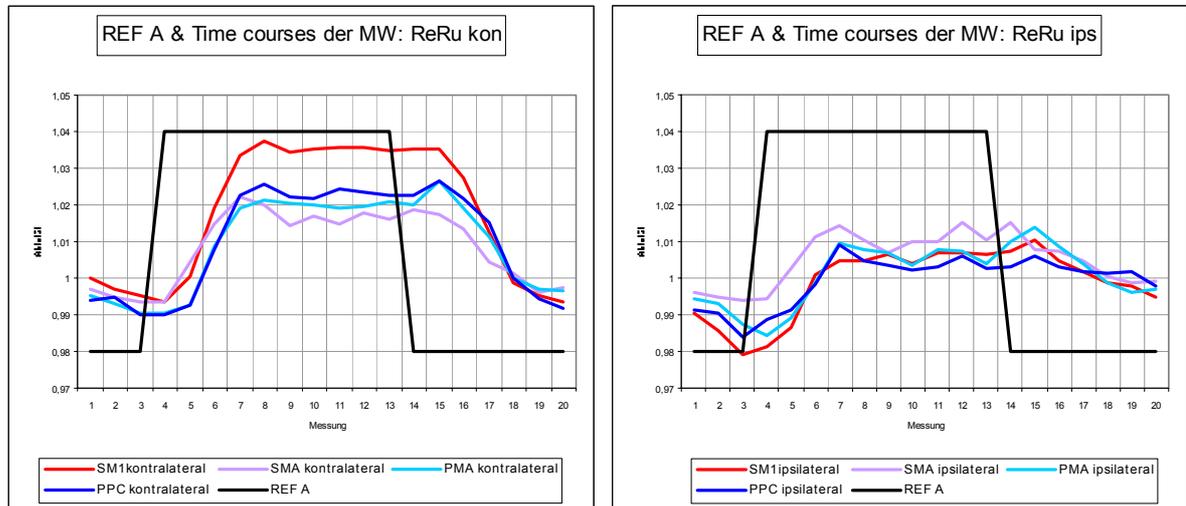


Diagramm 30 & 31: Vergleich der Referenzfunktion A mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Rechts gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.1.2 REF B: Referenzfunktion B (Shift 0, slope 1)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF B im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

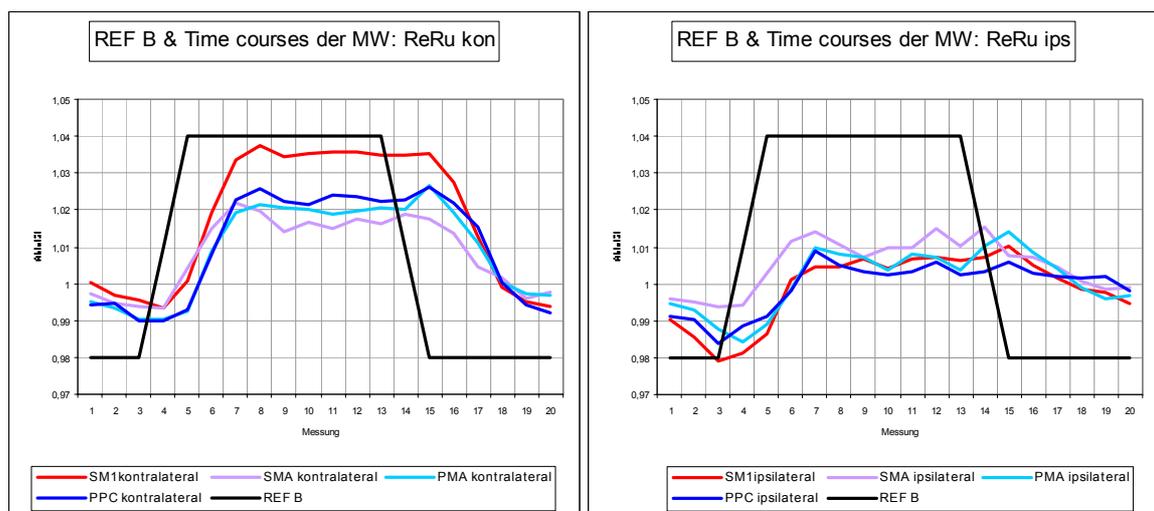


Diagramm 32 & 33: Vergleich der Referenzfunktion B mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Rechts gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.1.3 REF C: Referenzfunktion C (Shift 0, slope 2)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF C im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

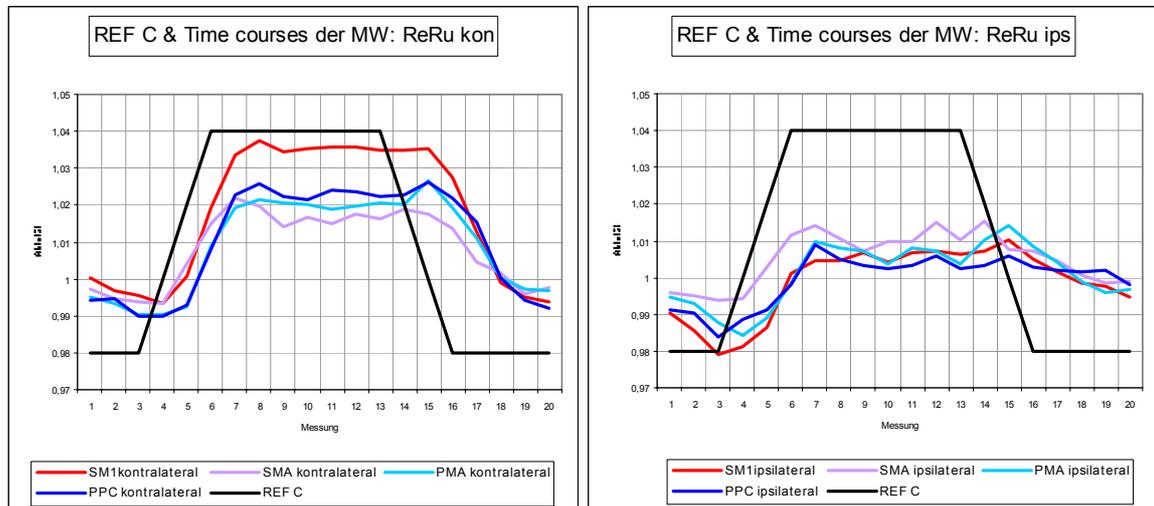


Diagramm 34 & 35: Vergleich der Referenzfunktion C mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Rechts gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.1.4 REF D: Referenzfunktion D (Shift 0, slope 3)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF D im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

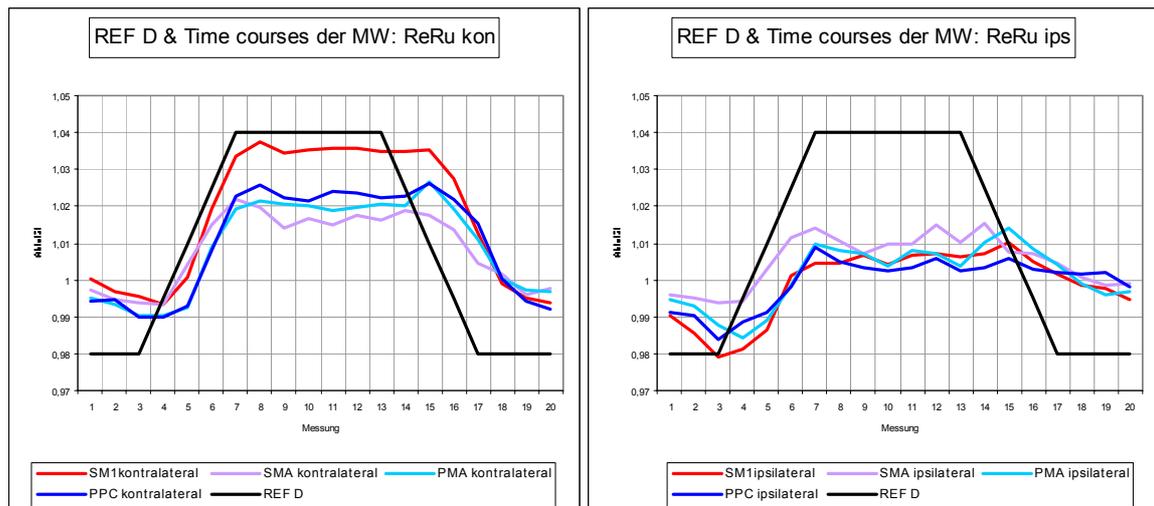


Diagramm 36 & 37: Vergleich der Referenzfunktion D mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Rechts gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.1.5 REF E: Referenzfunktion E (Shift 1, slope 2)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF E im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

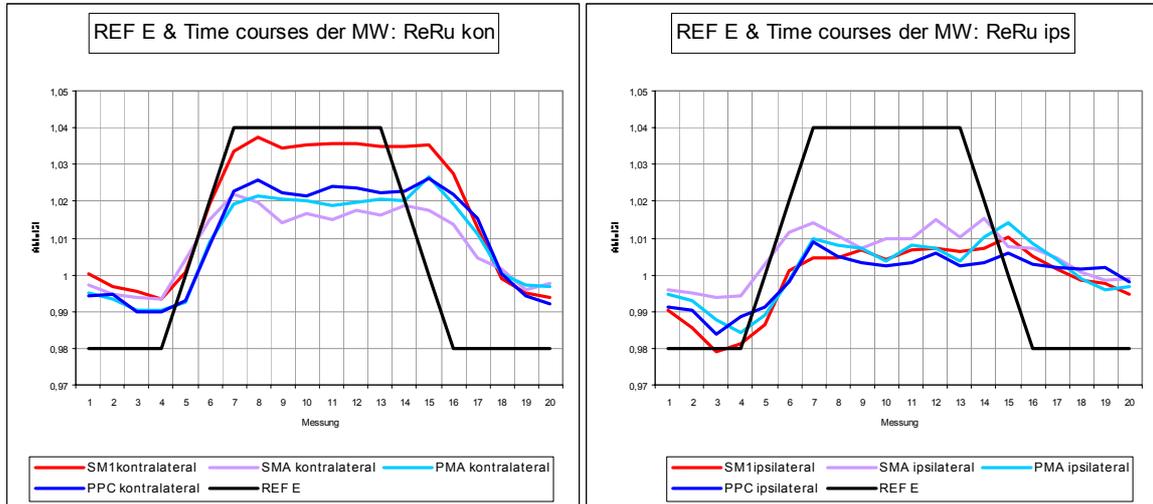


Diagramm 38 & 39: Vergleich der Referenzfunktion E mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Rechts gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.1.6 Zusammenfassung Short-TR „Rechts gegen Ruhe“

Keine der fünf getesteten Referenzfunktionen im Bewegungsparadigma „Rechts gegen Ruhe“ zeigte eine statistisch signifikante Differenz zwischen dem SM1 und einem anderem der sekundärmotorischen Areale ipsi- oder kontralateral zu der durchgeführten Bewegung, getestet mit dem Wilcoxon-Test.

3.3.2 Short-TR: „Links gegen Ruhe“ – Anstieg der Time courses

3.3.2.1 REF A: Referenzfunktion A (Shift 0, slope 0)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF A im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

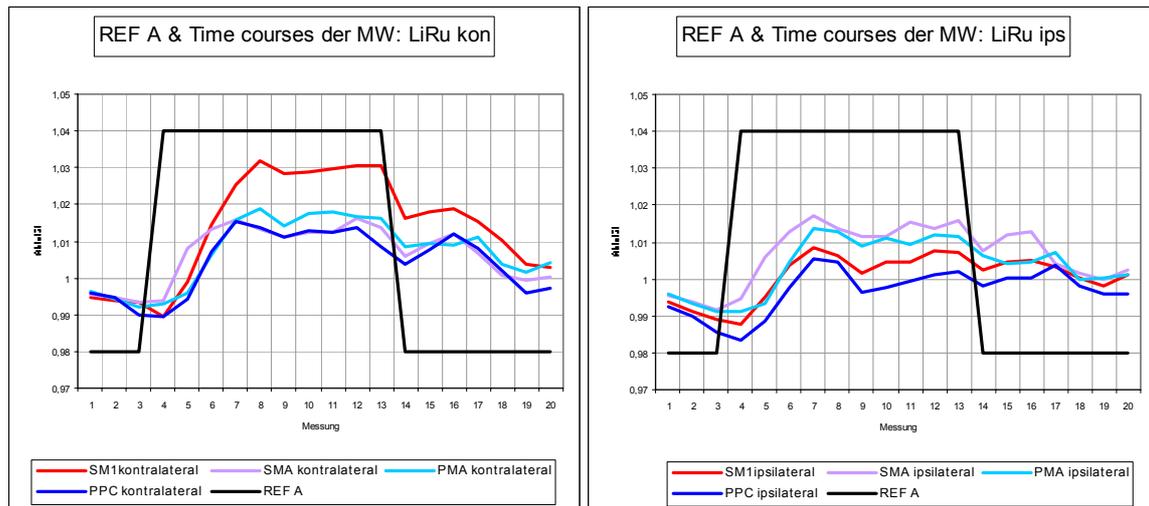


Diagramm 40 & 41: Vergleich der Referenzfunktion A mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Links gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.2.2 REF B: Referenzfunktion B (Shift 0, slope 1)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF B im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

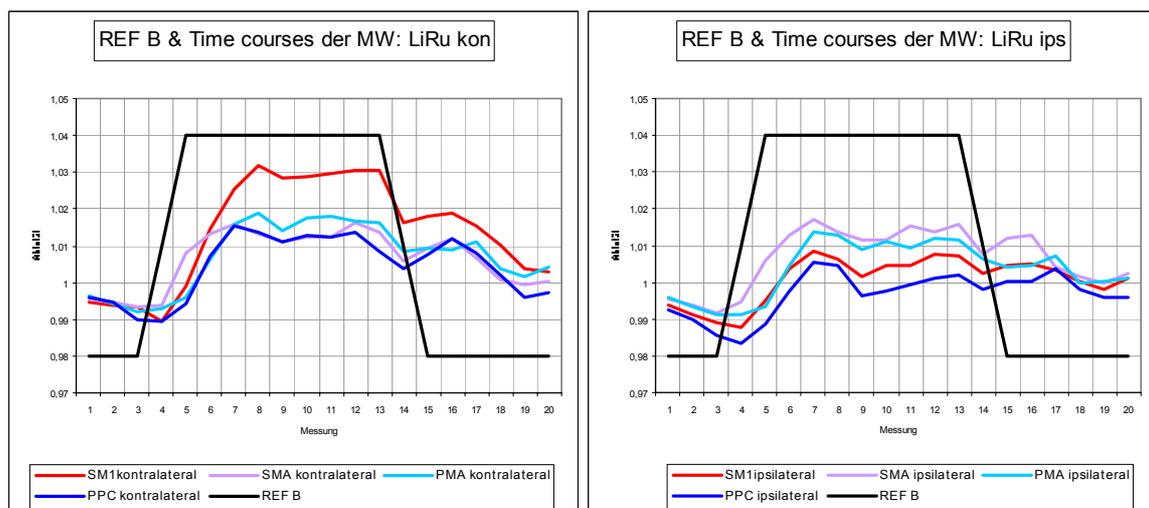


Diagramm 42 & 43: Vergleich der Referenzfunktion B mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Links gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.2.3 REF C: Referenzfunktion C (Shift 0, slope 2)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF C im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

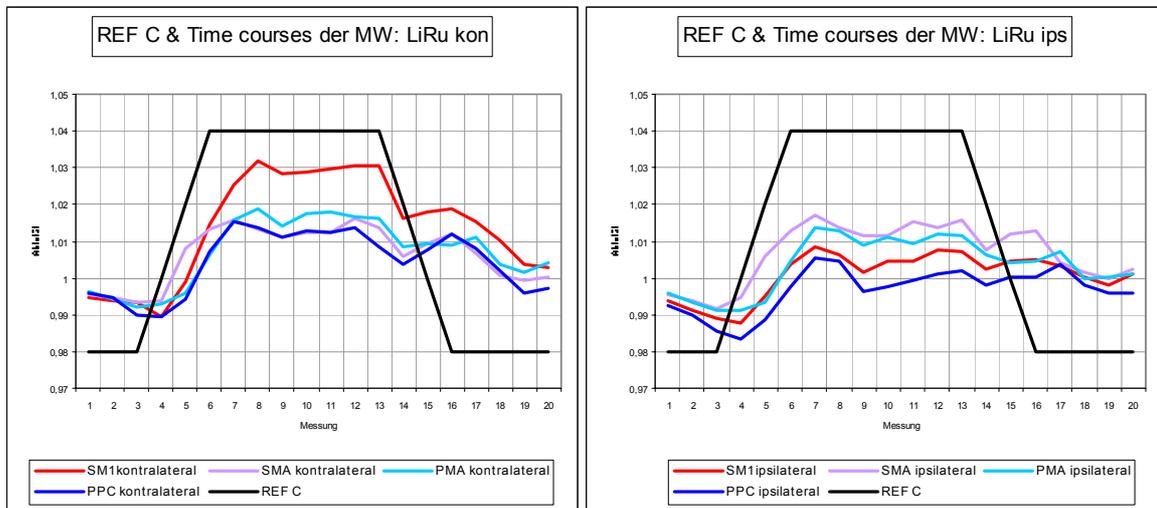


Diagramm 44 & 45: Vergleich der Referenzfunktion C mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Links gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.2.4 REF D: Referenzfunktion D (Shift 0, slope 3)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF D im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

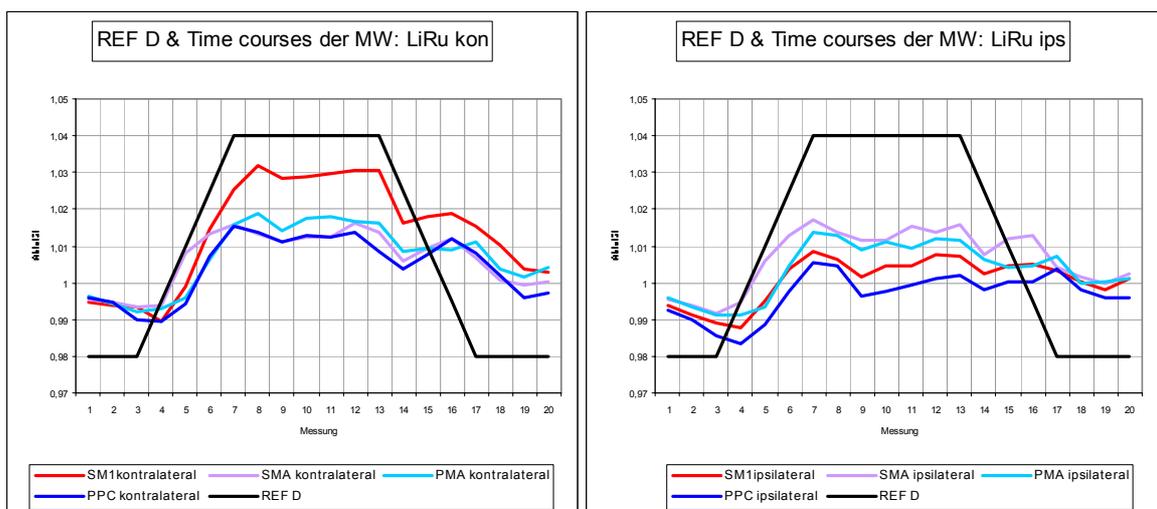


Diagramm 46 & 47: Vergleich der Referenzfunktion D mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Links gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.2.5 REF E: Referenzfunktion E (Shift 1, slope 2)

In der graphischen Darstellung stellt sich die REF E im Vergleich mit den ipsi- und kontralateralen Time courses der einzelnen ROIs wie folgt dar:

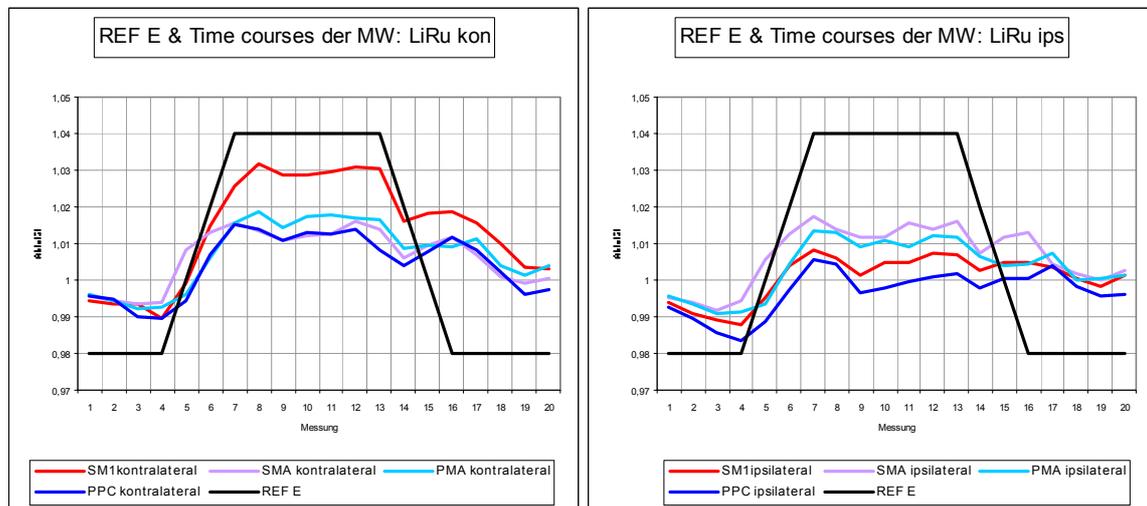


Diagramm 48 & 49: Vergleich der Referenzfunktion E mit den Time courses der vier motorischen Areale kontra- und ipsilateral zur Bewegung im Paradigma „Links gegen Ruhe“, gemittelt über die Probanden.

3.3.2.6 Zusammenfassung Short-TR „Links gegen Ruhe“

Keine der fünf getesteten Referenzfunktionen im Bewegungsparadigma „Links gegen Ruhe“ zeigten eine statistisch signifikante Differenz zwischen dem SM1 und einem anderen der sekundärmotorischen Areale ipsi- oder kontralateral zu der durchgeführten Bewegung.

3.3.3 Einfluss der Short-TR auf die Lokalisierung des SM1

In dem durchgeführten Teilversuch mit einer kurzen Anstiegszeit der Time courses fand sich bei den getesteten fünf Referenzfunktionen keine signifikante Differenz zwischen den einzelnen motorischen Arealen. Daher kann keine der Referenzfunktionen zu Hilfe genommen werden, um das kontra- oder ipsilateral zu einer Bewegung liegende SM1 zu detektieren und gegen das PPC abzugrenzen.

4 Diskussion

In der präoperativen Bildgebung des Gehirnes zur Demonstration der Lagebeziehung zwischen Tumoren und eloquenten Hirnarealen wie z.B. dem primärmotorischen Kortex richtet man sich klassischerweise wie oben beschrieben nach „anatomical landmarks“, die eine Lokalisation dieser Gehirnareale anhand morphologischer Merkmale ermöglichen. Bereits bei gesunden Menschen ist es jedoch z.B. nicht immer sicher möglich, den primärmotorischen Cortex auf dem Gyrus praecentralis aufzufinden (Yetkin et al. 1995; Papke et al. 2000). Bei Vorliegen einer cerebralen Läsion, wie z.B. einem Hirntumor oder einem ausgeprägten Ödem wird eine anatomische Zuordnung oft unmöglich. In der funktionellen Bildgebung mittels fMRT lässt sich mit einer motorischen Aufgabe über die Darstellung der aktivierten Voxel in den motorischen Zentren eine Zuordnung ermöglichen. Hierbei ist das zur Seite der Bewegung kontralaterale SM1 das am sichersten aufzufindende Areal und auch das am meisten untersuchte. Probleme treten dann auf, wenn eine kontralaterale Bewegung aufgrund z.B. eines Hirntumors nicht mehr möglich ist, und so keine direkte kontralaterale Aktivierung des primärmotorischen Cortex erfolgen kann. Diese Arbeit beschäftigt sich mit alternativen Herangehensweisen, um das primärmotorische Areal in der ipsilateral zu einer Bewegung liegenden Hirnhemisphäre besser auffinden zu können.

Ziel dieser Arbeit war die Optimierung der Lokalisation des primärmotorischen Cortexareals der ipsilateral zu einer definierten Fingerbewegung gelegenen Hemiparese mittels fMRT.

4.1 Paradigmen mit „Bewegung“ und „Ruhe“ (1%- & 5%-Map)

4.1.1 Wichtige Ergebnisse:

Während des ersten Untersuchungsteiles wurden die aktivierten Voxel bei einem individuellen Schwellenwert untersucht, der einen Anteil von 1% bzw. 5% der aktiven Voxel sichtbar machte (1%-Map bzw. 5%-Map). Bei einer 1%-Map werden 1% aller aktivierten Voxel sichtbar, diese aktivierten Voxel liegen daher überwiegend in Arealen, die einen direkten Zusammenhang mit der durchgeführten Aufgabe haben. Bei einer 5%-Map stellen sich 5% der aktivierten Voxel dar, dabei steigt bei einer 5%-Map der Anteil in den

sekundärmotorischen Arealen und auch außerhalb der fokussierten Areale, was zu einem Verteilungsmuster führt, bei dem auch Areale, die indirekt mit der Aufgabe zu tun haben vermehrt aktive Voxel anzeigen.

Bei der Untersuchung wurden Bewegungsparadigmen mit alternierender Bewegung beider Hände „Rechts gegen Links“ oder mit „Ruhe“ als Kontrollbedingung („Bewegung gegen Ruhe“) durchgeführt. Die aktiven Voxel wurden in den motorischen ROIs ausgezählt und ihr prozentualer Anteil miteinander verglichen. Ziel dieses Untersuchungsteiles war es herauszufinden, welches Bewegungsparadigma das primärmotorische Kortexareal besonders hervorhebt und ob die ipsilaterale Mitaktivierung bei einer Kontrollbedingung aus „Ruhe“ ausreicht das ipsilateral zu der durchgeführten Bewegung liegende SM1 zu lokalisieren und sicher vom dorsal benachbarten PPC differenzieren zu können.

Bei der Untersuchung mit der 1%-Map stellte sich das kontralaterale SM1 sowohl bei dem Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“, als auch bei „Bewegung gegen Ruhe“ als das Areal mit dem höchsten Anteil der Gesamtzahl der aktivierten Voxel dar. Auch bei einer 5%-Map mit erniedrigter Aktivierungsschwelle (5% der aktivierten Voxel werden angezeigt) lag im kontralateralen SM1 mit beiden Bewegungsparadigmen die höchste Anzahl aktivierter Voxel vor.

4.1.1.1 „Rechts gegen Links“

Das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ wies bei einer 1%-Map mit 64,5% aller dargestellten aktiven Voxel die meiste Anzahl aktivierter Voxel auf, bei einer 5%-Map lag die Anzahl aktivierter Voxel signifikant niedriger mit 42,8%. Dies entspricht jedoch ebenfalls der höchsten Anzahl aktivierter Voxel in einem motorischen Areal in der 5%-Map. Die gefundene Differenz zwischen den Werten in der 1%- und der 5%-Map ist statistisch signifikant. Die sekundärmotorischen Areale zeigten wie zu erwarten in der 1%-Map deutlich weniger aktivierte Voxel auf als in der 5%-Map, sie ließen sich jedoch sicher auffinden. Vereinzelt war bei 1% in einer anatomischen ROI kein aktivierter Voxel nachzuweisen.

4.1.1.2 „Bewegung gegen Ruhe“

Das kontralaterale SM1 war sowohl mit einer individuellen Schwelle mit 1% aktivierter Voxel als auch in der 5%-Map mit erniedrigter Schwelle dasjenige mit der höchsten Anzahl aktivierter Voxel. Wie zu erwarten lag in der 1%-Map die Anzahl der aktiven Voxel im SM1, das direkt die Bewegung verursacht, höher als in der 5%-Map. Statistisch zeigte sich diese höhere Aktivierung des (kontralateralen) SM1 signifikant ($p \leq 0,0056$). Der Quotient aus (kontralateralem) SM1/PPC war hoch signifikant ($p \leq 0,0007$), daher besteht in diesem Fall eine hohe Sicherheit das SM1 von dem dorsal benachbarten PPC unterscheiden zu können.

Ipsilateral fanden sich im SM1 lediglich 1/3 der aktivierten Voxel, etwa gleich viele wie im benachbarten PPC, die Werte zeigten sich unabhängig von der Aktivierungsschwelle. Statistisch lag kein signifikanter Unterschied bezüglich der Selektivität vor, mit der das kontra- und ipsilaterale SM1 dargestellt wurde ($p \leq 0,00055$). Die Quotienten aus SM1/PPC wiesen in keiner der beiden Maps für die kontra- oder die ipsilaterale Verteilung einen signifikanten Unterschied auf. Daher war die Sicherheit, mit der das SM1 vom PPC unterschieden werden konnte nicht hoch genug, um dieses Bewegungsparadigma als effektive Methode verwenden zu können.

Es fand sich kein Seitenunterschied bezüglich der Aktivierungsverteilung in beiden Hemisphären bei den ausschließlich rechtshändigen Probanden.

4.1.2 Ergebnisdiskussion vor dem Hintergrund der Literatur

4.1.2.1 „Rechts gegen Links“

In der durchgeführten Untersuchung zeigte sich das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ als dasjenige mit der höchsten Anzahl aktivierter Voxel des (kontralateralen) SM1. Damit zeigte sich in Übereinstimmung mit weiteren Studien, dass das Paradigma „Rechts gegen Links“ dem mit „Bewegung gegen Ruhe“ zur selektiven Darstellung des SM1 zu bevorzugen ist (Fazit1) (Papke et al. 2000; Moritz et al. 2000; Gordon et al. 1998).

Es finden sich bei dem Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ mehr aktivierte Voxel in den sekundärmotorischen Arealen, zum anderen können aber auch andere Areale, wie z.B. sensorische Areale, die an der Bewegungskontrolle mitwirken, in unmittelbarer Nähe zum Sulcus centralis in den Ruhephasen aktiviert und leicht verwechselt werden (Turner et al.

1993; Conelly et al. 1993; Cao et al. 1993; Schad et al. 1993; Santosh et al. 1995; Boecker et al. 1994; Van Oostende et al. 1997). Zu erklären ist dies über eine seitenübergreifende Aktivierung vor allem der sekundärmotorischen Areale. Bei einer einseitigen „Bewegung“ als Aktivitätsbedingung gegen eine Kontrollbedingung aus „Ruhe“, wie im Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“, finden sich zum einen die kontralaterale Aktivierung als auch eine ipsilaterale Mitaktivierung überwiegend der sekundärmotorischen Zentren und nur zu 1/3 des primärmotorischen Areals. Die sekundärmotorischen Areale dienen in erster Linie der Bewegungsplanung, sie sind, wie oben dargelegt, nicht so streng seitenlokalisiert wie das primärmotorische Areal, was den Beginn der Pyramidenbahn darstellt (Papke et al. 1999; Bandettini et al. 1991; Connely et al. 1993; Henning et al. 1995; Reiser et al. 1995; Naidich et al. 2001).

Bei einem Bewegungsparadigma mit „Bewegung“ als Aktivitätsbedingung und „Bewegung der anderen Hand“ als Kontrollbedingung, wie im Falle von „Rechts gegen Links“, sind in den sekundärmotorischen Arealen unter Aktivitäts- und Kontrollbedingungen in beiden Hemisphären Neurone aktiviert. Da diese Hirnareale beidseits unter Aktivierungs- und Kontrollbedingungen aktiviert sind, erscheinen die Voxel nicht als aktive Voxel in der Aktivitätsbedingung im Vergleich zu nicht-aktiven Voxeln unter der Kontrollbedingung (Papke et al. 2000).

Wie im Ergebnisteil deutlich wird, hat eine 1%-Map den Vorteil, dass im SM1 prozentual signifikant mehr aktivierte Voxel als bei einer 5%-Map dargestellt sind. Bei einer hohen Schwelle, wie z.B. bei der 1%-Map, werden zunächst die Voxel als aktiviert dargestellt, deren Signal-Zeit-Kurve am stärksten mit dem Paradigma korrelieren. Dies führt aufgrund der geringen Anzahl der dargestellten Voxel praktisch zu einer Verschiebung zugunsten des SM1, da im primärmotorischen Kortex die höchste Korrelation mit dem tatsächlichen Bewegungsparadigma besteht. Mit Absenkung der Schwelle, wie z.B. bei einer 5%-Map, „füllen“ sich neben den primärmotorischen Arealen auch die sekundärmotorischen Areale bis 5% der aktivierten Voxel dargestellt sind. Eine 1%-Map ist einer 5%-Map vorzuziehen zur selektiven Detektion des SM1 (Fazit 2). Gleichzeitig ist zur Beurteilung der sekundärmotorischen Areale eine 5%-Map der 1%-Map vorzuziehen (Fazit 3). Bei weiter erhöhter Prozentzahl der aktivierten Voxel, also einer erniedrigten Schwelle, würden dann die im übrigen Gehirn verteilten aktivierten Voxel dargestellt werden. Zusätzlich würden zu

den tatsächlich aktivierten Voxeln zunehmend „Rauschvoxel“ als aktiviert dargestellt werden, diese entsprächen „falsch-positiven“ Voxeln (Papke et al. 2000).

In der durchgeführten Untersuchung lag der Schwerpunkt auf der Suche nach Möglichkeiten, das SM1 zu lokalisieren, wenn keine kontralaterale Bewegung durchgeführt werden kann. Liegt z.B. eine Raumforderung vor, die durch Verdrängung des Gewebes und Ödem zu einer eingeschränkten Funktion des Primärmotorischen Areal führt, und kann die kontralaterale Extremität nicht mehr bewegt werden, so besteht nach einer schonenden Extirpation mit Erhalt des Primärmotorischen Areal die Hoffnung auf eine Erholung des funktionellen Areal und damit der Funktion der Extremität.

Es war daher war die Suche nach weiteren Parametern, außer einer hohen Schwelle wie in der 1%-Map, die auf das SM1 fokussieren. Die Paradigmenwahl mit einer anderen Kontrollbedingung als „Bewegung“ erschien als eine solche Möglichkeit. Es ist daher erforderlich gewesen die Schwelle zu senken und eine 5%-Map zu Grunde zu legen, da nur so in den anderen in Frage kommenden Arealen auch ausreichend aktivierte Voxel sichtbar wurden. Diese aktivierten Voxel in den sekundärmotorischen Arealen konnten im Vergleich der verschiedenen Paradigmen weiter untersucht werden.

4.1.2.2 „Bewegung gegen Ruhe“

Beim Vorliegen einer Hemiparese kann das Paradigma „Rechts gegen Links“ nicht durchgeführt werden, es muss also ein Paradigma eingesetzt werden, das ohne die Bewegung einer Seite auskommt. Die im Folgenden untersuchten Paradigmen haben daher jeweils eine „Bewegung“ als Aktivierungsbedingung und „Ruhe“ als Kontrollbedingung. Dabei wird als die kontralaterale Hemisphäre diejenige bezeichnet, die der realen Bewegung gegenüber liegt. Die der ipsilateralen Hemisphäre gegenüber liegende Hand führt keine Bewegung aus, da die Kontrollbedingung aus „Ruhe“ besteht. Zur Beurteilung der kontralateralen Seite kann das Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ ohne Probleme eingesetzt werden, da eine signifikant höhere Aktivierung als auf der ipsilateralen Seite vorlag (Fazit 4). Ziel war es, die motorischen Areale zu untersuchen und ein Paradigma zu finden, was auch mit „Ruhe“ als Kontrollbedingung über die ipsilaterale Mitaktivierung ausreicht, um sicher das SM1 zuzuordnen und vom PPC abgrenzen zu können.

Bekannt ist, dass ein Bewegungsparadigma mit „Bewegung“ als Aktivierungs- und Kontrollbedingung deutliche Vorteile gegenüber der „Ruhephase“ als Kontrollbedingung

hat. Jedoch zeigte sich in verschiedenen Studien, dass bereits die Vorstellung einer Aktivität, wie z.B. einer motorischen Bewegung, zu einer intracerebralen Aktivierung von vor allem planenden Zentren führen kann (Porro et al. 1996; Boecker et al. 1994; Tanji & Shima 1994). Es besteht die Gefahr, dass eine unter Versuchsbedingungen nicht zu erkennende Vorstellung oder Planung einer vergangenen oder noch kommenden Bewegung zu einer Verschiebung der Voxelverteilung und damit zu einer „Verzerrung“ der dargestellten aktivierten Voxel führt. Dabei ist anzunehmen, dass in diesem Fall die planenden sekundärmotorischen Areale mehr aktive Voxel aufweisen als unter „realen“ Ruhebedingungen (Boecker et al. 1998). Dies könnte zu der festgestellten signifikant geringeren Aktivierung des kontralateralen SM1 führen (64,5% aktivierte Voxel bei „Rechts gegen Links“ versus 52,6% aktivierte Voxel bei „Bewegung gegen Ruhe“).

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, zeigt sich nicht nur eine über beide Hirnhälften verteilte Aktivierung der sekundärmotorischen Areale, sondern es findet sich zu ca. 1/3 eine Aktivierung des ipsilateral gelegenen SM1. Dieses Areal liegt allerdings insbesondere dem PPC, aber auch den weiter rostral gelegenen sekundärmotorischen Zentren eng benachbart, so dass es leicht verwechselt werden kann. Dies ist insbesondere in der Planung eines hirnchirurgischen Eingriffes von großer Wichtigkeit, um das SM1 möglichst optimal schonen zu können, da eine dort lokalisierte Läsion in der Regel zu einer irreversiblen Parese führt.

Eine mögliche Erklärung der Mitaktivierung eines primärmotorischen Areals ohne real durchgeführte Bewegung der kontralateralen Hand liegt in der Theorie der kreuzenden und nicht-kreuzenden Nervenbahnen im menschlichen Gehirn (siehe Einleitung). Dabei besteht die Annahme, dass ipsilaterale, nicht kreuzende corticospinale Bahnen die motorischen Bewegungsabläufe mit planen und sichern, wie in Studien mit elektrischer corticaler Reizung oder einer zusammenfassenden ausführlichen Übersichtsarbeit von Wassermann et al. gezeigt werden konnte (Bucy et al. 1933; Wassermann et al. 1994). Eine genaue anatomische und funktionelle Zuordnung der einzelnen Bahnen wird noch weiter erforscht, insgesamt kreuzen jedoch ca. 10 bis 15% der absteigenden corticospinalen Bahnen nicht auf die gegenüberliegende Seite. Daher kann eine ipsilaterale Mitaktivierung von primärmotorischen Arealen auf nicht-kreuzende Bahnen zurück geführt werden (Papke et al. 2000; Nyberg-Hansen et al. 1963). Die hauptsächliche Aktivierung zur Planung einer Bewegung scheint sich auf beide Hemisphären zu verteilen und schlägt sich dort im fMRT als Aktivierung der sekundärmotorischen Areale nieder.

Das Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ führte in der durchgeführten Untersuchung wie zu erwarten war zu einer Darstellung von ca. 1/3 der aktivierten Voxel im ipsilateralen SM1. Auch bei der 5%-Map zeigte sich keine relevante Mehraktivierung. Eine besondere Gefahr bestand in der etwa gleichen Aktivierung des PPC, das damit nicht sicher differenziert werden kann. Daher eignet sich das Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ nicht zur selektiven Beurteilung des ipsilateralen SM1 (Fazit 5).

4.1.3 Fazit 1 bis 5

4.1.3.1 Fazit 1

Das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ ist das beste Paradigma zur selektiven Lokalisation des SM1.

In der Untersuchung mit Darstellung von 1% und 5% der aktivierten Voxel fand sich wie zu erwarten das Paradigma „Rechts gegen Links“ als dasjenige Paradigma mit der selektivsten Aktivierung des SM1.

4.1.3.2 Fazit 2

Zur selektiven Detektion des SM1 ist eine 1%-Map besser geeignet als eine 5%-Map.

Wie oben gezeigt werden konnte, ist die Anzahl der aktivierten Voxel im SM1 bei einer 1%-Map signifikant erhöht gegenüber der 5%-Map. Daher sollte eine 1%-Map verwendet werden, wenn selektiv nach dem SM1 gesucht wird und die sekundärmotorischen Areale zweitrangig erscheinen.

4.1.3.3 Fazit 3

Zur Betrachtung der sekundärmotorischen Areale ist eine 5%-Map besser geeignet als eine 1%-Map.

In dem Fall, dass nicht nur vorrangig das SM1 betrachtet werden soll, sondern auch die Voxelverteilung in den sekundärmotorischen Arealen entscheidend ist, sollte eine 5%-Map zu Grunde gelegt werden. Bei einem angezeigten Anteil von 5% der aktivierten Voxel finden sich mehr aktivierte Voxel auch in den sekundärmotorischen Arealen und nicht wie teilweise bei der 1%-Map ROIs mit nur sehr geringer Voxelanzahl. Dieser Shift zugunsten

der sekundärmotorischen Areale kann sich mit der erniedrigten Schwelle und der höheren Anzahl aktivierter Voxel zu Nutze gemacht werden.

4.1.3.4 Fazit 4

Zur Beurteilung der kontralateralen Seite kann, wenn „Rechts gegen Links“ nicht möglich ist, „Bewegung gegen Ruhe“ als Bewegungsparadigma eingesetzt werden.

Bei der Suche nach dem kontralateralen SM1 besteht die Möglichkeit, das Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ einzusetzen, wenn das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ nicht eingesetzt werden kann. Erstgenanntes Paradigma zeigt sich zwar nicht im gleichen Maße selektiv wie „Rechts gegen Links“, es ist jedoch ebenfalls signifikant selektiv zum Auffinden des kontralateralen SM1.

4.1.3.5 Fazit 5

Zur selektiven Beurteilung des ipsilateralen SM1 ist das Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ nicht in der Lage, da es nicht sicher zwischen ipsilateralem SM1 und PPC differenziert.

Die Bewegungsparadigmen „Rechts gegen Ruhe“ und „Links gegen Ruhe“ mit „Bewegung“ als Aktivitäts- und „Ruhe“ als Kontrollbedingung zeigten zwar ebenfalls eine deutliche Aktivierung des kontralateralen SM1 (siehe oben), ipsilateral fand sich jedoch neben der Coaktivierung des SM1 von 1/3 der aktivierten Voxel der ipsilateralen Seite eine ebensolche Aktivierung des direkt benachbarten PPC. Es konnte daher keine sichere Zuordnung der beiden Areale allein aufgrund der aktivierten Voxel gewährleistet werden.

4.2 Paradigmen mit „Bewegung gegen Vorstellung“ (5%-Map)

4.2.1 Wichtige Ergebnisse

Die mit einer 5%-Map ausgewerteten Bewegungsparadigmen „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ hatten eine reale „Bewegung“ als Aktivierungsbedingung und die „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung. Dabei fand sich im Wesentlichen die gleiche Verteilung der aktivierten Voxel in den motorischen Arealen wie bei dem Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“. Es lagen die meisten aktivierten Voxel im

kontralateralen SM1 vor, ipsilateral fanden sich im SM1 und im benachbarten PPC zu gleichen Teilen etwa 1/3 der aktivierten Voxel.

Im Vergleich des (kontralateralen) SM1 des Paradigmas „Rechts gegen Links“ mit dem ipsilateralen SM1 des Paradigmas „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ fand sich ein statistisch signifikanter Unterschied. Diese Differenz entspricht dem signifikanten Unterschied im Vergleich des (kontralateralen) SM1 des Paradigmas „Rechts gegen Links“ mit dem ipsilateralen SM1 des Paradigmas „Bewegung gegen Ruhe“. Leider fand sich keine statistisch signifikante Differenz zwischen dem Quotienten aus SM1/PPC, mit dessen Hilfe eine selektive Differenzierung beider ROIs möglich gewesen wäre.

Im Vergleich des kontralateralen SM1 des Paradigmas „Bewegung gegen Ruhe“ gegenüber dem ipsilateralen SM1 des Paradigmas „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“ fand sich ein weiterer signifikanter Unterschied ($p \leq 7,7e-05$), jedoch fand sich auch hier kein signifikanter Unterschied bezüglich des Quotienten aus SM1/PPC. Daher hilft die Kontrollbedingung der „Vorstellung einer Bewegung“ nicht, das ipsilaterale SM1 besser gegenüber dem direkt benachbarten PPC abzugrenzen.

In den Ergebnissen fand sich kein Seitenunterschied zwischen rechter und linker Hemisphäre bezüglich der Paradigmen „Rechts gegen Vorstellung Links“ und „Links gegen Vorstellung Rechts“. Zusammengefasst fand sich kontralateral zur realen Bewegung kein statistisch signifikanter Unterschied im SM1 verglichen zwischen dem Paradigma „Rechts gegen Links“ mit dem Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“.

4.2.2 Ergebnisdiskussion vor dem Hintergrund der Literatur

Wie oben beschrieben zeigen einige fMRT-Studien, dass bereits die Vorstellung einer Bewegung zum Auftreten aktivierter Voxel vor allem in den planenden sekundärmotorischen Zentren führen kann. In PET-Studien zeigte sich eine Ähnlichkeit der Bewegungsdurchführung mit der Bewegungsvorbereitung vor allem im supplementärmotorischen Areal (SMA) (Stephan et al. 1997). Boecker et al. konnten bereits 1998 eine modulierte Aktivitätsänderung vor allem in prämotorischen Arealen bei rein imaginierten Bewegungen nachweisen (Boecker et al. 1998). Weitere Autoren zeigten ebenfalls eine Aktivierung mit Vorstellungen von komplexen Bewegungsabläufen mit ähnlichen Ergebnissen wie unter dem Paradigma der „realen Bewegung“ (Porro et al. 1996; Tanji 1994; Tanji and Shima 1994).

In dem vorliegenden Studienaufbau mit dem Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ ist nicht sicher auszuschließen, dass die Probanden sich eine bereits durchgeführte Bewegung nochmals vorstellten, oder eine kommende Bewegung imaginär planten. In dem Wissen um eine mögliche Coaktivierung der motorischen Areale alleine durch die Vorstellung einer Bewegung, wie weiter oben ausführlich erläutert, wurde daher an die Hauptuntersuchung mit einer 5%-Map eine Folgeserie mit „Bewegung“ als Aktivierungsbedingung und der „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung angeschlossen. Dabei sollten sich die Probanden die vorher gelernten Bewegungen des „finger tappings“ der bezeichneten Hand genau vorstellen, ohne jedoch die Hand real zu bewegen.

In verschiedenen fMRT Untersuchungen mit dem Schwerpunkt motorischer Paradigmen in den letzten Jahren wurde mit höherer Auflösung der technischen MRT-Bedingungen eine zunehmende Komplexität in Aufbau und Funktion des primär- und sekundärmotorischen Kortex aufgezeigt. (Boecker et al. 1994; Culham et al. 2001; Deecke et al. 1996; Dieterich et al. 2003; Halsband et al. 1994; Karni et al. 1995; Lee et al. 1999; Mao et al. 2002; Moller et al. 2005; Naidich et al. 2001; Santosh et al. 1995; Shibasaki et al. 1993; Tanji & Shima 1994; Van Oostende et al. 1997). Dabei zeigte sich die Einteilung in Zentren, die ausschließlich der Planung und Arealen, die einzig motorische Bewegungsausführung koordinieren, als zu einfach. Viele Areale arbeiten „übergreifend“, in ihnen wird Bewegung gleichzeitig geplant, mit anderen Arealen abgestimmt und dann schließlich an die in die Peripherie leitenden Bahnen weitergeleitet.

4.2.2.1.1 SM1:

Das SM1, das bekannteste und am besten erforschte primärmotorische Areal wurde lange Zeit als ausschließlich „exekutives“ Areal angesehen, was die vorgeplante Bewegung gezielt an die in die Peripherie leitenden Bahnen weitergibt. In den letzten Jahren zeigte sich, dass dieses Gebiet aber auch beteiligt ist an motorischen Lernprozessen, Plastizität und bimanueller Koordination ist (Sanes & Donoghue 2000; Karni et al. 1995). Die von Penfield erstmals beschriebene Somatotopie mit gewichteter Repräsentation der Willkürmuskulatur und die von Yousry beschriebene Lage des Handareals auf dem „motor knob“ konnte in den letzten Jahren bestätigt und verfeinert werden (Penfield & Boldrey 1937; Yousry et al. 1997). Besondere Beachtung fand in den letzten Jahren die Tatsache, dass das ipsilateral zu einer Bewegung liegende SM1 die auch in dieser Studie gefundene Mitaktivierung von ca. 30% aufwies (Bucy & Fulton 1933; Chen et al. 1997). Diese ipsilaterale Mitaktivierung entspricht nicht-kreuzenden Nervenfasern, die zum einen die

Bewegung mit auszuführen scheinen und dabei am ehesten der Sicherung und bimanueller Koordination dienen (Wassermann et al. 1994). Im Falle der vorliegenden Studie zeigte sich, wie oben beschrieben, keine ausreichende ipsilaterale Mitaktivierung des SM1, um es sicher von dem dorsal benachbarten PPC unterscheiden zu können. Auch bezogen auf die Kontrollbedingung der „Vorstellung einer Bewegung“ zeigte sich keine vermehrte Aktivierung des ipsilateralen SM1 gegenüber der „Ruhe“ als Kontrollbedingung.

4.2.2.1.2 SMA:

Das SMA, das als ursprünglich „reines Planungszentrum“ angesehene supplementärmotorische Areal, scheint eine sehr viel komplexere Funktion zu haben als noch vor 10 bis 15 Jahren angenommen wurde. Mittlerweile wird es in mindestens drei funktionell unterschiedlich arbeitende Unterareale aufgeteilt. Das posteriore SMA findet sich bereits bei „einfachen“ motorischen Bewegungen aktiv, z.B. bei Aufgaben, die auf eine äußere Anweisung hin durchgeführt werden. Das anteriore SMA wird dagegen überwiegend bei komplexen Bewegungssequenzen aktiviert, z.B. bei motorischen Aufgaben, die eine Selektion von Bewegungsaspekten beinhalten, wie etwa eine Richtung oder einen Zeitpunkt der Bewegung. Dabei zeigt es eine deutlich höhere Aktivität bei Bewegungen, die auf „Eigeninitiative“ hin ausgeführt werden und nicht durch eine Vorgabe beginnen (Boecker et al. 1994; Halsband et al. 1994; Lee et al. 1999; Shibasaki et al. 1993; Van Oostende et al. 1997; Weilke et al. 2000). Zudem zeigt sich eine hohe Aktivität des als „intermediäres SMA“ bezeichneten Areals bei der Imagination einer Bewegung, d.h. es findet sich in fMRT-Studien besonders aktiviert, wenn Probanden sich Bewegungen nur vorstellen ohne sie tatsächlich auszuführen (Stephan et al. 1995; Grezes & Decety 2001). Es ist daher eine deutlichere Aktivierung bei einer wie in dieser Arbeit verwendeten Kontrollbedingung der „Vorstellung einer Bewegung“ zu erwarten. In der durchgeführten Untersuchung zeigte sich jedoch keine vermehrte Aktivierung des SMA. Dabei zeigte die ipsilateral zur realen Bewegung liegende Seite eine höhere Aktivierung als die kontralaterale Seite, die Ergebnisse unterschieden sich jedoch statistisch nicht von der Kontrollbedingung „Ruhe“. Eine mögliche Erklärung dieser geringen Aktivierung ist das bereits bei dem Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ zu beobachtende Phänomen, dass eine Kontrollbedingung aus einer realen „Bewegung“ zu einer seitengleichen Aktivierung der planenden Areale führt, welche damit unter Aktivitäts- und Kontrollbedingungen aktiviert sind und damit die beidseits aktivierten Voxel nicht mehr als aktivierte Voxel erkannt werden.

4.2.2.1.3 PPC:

Der PPC, der posteriore parietale Kortex, wurde zunächst als Areal angesehen, welches auf dem Gyrus postcentralis lokalisiert ausschließlich ein sensomotorisches Areal darstellt. Das PPC stellt die Hauptverbindung zwischen visuellem und motorischem Kortex zur Verknüpfung von komplexen Aufgaben dar, bei denen eine motorische Reaktion auf einen visuellen Reiz erfolgt. Hier finden wesentliche Verarbeitungsschritte der visuomotorischen Transformation statt, aber auch die Verarbeitung von somatosensiblen Afferenzen in erster Linie zur motorischen Kontrolle (Rizzolatti et al. 1997; Rademacher et al. 2001). In den letzten Jahren zeigte sich aber auch im PPC eine motorische Aktivierung, mehrere Studien legen daher eine „echte“, direkte Beteiligung an der Ausführung einer motorischen Bewegung nahe (Zilles & Palomero-Gallagher 2001; Grezes & Decety 2001).

In der durchgeführten Studie zeigte sich ipsilateral zur real durchgeführten Bewegung keine vermehrte oder verringerte Aktivierung des PPC unter der Kontrollbedingung der „Vorstellung einer Bewegung“. Daher konnte das PPC nicht zur Differenzierung herangezogen werden, um eine sichere Unterscheidung zwischen SM1 und PPC ipsilateral zu einer realen Bewegung zu unterscheiden.

Zusammenfassend bleibt zu sagen, dass die „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung in einem Versuchsparadigma offensichtlich zwar die übergeordneten planenden Areale aktiviert, wie aus der Literatur zu ersehen ist, jedoch einen zu geringen Anteil an der Aktivierung der „exekutiven“ Areale ausmacht, um hier dazu beitragen zu können, die direkt benachbart lokalisierten Areale SM1 und PPC voneinander sicher differenzieren zu können. Im Falle von anatomischen Veränderungen, wie z.B. bei einem Hirntumor oder einem Ödem kann sich daher auf dieses Paradigma nicht verlassen werden, um mit hoher Sicherheit das SM1 schonen zu können.

4.2.3 Fazit 6

Die „Vorstellung der Bewegung“ als Kontrollbedingung brachte keinen Vorteil gegenüber der Kontrollbedingung „Ruhe“.

Die Kontrollbedingung der „Vorstellung einer Bewegung“ zeigte keinen Vorteil gegenüber der „Ruhe“, sowohl das ipsilaterale SM1 als auch die sekundärmotorischen Areale wiesen annähernd gleiche Voxelverteilung auf. Dieses Paradigma erleichtert das Auffinden des ipsilateralen SM1 nicht im Vergleich zur „konventionellen“ Kontrollbedingung der „Ruhe“.

4.3 Short-TR: Time courses mit kurzer Periodenzeit (5%-Map)

4.3.1 Wichtige Ergebnisse

Beim Vergleich von 5 getesteten Referenzfunktionen mit den Time courses der jeweiligen ROIs konnte weder kontra- noch ipsilateral eine Referenzfunktion gefunden werden, die signifikant den Zeitverlauf des SM1 „bevorzugt“ und den des PPC „benachteiligt“.

4.3.2 Ergebnisdiskussion vor dem Hintergrund der Literatur

In der vorliegenden Studie lag der Schwerpunkt der Arbeit auf alternativen Methoden zur sicheren Detektion des ipsilateral zu einer Bewegung liegenden SM1.

In der Literatur liegt die durchschnittliche Zeit im SM1 zwischen dem Beginn einer Bewegung und der Signalveränderung in der ROI bei ca. 2 bis 7 Sekunden (Weilke et al. 2001; Halsband et al. 1994; Ugurbil et al. 1999; Kwong et al. 1992). Eine Bewegung wird zunächst in einem sekundärmotorischen „Planungszentrum“ vorbereitet und dann über das primärmotorische Areal an die Peripherie weitergeleitet (output). In einigen Studien konnte diese zeitliche Reihenfolge nachgewiesen werden, die jeweils den Beginn der Aktivierung erfasst (Mohamed et al. 2003; Weilke et al. 2001; Lee et al. 1999; Richter et al. 1997; Kim et al. 1997). Weitere Untersuchungen zeigten einen zeitlichen Unterschied in dem Beginn des aktivierten Signales zwischen den benachbarten Venen und dem eigentlichen Parenchym, in dem das eigentliche motorische Zentrum liegt, wobei die hämodynamischen Veränderungen in den Venen im Mittel eine etwas längere Zeit zur Aktivierung aufwiesen (Krings et al. 1999; Frahm et al. 1994). Zudem weisen mehrere Studien eine unterschiedlich starke Aktivierung der einzelnen Areale bei der Planung oder der konkreten Ausführung einer Bewegung nach (Richter et al. 1997; Kim et al. 1997; Hara et al. 2001). In der hier durchgeführten Methode wurde daher der Shift der Referenzfunktionen ebenso variiert wie der Slope, um einen unterschiedlichen Beginn und Anstieg der verschiedenen Time courses zu erfassen. Damit sollte eine möglichst große Spanne zwischen dem Time course des SM1 und dem des PPC erfasst werden.

Unter der Annahme eines unterschiedlichen Anstieges des Time courses sowie eines verzögerten Beginnes der Aktivierung von Voxeln in primärmotorischen Arealen gegenüber den planenden sekundärmotorischen Arealen wurden 5 verschiedene Referenzfunktionen mit den verschiedenen Time courses aus den kontra- und ipsilateralen ROIs verglichen. Dabei galt die Suche einer Referenzfunktion, welche möglichst den Time

course des SM1 bevorzugt und gleichzeitig eine hohe Differenz zu dem anatomisch benachbarten PPC aufweist. Insgesamt zeigten alle Referenzfunktionen eine relativ hohe Ähnlichkeit zu allen Time courses, ein statistisch signifikanter Unterschied ließ sich nicht darstellen. Obwohl sich optisch das kontralaterale SM1 in seinem Aktivitätsniveau von den drei kontralateralen sekundärmotorischen Zentren abhob, konnte keine Referenzfunktion hergestellt werden, die diesen Unterschied sicher statistisch nachvollziehen konnte. Ipsilateral wiesen die Time courses bereits optisch eine hohe Ähnlichkeit auf.

4.3.3 Fazit 7

Keine der REF bevorzugte signifikant den Time course des SM1 bei gleichzeitiger Benachteiligung des PPC.

In der Untersuchung mittels Short-TR ließ sich keine REF finden, die signifikant den Time course des SM1 bevorzugt und den des PPC hinten anstellt. Optisch zeigte zwar das kontralaterale SM1 einen höheren Aktivitätsgrad, insbesondere auf der ipsilateral zur Bewegung gelegenen Hirnhälfte unterschieden sich die Time courses der jeweiligen ROIs jedoch nicht in einem statistisch signifikanten Rahmen, so dass die Referenzfunktionen nicht dazu dienten, gezielt das ipsilaterale SM1 „herauszufiltern“ und es insbesondere gegenüber dem PPC abzugrenzen.

4.4 Schlussfolgerungen:

Die vorliegende Studie befasste sich schwerpunktmäßig mit dem Problem der Darstellung des Primärmotorischen Areals (SM1), wenn z.B. aufgrund eines Hirntumors eine Hemiparese vorliegt und das kontralaterale SM1 nicht direkt selbst aktiviert und im fMRT dargestellt werden kann. In der durchgeführten Studie fanden sich einige recht hilfreiche Ansätze zur exakteren Lokalisation des SM1, das Problem bei einer Hemiparese das kontralateral lokalisierte SM1 aufzufinden und sicher vom dorsal benachbarten PPC unterscheiden zu können, ließ sich aber mit den hier verwendeten Ansätzen nicht lösen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- 1.) Das Bewegungsparadigma „Rechts gegen Links“ ist das beste Paradigma zur selektiven Lokalisation des SM1.

- 2.) Zur selektiven Detektion des SM1 ist eine 1%-Map besser geeignet als eine 5%-Map, da hier das SM1 selektiv betont wird.
- 3.) Zur Betrachtung der sekundärmotorischen Areale ist eine 5%-Map besser geeignet als eine 1%-Map. Zur Detektion vor allem der sekundärmotorischen Areale ist die Darstellung von 5% der aktivierten Voxel zu bevorzugen, da sich zum einen bei einer 1%-Map in sekundärmotorischen Arealen nur sehr wenige bis keine aktivierten Voxel nachweisen ließen, dies in der 5%-Map jedoch kein Problem war.
- 4.) Zur Beurteilung der kontralateralen Seite kann, wenn „Rechts gegen Links“ nicht möglich ist, „Bewegung gegen Ruhe“ als Bewegungsparadigma eingesetzt werden, wobei sich das kontralaterale SM1 signifikant geringer aktiv als bei „Rechts gegen Links“ zeigt. Wie oben beschrieben ist dies auf die Besonderheit des Vergleichsparadigmas „Ruhe“ zurückzuführen. Zwischen der Darstellung von 1% oder 5% der aktiven Voxel zeigte sich keine statistisch signifikante Differenz. Ebenfalls fand sich keine statistisch signifikante Differenz zwischen den Paradigmen „Rechts gegen Ruhe“ und „Links gegen Ruhe“ bei den ausschließlich rechtshändigen Probanden.
- 5.) Zur selektiven Beurteilung des ipsilateralen SM1 ist das Paradigma „Bewegung gegen Ruhe“ nicht in der Lage, da es nicht sicher zwischen ipsilateralem SM1 und PPC differenziert. Bei dem Bewegungsparadigma „Bewegung gegen Ruhe“ findet sich zwar ipsilateral eine Mitaktivierung des SM1 von ca. 25 – 30%, jedoch sehr ähnlich wie die Aktivität des anatomisch direkt benachbarten PPC. Daher besteht insbesondere bei anatomisch veränderter Hirnstruktur die Gefahr, nicht sicher zwischen den beiden Arealen unterscheiden zu können und das SM1 intraoperativ nicht optimal zu schonen.
- 6.) Die Hinzunahme der „Vorstellung einer Bewegung“ als Kontrollbedingung anstelle der „Ruhe“ brachte keine signifikante Besserung gegenüber der Mitaktivierung. Die Verteilung der aktiven Voxel glich denen des Paradigmas „Bewegung gegen Ruhe“. Daher ist die „Vorstellung einer Bewegung“ in diesem Kontext kein sinnvolles Vergleichsparadigma.
- 7.) In der Untersuchung mittels Short-TR ließ sich keine REF finden, die signifikant den Time course des SM1 bevorzugt und den des PPC hintenanstellt. Optisch zeigte zwar das kontralaterale SM1 einen höheren Aktivitätsgrad, insbesondere ipsilateral zur Bewegung unterschieden sich die Time courses der jeweiligen ROIs jedoch nicht statistisch signifikant.

5 Literaturverzeichnis

1. Bandettini PA, Jesmanowicz A, Wong EC, Hyde JS. **Processing strategies for Time course data sets in functional MRT of the human brain.** Magn Reson Med. 1993; 30(2):161-73.
2. Bandettini PA, Wong EC, Hinks RS, Tikofsky RS, Hyde JS. **Time course EPI of human brain function during task activation.** Magn Reson Med. 1992; 25(2):390-7.
3. Belliveau JW, Cohen MS, Weisskoff RM, Buchbinder BR, Rosen BR. **Functional studies of the human brain using high-speed magnetic resonance imaging.** J Neuroimaging. 1991;1(1):36-41.
4. Blamire AM, Ogawa S, Ugurbil K, Rothman D, McCarthy G, Ellermann JM, Hyder F, Rattner Z, Shulman RG. **Dynamic mapping of the human visual Kortex by high-speed magnetic resonance imaging.** Proc Natl Acad Sci USA. 1992; 89(22):11069-73.
5. Boecker H, Dagher A, Ceballos-Baumann AO, Passingham RE, Samuel M, Friston KJ, Poline J, Dettmers C, Conrad B, Brooks DJ. **Role of the human rostral supplementary motor area and the basal ganglia in motor sequence control: investigations with H2 15O PET.** J Neurophysiol. 1998; 79(2):1070-80.
6. Boecker H, Kleinschmidt A, Requardt M, Hanicke W, Merboldt KD, Frahm J. **Functional cooperativity of human cortical motor areas during self-paced simple finger movements. A high-resolution MRT study.** JBrain. 1994; 117 (Pt 6):1231-9.
7. Broca PP. **Perte de la Parole, Ramollissement Chronique et Destruction Partielle du Lobe Antérieur Gauche du Cerveau.** Bulletin de la Société Anthropologique. 1861; 2: 235-8.
8. Bucher SF, Seelos KC, Stehling MK, Oertel WH, Reiser M. **Possibilities of technical and methodological optimization of functional magnetic resonance tomography.** Radiologe. 1995; 35(4):228-36. Review. German.
9. Buchner H, Adams L, Knepper A, Ruger R, Laborde G, Gilsbach JM, Ludwig I, Reul J, Scherg M. **Preoperative localization of the central sulcus by dipole source analysis of early somatosensory evoked potentials and three-dimensional magnetic resonance imaging.** J Neurosurg. 1994; 80(5):849-56.
10. Bucholz RD. **The central sulcus and surgical planning.** AJNR Am J Neuroradiol. 1993; 14(4):926-7.
11. Bucy P, Fulton JF. **Ipsilateral representation in the premotor Kortex of monkeys.** Brain. 1933; 56:318-42.
12. Cao Y, Towle VL, Levin DN, Balter JM. **Functional mapping of human motor cortical activation with conventional MR Imaging at 1.5 T.** Magn Reson Imaging. 1993; 3: 869-75.120.
13. Chen R, Gerloff C, Hallett M, Cohen LG. **Involvement of the ipsilateral motor Kortex in finger movements of different complexities.** Ann Neurol. 1997; 41(2):247-54.
14. Colebatch JG, Deiber MP, Passingham RE, Friston KJ, Frackowiak RS. **Regional cerebral blood flow during voluntary arm and hand movements in human subjects.** J Neurophysiol. 1991; 65(6):1392-401.
15. Connelly A, Jackson GD, Frackowiak RSJ, Belliveau JW, Vargha-Khadem F, Gadian DG. **Functional mapping of activated human primary Kortex with a clinical MR imaging system.** Radiology. 1993; 188: 125-30.
16. Culham JC, Kanwisher NG. **Neuroimaging of Cognitive Functions in Human Parietal Kortex.** Curr Opin Neurobiol. 2001; 11:157-63.
17. Deecke L, Scheid P, Kornhuber HH. **Distribution of readiness potential, pre-motion positivity, and motor potential of the human cerebral Kortex preceding voluntary finger movements.** Exp Brain Res. 1969; 7(2):158-68.
18. Deiber MP, Passingham RE, Colebatch JG, Friston KJ, Nixon PD, Frackowiak RS. **Cortical areas and the selection of movement: a study with positron emission tomography.** Exp Brain Res. 1991; 84(2):393-402.
19. Deppe M, Knecht S, Papke K, Lohmann H, Fleischer H, Heindel W, Ringelstein EB, Henningsen H. **Assessment of hemispheric language lateralization: a comparison between fMRT and fTCD.** J Cereb Blood Flow Metab. 2000; 20(2):263-8.
20. Desmedt JE. **Motor control mechanisms in health and disease. Advances in neurology.** Raven. 1983; Vol.39.
21. Detre JA, Floyd TF. **Functional MRT and its applications to the clinical neurosciences.** Neuroscientist. 2001; 7(1):64-79.
22. Dieterich M, Bense S, Stephan T, Yousry TA, Brandt T. **fMRT signal increases and decreases in cortical areas during small-field optokinetic stimulation and central fixation.** Exp Brain Res. 2003; 148(1):117-27.
23. Ebeling U, Schmid UD, Ying Z. **Mapping in tumor surgery of the central region.** Schweiz Rundsch Med Prax. 1991; 80(47):1318-23. German.

24. Ebeling U, Steinmetz H, Huang YX, Kahn T. **Topography and identification of the inferior precentral sulcus in MR imaging.** AJR Am J Roentgenol. 1989; 153(5):1051-6.
25. Fox PT, Raichle ME. **Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxydative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects.** Proc Natl Acad Sci USA. 1986; S 1140-4.
26. Frahm J, Merboldt KD, Hanicke W, Kleinschmidt A, Boecker H. **Brain or vein — oxygenation or flow? On signal physiology in functional MRT of human brain activation.** NMR Biomed. 1994 Mar; 7(1-2):45-53.
27. Friston KJ, Jezzard P, Turner R. **Analysis of Functional MRT Series.** Hum Brain Mapp. 1994; 1:153-71.
28. Gallen CC, Bucholz R, Sobel DF. **Intracranial neurosurgery guided by functional imaging.** Surg Neurol. 1994; 42(6):523-30.
29. Gering DT, Weber DM. **Intraoperative, real-time, functional MRT.** J Magn Reson Imaging. 1998; 8(1):254-7.
30. Glover GH, Noll DC. **Consistent projection reconstruction (CPR) techniques for MRT.** Magn Reson Med. 1993; 29(3):345-51.
31. Gordon AM, Lee JH, Flament D, Ugurbil K, Ebner TJ. **Functional magnetic resonance imaging of motor, sensory, and posterior parietal cortical areas during performance of sequential typing movements.** Exp Brain Res. 1998; 121(2):153-66.
32. Grezes J, Decety J. **Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis.** Hum Brain Mapp. 2001; 12(1):1-19.
33. Hajnal JV, Myers R, Oatridge A, Schwieso JE, Young IR, Bydder GM. **Artifacts due to stimulus correlated motion in functional imaging of the brain.** Magn Reson Med. 1994; 31(3):283-91.
34. Halsband U, Matsuzaka Y, Tanji J. **Neuronal activity in the primate supplementary, pre-supplementary and premotor Kortex during externally and internally instructed sequential movements.** Neurosci Res. 1994; 20(2):149-55.
35. Hara Y, Nakamura M, Tamaki N, Tamura S, Kitamura J. **Task-related signal decrease on functional magnetic resonance imaging.** Neurol Med Chir. 2001; 41(10):479-87.
36. Henning J, Speck O, Lönneker T, Janz C. **Grundlagen der funktionellen Magnetresonanztomographie.** Radiologe. 1995; 35(4):221-7.
37. Heun R, Meyer-Lindenberg A. **Statistische Verfahren in der Analyse von funktionellen MRT-Paradigmen.** Klein Neuroradiologie. 2001; 11:67-82.
38. Holodny AI, Schulder M, Liu WC, Wolko J, Maldjian JA, Kalnin AJ. **The effect of brain tumors on BOLD functional MR imaging activation in the adjacent motor Kortex: implications for image-guided neurosurgery.** AJNR Am J Neuroradiol. 2000; 21(8):1415-22.
39. Kahn T, Schwabe B, Bettag M, Harth T, Ulrich F, Rassek M, Schwarzmaier HJ, Modder U. **Mapping of the cortical motor hand area with functional MR imaging and MR imaging-guided laser-induced interstitial thermotherapy of brain tumors. Work in progress.** Radiology. 1996; 200(1):149-57.
40. Karni A, Meyer G, Jezzard P, Adams MM, Turner R, Ungerleider LG. **Functional MRT evidence for adult motor Kortex plasticity during motor skill learning.** Nature. 1995;377(6545):155-8.
41. Kido DK, LeMay M, Levinson AW, Benson WE. **Computed tomographic localization of the precentral gyrus.** Radiology. 1980; 135(2):373-7.
42. Kim SG, Richter W, Ugurbil K. **Limitations of temporal resolution in functional MRT.** Magn Reson Med. 1997; 37(4):631-6.
43. Kober H, Nimsky C, Moller M, Hastreiter P, Fahlbusch R, Ganslandt O. **Correlation of sensorimotor activation with functional magnetic resonance imaging and magnetoencephalography in presurgical functional imaging: a spatial analysis.** Neuroimage. 2001; 14(5):1214-28.
44. Krings T, Erberich SG, Roessler F, Reul J, Thron A. **MR blood oxygenation level-dependent signal differences in parenchymal and large draining vessels: implications for functional MR imaging.** AJNR Am J Neuroradiol. 1999; 20(10):1907-14.
45. Krings T, Reinges MH, Erberich S, Kemeny S, Rohde V, Spetzger U, Korinth M, Willmes K, Gilsbach JM, Thron A. **Functional MRT for presurgical planning: problems, artefacts, and solution strategies.** J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2001; 70(6):749-60.
46. Krings T, Reul J, Spetzger U, Klusmann A, Roessler F, Gilsbach JM, Thron A. **Functional magnetic resonance mapping of sensory motor Kortex for image-guided neurosurgical intervention.** Acta Neurochir (Wien). 1998; 140(3):215-22.

47. Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, Goldberg IE, Weisskoff RM, Poncelet BP, Kennedy DN, Hoppel BE, Cohen MS, Turner R, et al. **Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation.** Proc Natl Acad Sci USA. 1992;89(12):5675-9
48. Lanfermann H, Heindel W, Schaper J, Schroder R, Hansmann ML, Lehrke R, Ernestus RI, Lackner K. **CT and MR imaging in primary cerebral non-Hodgkin's lymphoma.** Acta Radiol. 1997; 38(2):259-67.
49. Le Bihan D, Karni A. **Applications of magnetic resonance imaging to the study of human brain function.** Curr Opin Neurobiol. 1995; 5(2):231-7.
50. Leblanc R, Meyer E, Bub D, Zatorre RJ, Evans AC. **Language localization with activation positron emission tomography scanning.** Neurosurgery 1992 Aug;31(2):369-73.
51. Lee KM, Chang KH, Roh KJ. **Subregions within the supplementary motor area activated at different stages of movement preparation and execution.** NeuroImage. 1999; 9:117-23.
52. Lundquist P, Backlund EO, Sjoqvist L, Thoumas KA, Wigstrom L, Brismar T. **Clinical application of functional magnetic resonance imaging (fMRT) to surgery in the brain.** J Neuroimaging. 1997; 7(2):131-3.
53. Mao H, Berns GS. **MRT in the Study of Brain Function: Clinical perspectives.** Medicamundi. 2002; 46,1: 28-38.
54. Mohamed MA, Yousem DM, Tekes A, Browner NM, Calhoun VD. **Timing of cortical activation: a latency-resolved event-related functional MR imaging study.** AJNR Am J Neuroradiol. 2003; 24(10):1967-74.
55. Moller M, Freund M, Greiner C, Schwindt W, Gaus C, Heindel W. **Real time fMRT: a tool for the routine presurgical localisation of the motor Kortex.** Eur Radiol. 2005; 15(2):292-5.
56. Moritz CH, Meyerand ME, Cordes D, Haughton VM. **Functional MR imaging activation after finger tapping has a shorter duration in the basal ganglia than in the sensorimotor Cortex.** AJNR Am J Neuroradiol. 2000; 21(7):1228-34.
57. Naidich TP, Hof PR, Yousry TA, Yousry I. **The motor Kortex: anatomic substrates of function.** Neuroimaging Clin N Am. 2001; 11(2):171-93.
58. Naidich TP, Valavanis AG, Kubik S. **Anatomic relationships along the low-middle convexity: Part I-Normal specimens and magnetic resonance imaging.** Neurosurgery. 1995; 36(3):517-32.
59. Nyberg-Hansen R, Rinvik E. **Some comments on the pyramidal tract, with special reference to its individual variations in man.** Acta Neurol Scand 1963; 39: 1-30.
60. Ogawa S, Menon RS, Tank DW, Kim SG, Merkle H, Ellermann JM, Ugurbil K. **Functional brain mapping by blood oxygenation level-dependent contrast magnetic resonance imaging. A comparison of signal characteristics with a biophysical model.** Biophys J. 1993; 64(3):803-12.
61. Ogawa S, Tank DW, Menon R, Ellermann JM, Kim SG, Merkle H, Ugurbil K. **Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging.** Proc Natl Acad Sci USA. 1992; 89(13):5951-5.
62. Ojemann JG, Miller JW, Silbergeld DL. **Preserved function in brain invaded by tumor.** Neurosurgery. 1996; 39(2):253-9.
63. Orrison WW Jr, Rose DF, Hart BL, Maclin EL, Sanders JA, Willis BK, Marchand EP, Wood CC, Davis LE. **Noninvasive preoperative cortical localization by magnetic source imaging.** AJNR Am J Neuroradiol. 1992; 13(4):1124-8.
64. Papke K, Hellmann T, Renger B, Morgenroth C, Knecht S, Schuierer G, Reimer P. **Clinical applications of functional MRT at 1.0 T: motor and language studies in healthy subjects and patients.** Eur Radiol. 1999; 9(2): 211-20.
65. Papke K, Reimer P, Renger B, Schuierer G, Knecht S, Schukz M, Heindel W. **Optimized Activation of the Primary Sensorimotor Kortex for Clinical Functional MR Imaging.** AJNR. 2000; 21: 395-401.
66. Penfield W, Boldrey E. **Somatic motor and sensory representation in the cerebral Kortex of man as studied by electrical stimulation.** Brain. 1937; 60: 389-443.
67. Penfield W, Rasmussen T. **The cerebral Kortex of man.** New York: Macmillan 1950.
68. Porro CA, Francescato MP, Cettolo V, et al.. **Primary motor and sensory Kortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study.** J Neurosci. 1996; 16: 7688-98.
69. Pujol J, Conesa G, Deus J, Lopez-Obarrio L, Isamat F, Capdevila A. **Clinical application of functional magnetic resonance imaging in presurgical identification of the central sulcus.** J Neurosurg. 1998; 88(5):863-9.
70. Pujol J, Conesa G, Deus J, Vendrell P, Isamat F, Zannoli G, Marti-Vilalta JL, Capdevila A. **Presurgical identification of the primary sensorimotor Kortex by functional magnetic resonance imaging.** J Neurosurg. 1996; 84(1):7-13.
71. Rademacher J, Burgel U, Geyer S, Schormann T, Schleicher A, Freund HJ, Zilles K. **Variability and asymmetry in the human precentral motor system. A cytoarchitectonic and myeloarchitectonic brain mapping study.** Brain. 2001; 124:2232-58.

72. Rao SM, Bandettini PA, Binder JR, Bobholz JA, Hammeke TA, Stein EA, Hyde JS. **Relationship between finger movement rate and functional magnetic resonance signal change in human primary motor Kortex.** *J Cereb Blood Flow Metab.* 1996; 16(6):1250-4.
73. Reiser M, Brandt T. **Functional magnetic resonance tomography of the brain.** *Radiologe.* 1995;35(4):220.
74. Richter W, Andersen PM, Georgopoulos AP, Kim SG. **Sequential activity in human motor areas during a delayed cued finger movement task studied by time-resolved fMRT.** *Neuroreport.* 1997; 8(5):1257-61.
75. Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V. **Parietal Kortex: from sight to action.** *Curr Opin Neurobiol.* 1997 Aug; 7(4):562-7. Review.
76. Roberts TP, Ferrari P, Perry D, Rowley HA, Berger MS. **Presurgical mapping with magnetic source imaging: comparisons with intraoperative findings.** *Brain Tumor Pathol.* 2000; 17(2):57-64.
77. Roland PE. **Organization of motor control by the normal human brain.** *Hum Neurobiol.* 1984; 2(4):205-16.
78. Rosenbaum DA. **Human motor control.** Academic, San Diego, 1991.
79. Roux FE, Boulanouar K, Ibarrola D, Tremoulet M, Henry P, Manelfe C, Berry I. **Importance and limitations of the validation of functional MRT of motor function and language using preoperative cortical stimulation.** *J Neuroradiol.* 1999; 26:S82-8. (French).
80. Rumeau C, Tzourio N, Murayama N, Peretti-Viton P, Levrier O, Joliot M, Mazoyer B, Salamon G. **Location of hand function in the sensorimotor Kortex: MR and functional correlation.** *AJNR Am J Neuroradiol.* 1994; 15(3):567-72.
81. Sadato N, Campbell G, Ibanez V, Deiber M, Hallett M. **Complexity affects regional cerebral blood flow change during sequential finger movements.** *J Neurosci.* 1996; 16(8):2691-700
82. Sanes JN, Donoghue JP. **Plasticity and primary motor Kortex.** *Annu Rev Neurosci.* 2000; 23:393-415. Review.
83. Santosh CG, Rimmington JE, Best JJ. **Functional magnetic resonance imaging at 1 T: motor Kortex, supplementary motor area and visual Kortex activation.** *Br J Radiol.* 1995; 68: 369-74.
84. Schad LR, Trost U, Knopf MV, Müller E, Lorenz WJ. **Motor Kortex stimulation measured by magnetic resonance imaging on a standard 1.5 T clinical scanner.** *Magn Reson Imaging.* 1993; 4:461-4.
85. Schulder M, Maldjian JA, Liu WC, Holodny AI, Kalnin AT, Mun IK, Carmel PW. **Functional image-guided surgery of intracranial tumors located in or near the sensorimotor Kortex.** *J Neurosurg.* 1998; 89(3):412-8.
86. Schulder M, Maldjian JA, Liu WC, Mun IK, Carmel PW. **Functional MRT-guided surgery of intracranial tumors.** *Stereotact Funct Neurosurg.* 1997; 68(1-4 Pt 1):98-105.
87. Shibasaki H, Sadato N, Lyshkow H, Yonekura Y, Honda M, Nagamine T, Suwazono S, Magata Y, Ikeda A, Miyazaki M, et al. **Both primary motor Kortex and supplementary motor area play an important role in complex finger movement.** *Brain.* 1993; 116 (Pt 6):1387-98.
88. Skirboll SS, Ojemann GA, Berger MS, Lettich E, Winn HR. **Functional Kortex and subcortical white matter located within gliomas.** *Neurosurgery.* 1996; 38(4):678-85.
89. Sobel DF, Gallen CC, Schwartz BJ, Waltz TA, Copeland B, Yamada S, Hirschkoff EC, Bloom FE. **Locating the central sulcus: comparison of MR anatomic and magnetoencephalographic functional methods.** *AJNR Am J Neuroradiol.* 1993; 14(4):915-25.
90. Steinmetz H, Furst G, Freund HJ. **Variation of perisylvian and calcarine anatomic landmarks within stereotaxic proportional coordinates.** *AJNR Am J Neuroradiol.* 1990; 11(6):1123-30.
91. Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, Frackowiak RS. **Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects.** *J Neurophysiol.* 1995; 73(1):373-86.
92. Stephan KM, Frackowiak RS. **Recovery from subcortical stroke-PET activation patterns in patients compared with healthy subjects.** *Adv Neurol.* 1997; 73:311-20.
93. Strupp JP. **'STIMULATE' a GUI based fMRT analysis software package.** *Neuroimage.* 1996; 3:607.
94. Sunaert S, Yousry TA. **Clinical applications of functional magnetic resonance imaging.** *Neuroimaging Clin N Am.* 2001; 11(2):221-36.
95. Tanji J, Shima K. **Role for supplementary motor area cells in planning several movements ahead.** *Nature.* 1994; 371(6496):413-6.
96. Tanji J. **The supplementary motor area in the cerebral Kortex.** *Neurosci Res.* 1994; 19(3):251-68.
97. Turner R, Howseman A, Rees GE, Josephs O, Friston K. **Functional magnetic resonance imaging of the human brain: data acquisition and analysis.** *Exp Brain Res.* 1998; 123(1-2):5-12. Review.

98. Turner R, Jezzard P, Wen H, et al. **Functional mapping of the human visual Kortex at 4 and 1,5 T using desoxygenation contrast.** *EPI. Magn Reson Med.* 1993; 29:277-9.
99. Ugurbil K, Hu X, Chen W, Zhu XH, Kim SG, Georgopoulos A. **Functional mapping in the human brain using high magnetic fields.** *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 1999; 354(1387):1195-213.
100. Van Oostende S, van Hecke P, Sunaert S, Nuttin B, Marchal G. **fMRT studies of the supplementary motor area and the premotor Kortex.** *Neuroimage.* 1997; 6: 181-90.
101. Wassermann EM, Pascual-Leone A, Hallet M. **Cortical motor representation of the ipsilateral hand and arm.** *Exp Brain Res.* 1994; 100:121-132.
102. Weilke F, Spiegel S, Boecker H, von Einsiedel HG, Conrad B, Schwaiger M, Erhard P. **Time resolved fMRT of activation patterns in M1 and SMA during complex voluntary movement.** *J Neurophysiol.* 2001; 85(5):1858-1863.
103. Wiesendanger M. Kapitel 5 **Motorische Systeme** in Schmidt RF, Thews G. **Physiologie des Menschen.** 26. Auflage, Springer-Verlag Berlin; Heidelberg. 1995.
104. Wildgruber D, Erb M, Klose U, Grodd W. **Sequential activation of supplementary motor area and primary motor Kortex during self-paced finger movement in human evaluated by functional MRT.** *Neurosci Lett.* 1997; 227(3):161-4.
105. Yetkin FZ, Papke RA, Leighton PM, Daniels DL, Mueller WM, Haughton VM. **Location of the sensorimotor Cortex: functional and conventional MR compared.** *AJNR.* 1995; 16: 2109-13.
106. Yousry I, Naidich TP, Yousry TA. **Functional magnetic resonance imaging: factors modulating the cortical activation pattern of the motor system.** *Neuroimaging Clin N Am.* 2001 May;11(2):195-202.
107. Yousry TA, Schmid UD, Alkadhi H, Schmidt D, Peraud A, Buettner A, Winkler P. **Localization of the motor hand area to a knob on the precentral gyrus. A new landmark.** *Brain.* 1997;120 (Pt 1):141-57.
108. Yousry TA, Schmid UD, Jassoy AG, Schmidt D, Eisner WE, Reulen HJ, Reiser MF, Lissner J. **Topography of the cortical motor hand area: prospective study with functional MR imaging and direct motor mapping at surgery.** *Radiology.* 1995; 195(1):23-9.
109. Yousry TA, Schmid UD, Schmidt D, Hagen T, Jassoy A, Reiser MF. **The central sulcal vein: a landmark for identification of the central sulcus using functional magnetic resonance imaging.** *J Neurosurg.* 1996; 85(4):608-17.
110. Zilles K, Palomero-Gallagher N. **Cyto-, myelo-, and receptor architectonics of the human parietal Kortex.** *Neuroimage.* 2001; 14:18-20. Review.

6 Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas danke ich Herrn Professor Heindel, der mir die Möglichkeit gab, die fMRT-Untersuchung am Institut für klinische Radiologie durchzuführen.

Herrn Professor Bothe aus dem Institut für Neurochirurgie danke ich für das Interesse an der Untersuchung und die Begutachtung der vorliegenden Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Karsten Papke, der mich kompetent und kreativ betreut hat. Seinen unermüdlichen Ideen und geduldigen Hinweisen verdanke ich die Realisierung und Strukturierung des Themas. Besonders dankbar bin ich über die vielen zeitaufwendigen Diskussionen, die mich nicht den roten Faden verlieren ließen.

Meinem Mit-Doktoranden Herrn Jörg Poggenborg bin ich ebenfalls für die vielen gemeinsamen Stunden am Siemens-Vision und für die umfangreichen inhaltlichen Diskussionen dankbar.

Meine Familie hat mich mit besonders geduldiger Unterstützung bedacht. In all den Jahren haben sie an mich geglaubt und mich angespornt diese Arbeit fertig zu stellen.

Weiterhin danke ich Frau Heike und Herrn Oliver Löwen für ihre Unterstützung auch in Zeiten, in denen nicht alles geradeaus lief.

Mein letzter Dank gilt Herrn Andreas Epping, der voller Verständnis und Geduld die entgeltige Fertigstellung dieser Arbeit mitbegleitet und nervenstark Korrektur gelesen hat.

8 Anhang

Technischer Versuchsablauf

2.) Patienten/Probandendaten eingeben

| | | | | |
|---------|----------|------|-------|---------|
| Patient | Register | Name | Alter | Gewicht |
|---------|----------|------|-------|---------|

| |
|-------------|
| male/female |
| Head first |
| Supine |
| Cranial |
| Anatomical |
| Go |

2.) Proband/Patient in Kopfspule lagern und in MRT schieben

Übersichtsscout wird automatisch angefertigt 2 mal laut

3.) Sagitalen Localizer (sagittalen Scout) anfertigen

| | | | | | | |
|-----------------|---------------|---------|------------------|-----------|---------|-------------|
| Protocol change | Protocol name | List up | Functional_Brain | Scout_Sag | Measure | 0 Sek. laut |
|-----------------|---------------|---------|------------------|-----------|---------|-------------|

mit angucken und mit abspeichern

4.) Schichtebene positionieren

| | | | | | | |
|-----------------|---------------|---------|------------------|---------------------------------|----------|---------|
| Protocol Change | Protocol Name | List up | Functional_Brain | epi scout TRA Motor_Kortex 1 | Position | Measure |
|-----------------|---------------|---------|------------------|---------------------------------|----------|---------|

abspeichern mit

5.) T1 gewichtete Aufnahme erstellen

| | | | | | |
|---------------|------------------|-----------|---------|------------------|----------------------|
| Protocol Name | Functional_Brain | T1 Se-TRA | History | Slice parameters | HFB TRA Motor Kortex |
|---------------|------------------|-----------|---------|------------------|----------------------|

| | |
|---------|--------------|
| Measure | 1,5 min laut |
|---------|--------------|

6.) Functional-imaging-Messung

| | | | |
|---------------|--------------------|---------|---|
| Protocol Name | Epi Motor Kortex 1 | History | Functional brain / Epi scout TRA Motor Kortex 1 |
|---------------|--------------------|---------|---|

Information über Beginn der eigentlichen Messung geben. Beginn der Fingerbewegungen nach Ansage der jeweiligen Hand, nach jeder 10. Messung neue Ansage. Proband soll mitzählen vermeiden!

| | |
|---------|----------------------|
| Measure | mehrmals länger laut |
|---------|----------------------|

Untersuchungsschema:

| | | | | | | | |
|------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| 0-5 | 6-15 | 16-25 | 26-35 | 36-45 | 46-55 | 56-65 | 66-70 |
| Ruhe | Li/Re | Ruhe | Li/Re | Ruhe | Li/Re | Ruhe | Ruhe |
| Ruhe | Re | Li | Re | Li | Re | Li | Ruhe |
| Ruhe | Re | Vor Re/Li | Re | Vor Re/Li | Re | Vor Re/Li | Ruhe |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 0-5 | 6-15 | 16-25 | 26-35 | 36-45 | 46-55 | 56-65 | 66-75 | 76-85 | 86-95 | 96-105 | 106-115 | 116-125 | 126-130 |
| Ru | Li/Re | Ru | Re/ Li | Ru | Li/Re | Ru | Re/ Li | Ru | Li/Re | Ru | Re/ Li | Ru | Ru |

8.) Proband aus MRT herausfahren

9.) Protokoll eintragen

10.) Auswertung

8.1.1.1 „Rechts gegen Ruhe“ (ReRu) (1%-Map)

Tabelle: Verteilungsmuster „Rechts gegen Ruhe“ (1%-Map)

| Areal | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|-------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Prob | | | | | | | | | | | | |
| P1 | 0 | 10 | 13 | 33 | 14 | 8 | 36 | 93 | 27 | 51 | 63 | 144 |
| P2 | 0 | 24 | 39 | 23 | 16 | 8 | 41 | 91 | 55 | 55 | 96 | 146 |
| P3 | 18 | 13 | 11 | 74 | 17 | 17 | 25 | 72 | 46 | 104 | 71 | 176 |
| P4 | 1 | 13 | 12 | 36 | 5 | 56 | 15 | 114 | 18 | 105 | 33 | 219 |
| P5 | 2 | 1 | 2 | 96 | 0 | 35 | 8 | 105 | 4 | 132 | 12 | 237 |
| P6 | 11 | 13 | 9 | 22 | 10 | 10 | 14 | 101 | 30 | 45 | 44 | 146 |
| P7 | 2 | 10 | 22 | 67 | 15 | 26 | 26 | 115 | 39 | 103 | 65 | 218 |
| P8 | 0 | 34 | 1 | 21 | 5 | 67 | 1 | 101 | 6 | 122 | 7 | 223 |
| P9 | 20 | 26 | 18 | 109 | 0 | 0 | 20 | 76 | 38 | 135 | 58 | 211 |
| P10 | 8 | 46 | 16 | 56 | 13 | 33 | 10 | 114 | 37 | 135 | 47 | 249 |
| P11 | 6 | 24 | 22 | 39 | 8 | 98 | 0 | 48 | 36 | 161 | 36 | 209 |
| P12 | 5 | 17 | 1 | 36 | 0 | 0 | 15 | 200 | 6 | 53 | 21 | 253 |
| Σ | 73 | 231 | 166 | 612 | 103 | 358 | 211 | 1230 | 342 | 1201 | 553 | 2431 |

Tabelle: Proz. ipsilaterales Verteilungsmuster „Rechts gegen Ruhe“ (ReHem) (1%-Map)

| Areal | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox.re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. A. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|-------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Prob | | | | | | |
| P1 | 57,14 | 20,63 | 0 | 9,72 | 42,86 | 2,77 |
| P2 | 42,71 | 40,63 | 0 | 10,96 | 57,29 | 1,05 |
| P3 | 35,21 | 15,49 | 25,35 | 9,66 | 64,79 | 2,27 |
| P4 | 45,45 | 36,36 | 3,03 | 2,28 | 54,55 | 1,25 |
| P5 | 66,67 | 16,67 | 16,67 | 0,00 | 33,33 | 4,00 |
| P6 | 31,82 | 20,45 | 25,00 | 6,85 | 68,18 | 1,56 |
| P7 | 40,00 | 33,85 | 3,08 | 6,88 | 60,00 | 1,18 |
| P8 | 14,29 | 14,29 | 0,00 | 2,24 | 85,71 | 1,00 |
| P9 | 34,48 | 31,03 | 34,48 | 0,00 | 65,52 | 1,11 |
| P10 | 21,28 | 34,04 | 17,02 | 5,22 | 78,72 | 0,63 |
| P11 | 0,00 | 61,11 | 16,67 | 3,83 | 100,00 | 0,00 |
| P12 | 71,43 | 4,76 | 23,81 | 0,00 | 28,57 | 15,00 |
| %-Σ | 38,16 | 30,02 | 13,20 | 4,24 | 61,84 | 1,27 |

Tabelle: Proz. kontralaterales Verteilungsmuster „Rechts gegen Ruhe“ (LiHem) (1%-Map)

| Areal | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox.li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMAli / akt. Vox. li (%) | sek. A. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|-------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Prob | | | | | | |
| P1 | 64,58 | 22,92 | 6,94 | 5,56 | 35,42 | 2,82 |
| P2 | 62,33 | 15,75 | 16,44 | 5,48 | 37,67 | 3,96 |
| P3 | 40,91 | 42,05 | 7,39 | 9,66 | 59,09 | 0,97 |
| P4 | 52,05 | 16,44 | 5,94 | 25,57 | 47,95 | 3,17 |
| P5 | 44,30 | 40,51 | 0,42 | 14,77 | 55,70 | 1,09 |
| P6 | 69,18 | 15,07 | 8,90 | 6,85 | 30,82 | 4,59 |
| P7 | 52,75 | 30,73 | 4,59 | 11,93 | 47,25 | 1,72 |
| P8 | 45,29 | 9,42 | 15,25 | 30,04 | 54,71 | 4,81 |
| P9 | 36,02 | 51,66 | 12,32 | 0,00 | 63,98 | 0,70 |
| P10 | 45,78 | 22,49 | 18,47 | 13,25 | 54,22 | 2,04 |
| P11 | 22,97 | 18,66 | 11,48 | 46,89 | 77,03 | 1,23 |
| P12 | 79,05 | 14,23 | 6,72 | 0,00 | 20,95 | 5,56 |
| %-Σ | 50,60 | 25,17 | 9,50 | 14,73 | 49,40 | 2,01 |

8.1.1.2 „Links gegen Ruhe“ (LiRu) (1%-Map)

Tabelle: Verteilungsmuster „Links gegen Ruhe“ (1%-Map)

| Areal | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Prob | | | | | | | | | | | | |
| P1 | 1 | 4 | 30 | 3 | 57 | 0 | 134 | 7 | 88 | 7 | 222 | 14 |
| P2 | 0 | 8 | 50 | 1 | 56 | 1 | 154 | 8 | 106 | 10 | 260 | 18 |
| P3 | 28 | 38 | 31 | 8 | 16 | 1 | 87 | 0 | 75 | 47 | 162 | 47 |
| P4 | 8 | 1 | 27 | 18 | 36 | 42 | 68 | 11 | 71 | 61 | 139 | 72 |
| P5 | 13 | 7 | 64 | 11 | 11 | 5 | 158 | 7 | 88 | 23 | 246 | 30 |
| P6 | 30 | 18 | 25 | 8 | 24 | 12 | 88 | 12 | 79 | 38 | 167 | 50 |
| P7 | 4 | 1 | 64 | 16 | 33 | 14 | 145 | 16 | 101 | 31 | 246 | 47 |
| P8 | 11 | 16 | 45 | 0 | 13 | 4 | 125 | 0 | 69 | 20 | 194 | 20 |
| P9 | 15 | 23 | 145 | 14 | 0 | 0 | 77 | 8 | 160 | 37 | 237 | 45 |
| P10 | 17 | 37 | 70 | 10 | 34 | 16 | 94 | 22 | 121 | 63 | 215 | 85 |
| P11 | 13 | 16 | 20 | 3 | 115 | 6 | 107 | 2 | 148 | 25 | 255 | 27 |
| P12 | 6 | 10 | 59 | 20 | 2 | 0 | 173 | 6 | 67 | 30 | 240 | 36 |
| Σ | 146 | 179 | 630 | 112 | 397 | 101 | 1410 | 99 | 1173 | 392 | 2583 | 491 |

Tabelle: Proz. ipsilaterales Verteilungsmuster „Links gegen Ruhe“ (LiHem) (1%-Map)

| Areal | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox. li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMAli / akt. Vox. li (%) | sek. Ar. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Prob | | | | | | |
| P1 | 50,00 | 21,43 | 28,57 | 0,00 | 50,00 | 2,33 |
| P2 | 44,44 | 5,56 | 44,44 | 5,56 | 55,56 | 8,00 |
| P3 | 0,00 | 17,02 | 80,85 | 2,13 | 100,00 | 0,00 |
| P4 | 15,28 | 25,00 | 1,39 | 58,33 | 84,72 | 0,61 |
| P5 | 23,33 | 36,67 | 23,33 | 16,67 | 76,67 | 0,64 |
| P6 | 24,00 | 16,00 | 36,00 | 24,00 | 76,00 | 1,50 |
| P7 | 34,04 | 34,04 | 2,13 | 29,79 | 65,96 | 1,00 |
| P8 | 0,00 | 0,00 | 80,00 | 20,00 | 100,00 | 0,00 |
| P9 | 17,78 | 31,11 | 51,11 | 0,00 | 82,22 | 0,57 |
| P10 | 25,88 | 11,76 | 43,53 | 18,82 | 74,12 | 2,20 |
| P11 | 7,41 | 11,11 | 59,26 | 22,22 | 92,59 | 0,67 |
| P12 | 16,67 | 55,56 | 27,78 | 0,00 | 83,33 | 0,30 |
| %-Σ | 20,16 | 22,81 | 36,46 | 20,57 | 79,84 | 0,88 |

Tabelle: Proz. kontralaterales Verteilungsmuster „Links gegen Ruhe“ (ReHem) (1%-Map)

| Areal | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox. re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. Ar. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Prob | | | | | | |
| P1 | 60,36 | 13,51 | 0,45 | 25,68 | 39,64 | 4,47 |
| P2 | 59,23 | 19,23 | 0,00 | 21,54 | 40,77 | 3,08 |
| P3 | 53,70 | 19,14 | 17,28 | 9,88 | 46,30 | 2,81 |
| P4 | 48,92 | 19,42 | 5,76 | 25,90 | 51,08 | 2,52 |
| P5 | 64,23 | 26,02 | 5,28 | 4,47 | 35,77 | 2,47 |
| P6 | 52,69 | 14,97 | 17,96 | 14,37 | 47,31 | 3,52 |
| P7 | 58,94 | 26,02 | 1,63 | 13,41 | 41,06 | 2,27 |
| P8 | 64,43 | 23,20 | 5,67 | 6,70 | 35,57 | 2,78 |
| P9 | 32,49 | 61,18 | 6,33 | 0,00 | 67,51 | 0,53 |
| P10 | 43,72 | 32,56 | 7,91 | 15,81 | 56,28 | 1,34 |
| P11 | 41,96 | 7,84 | 5,10 | 45,10 | 58,04 | 5,35 |
| P12 | 72,08 | 24,58 | 2,50 | 0,83 | 27,92 | 2,93 |
| %-Σ | 54,59 | 24,39 | 5,65 | 15,37 | 45,41 | 2,24 |

8.1.1.3 Zusammenfassung „Bewegung gegen Ruhe“ (1%-Map)

Wilcoxon-Test:

Vergleich ipsilaterales „ReRu“ mit „LiRu“ (ReRu: ReHem, LiRu: LiHem) (1%-Map)

| | SM1 | PPC | SMA | PMA | sek. Areale | SM1/PPC |
|----------|---------------------|--------------------|----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| p | <=0.05675 | <=0.4357 | <=0.005584 | <=0.126 | <=0.05675 | <=0.141 |

Wilcoxon-Test:

Vergleich kontralaterales „ReRu“ mit „LiRu“ (ReRu: LiHem, LiRu: ReHem) (1%-Map)

| | SM1 | PPC | SMA | PMA | sek. Areale | SM1/PPC |
|----------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| p | p <=0.5834 | <=0.954 | <=0.119 | <=0.7508 | <=0.5834 | <=0.7508 |

Tabelle: Proz. ipsilaterale Verteilung „ReRu“ (ReHem) & „LiRu“ (LiHem)/2 (1%-Map)

| Areal Prob | SM1 ips / akt. Vox. ips (%) | PPC ips / akt. Vox. ips (%) | SMA ips / akt. Vox. ips (%) | PMA ips / akt. Vox. ips (%) | sek. A. ips / akt. Vox. ips (%) | Quotient SM1/PPCips |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| P1 | 53,57 | 21,03 | 14,29 | 4,86 | 46,43 | 2,55 |
| P2 | 43,58 | 23,09 | 22,22 | 8,26 | 56,42 | 1,89 |
| P3 | 17,61 | 16,26 | 53,10 | 5,89 | 82,39 | 1,08 |
| P4 | 30,37 | 30,68 | 2,21 | 30,31 | 69,63 | 0,99 |
| P5 | 45,00 | 26,67 | 20,00 | 8,33 | 55,00 | 1,69 |
| P6 | 27,91 | 18,23 | 30,50 | 15,42 | 72,09 | 1,53 |
| P7 | 37,02 | 33,94 | 2,60 | 18,33 | 62,98 | 1,09 |
| P8 | 7,14 | 7,14 | 40,00 | 11,12 | 92,86 | 1,00 |
| P9 | 26,13 | 31,07 | 42,80 | 0,00 | 73,87 | 0,84 |
| P10 | 23,58 | 22,90 | 30,28 | 12,02 | 76,42 | 1,03 |
| P11 | 3,70 | 36,11 | 37,96 | 13,02 | 96,30 | 0,10 |
| P12 | 44,05 | 30,16 | 25,79 | 0,00 | 55,95 | 1,46 |
| %-Σ | 29,16 | 26,41 | 24,83 | 12,40 | 70,84 | 1,10 |

Tabelle: Proz. kontralaterale Verteilung „ReRu“ (LiHem) & „LiRu“ (ReHem)/2 (1%-Map)

| Areal Prob | SM1 kon / akt. Vox. kon (%) | PPC kon / akt. Vox. kon (%) | SMA kon / akt. Vox. kon (%) | PMA kon / akt. Vox. kon (%) | sek. A. kon / akt. Vox. kon (%) | Quotient SM1/PPCkon |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| P1 | 62,47 | 18,22 | 3,70 | 15,62 | 37,53 | 3,43 |
| P2 | 60,78 | 17,49 | 8,22 | 13,51 | 39,22 | 3,47 |
| P3 | 47,31 | 30,59 | 12,34 | 9,77 | 52,69 | 1,55 |
| P4 | 50,49 | 17,93 | 5,85 | 25,74 | 49,51 | 2,82 |
| P5 | 54,27 | 33,26 | 2,85 | 9,62 | 45,73 | 1,63 |
| P6 | 60,94 | 15,02 | 13,43 | 10,61 | 39,06 | 4,06 |
| P7 | 55,85 | 28,38 | 3,11 | 12,67 | 44,15 | 1,97 |
| P8 | 54,86 | 16,31 | 10,46 | 18,37 | 45,14 | 3,36 |
| P9 | 34,25 | 56,42 | 9,33 | 0,00 | 65,75 | 0,61 |
| P10 | 44,75 | 27,52 | 13,19 | 14,53 | 55,25 | 1,63 |
| P11 | 32,46 | 13,25 | 8,29 | 45,99 | 67,54 | 2,45 |
| P12 | 75,57 | 19,41 | 4,61 | 0,42 | 24,43 | 3,89 |
| %-Σ | 52,59 | 24,78 | 7,58 | 15,05 | 47,41 | 2,12 |

8.1.1.4 „Rechts gegen Ruhe“ (ReRu) (5%-Map)

Tabelle: Verteilungsmuster „Rechts gegen Ruhe“ (5%-Map)

| Areal | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Prob | | | | | | | | | | | | |
| P1 | 35 | 52 | 34 | 54 | 46 | 65 | 43 | 95 | 115 | 171 | 158 | 266 |
| P2 | 26 | 38 | 38 | 85 | 43 | 33 | 51 | 76 | 107 | 156 | 158 | 232 |
| P3 | 18 | 24 | 36 | 49 | 29 | 36 | 24 | 57 | 83 | 109 | 107 | 166 |
| P4 | 39 | 46 | 33 | 92 | 38 | 47 | 38 | 116 | 110 | 185 | 148 | 301 |
| P5 | 10 | 12 | 28 | 102 | 38 | 61 | 21 | 100 | 76 | 175 | 97 | 275 |
| P6 | 21 | 33 | 22 | 84 | 41 | 56 | 26 | 91 | 84 | 173 | 110 | 264 |
| P7 | 10 | 6 | 51 | 70 | 33 | 41 | 53 | 97 | 94 | 117 | 147 | 214 |
| P8 | 17 | 25 | 12 | 52 | 58 | 42 | 40 | 73 | 87 | 119 | 127 | 192 |
| P9 | 16 | 17 | 26 | 73 | 16 | 78 | 20 | 93 | 58 | 168 | 78 | 261 |
| P10 | 21 | 38 | 7 | 75 | 37 | 74 | 21 | 107 | 65 | 187 | 86 | 294 |
| P11 | 21 | 21 | 42 | 84 | 52 | 47 | 42 | 80 | 115 | 152 | 157 | 232 |
| P12 | 13 | 17 | 49 | 78 | 31 | 35 | 49 | 76 | 93 | 130 | 142 | 206 |
| Σ | 20,58 | 27,42 | 31,50 | 74,83 | 38,50 | 51,25 | 35,67 | 88,42 | 90,58 | 153,5 | 126,3 | 241,9 |

Tabelle: Proz. ipsilaterales Verteilungsmuster „Rechts gegen Ruhe“ (ReHem) (5%-Map)

| Areal | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox. re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. A. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Prob | | | | | | |
| P1 | 27,22 | 21,52 | 22,15 | 29,11 | 72,78 | 1,26 |
| P2 | 32,28 | 24,05 | 16,46 | 27,22 | 67,72 | 1,34 |
| P3 | 22,43 | 33,64 | 16,82 | 27,10 | 77,57 | 0,67 |
| P4 | 25,68 | 22,30 | 26,35 | 25,68 | 74,32 | 1,15 |
| P5 | 21,65 | 28,87 | 10,31 | 39,18 | 78,35 | 0,75 |
| P6 | 23,64 | 20,00 | 19,09 | 37,27 | 76,36 | 1,18 |
| P7 | 36,05 | 34,69 | 6,80 | 22,45 | 63,95 | 1,04 |
| P8 | 31,50 | 9,45 | 13,39 | 45,67 | 68,50 | 3,33 |
| P9 | 25,64 | 33,33 | 20,51 | 20,51 | 74,36 | 0,77 |
| P10 | 24,42 | 8,14 | 24,42 | 43,02 | 75,58 | 3,00 |
| P11 | 26,75 | 26,75 | 13,38 | 33,12 | 73,25 | 1,00 |
| P12 | 34,51 | 34,51 | 9,15 | 21,83 | 65,49 | 1,00 |
| %-Σ | 28,25 | 24,95 | 16,30 | 30,50 | 71,75 | 1,13 |

Tabelle: Proz. kontralaterales Verteilungsmuster „Rechts gegen Ruhe“ (LiHem) (5%-Map)

| Areal | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox. li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMAli / akt. Vox. li (%) | sek. A. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Prob | | | | | | |
| P1 | 35,71 | 20,30 | 19,55 | 24,44 | 64,29 | 1,76 |
| P2 | 32,76 | 36,64 | 16,38 | 14,22 | 67,24 | 0,89 |
| P3 | 34,34 | 29,52 | 14,46 | 21,69 | 65,66 | 1,16 |
| P4 | 38,54 | 30,56 | 15,28 | 15,61 | 61,46 | 1,26 |
| P5 | 36,36 | 37,09 | 4,36 | 22,18 | 63,64 | 0,98 |
| P6 | 34,47 | 31,82 | 12,50 | 21,21 | 65,53 | 1,08 |
| P7 | 45,33 | 32,71 | 2,80 | 19,16 | 54,67 | 1,39 |
| P8 | 38,02 | 27,08 | 13,02 | 21,88 | 61,98 | 1,40 |
| P9 | 35,63 | 27,97 | 6,51 | 29,89 | 64,37 | 1,27 |
| P10 | 36,39 | 25,51 | 12,93 | 25,17 | 63,61 | 1,43 |
| P11 | 34,48 | 36,21 | 9,05 | 20,26 | 65,52 | 0,95 |
| P12 | 36,89 | 37,86 | 8,25 | 16,99 | 63,11 | 0,97 |
| %-Σ | 36,55 | 30,93 | 11,33 | 21,18 | 63,45 | 1,18 |

8.1.1.5 „Links gegen Ruhe“ (LiRu) (5%-Map)

Tabelle: Verteilungsmuster „Links gegen Ruhe“ (5%-Map)

| Areal Prob | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | 27 | 32 | 61 | 25 | 54 | 58 | 95 | 41 | 142 | 115 | 237 | 156 |
| P2 | 29 | 34 | 79 | 36 | 57 | 15 | 80 | 28 | 165 | 85 | 245 | 113 |
| P3 | 13 | 14 | 65 | 8 | 36 | 31 | 87 | 23 | 114 | 53 | 201 | 76 |
| P4 | 53 | 54 | 53 | 26 | 59 | 55 | 122 | 38 | 165 | 135 | 287 | 173 |
| P5 | 10 | 22 | 37 | 36 | 68 | 44 | 107 | 26 | 115 | 102 | 222 | 128 |
| P6 | 22 | 26 | 65 | 49 | 60 | 28 | 94 | 26 | 147 | 103 | 241 | 129 |
| P7 | 14 | 13 | 84 | 34 | 35 | 37 | 118 | 29 | 133 | 84 | 251 | 113 |
| P8 | 26 | 15 | 62 | 8 | 90 | 20 | 128 | 24 | 178 | 43 | 306 | 67 |
| P9 | 10 | 7 | 77 | 38 | 63 | 40 | 80 | 26 | 150 | 85 | 230 | 111 |
| P10 | 21 | 33 | 44 | 47 | 64 | 57 | 52 | 52 | 129 | 137 | 181 | 189 |
| P11 | 17 | 34 | 89 | 37 | 36 | 48 | 82 | 40 | 142 | 119 | 224 | 159 |
| P12 | 11 | 18 | 52 | 22 | 52 | 41 | 102 | 32 | 115 | 81 | 217 | 113 |
| Σ | 21,08 | 25,17 | 64,00 | 30,50 | 56,17 | 39,50 | 95,58 | 32,08 | 141,3 | 95,17 | 236,8 | 127,3 |

Tabelle: Proz. ipsilaterales Verteilungsmuster „Links gegen Ruhe“ (LiHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox. li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMAli / akt. Vox. li (%) | sek. Ar. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| P1 | 26,28 | 16,03 | 20,51 | 37,18 | 73,72 | 1,64 |
| P2 | 24,78 | 31,86 | 30,09 | 13,27 | 75,22 | 0,78 |
| P3 | 30,26 | 10,53 | 18,42 | 40,79 | 69,74 | 2,88 |
| P4 | 21,97 | 15,03 | 31,21 | 31,79 | 78,03 | 1,46 |
| P5 | 20,31 | 28,13 | 17,19 | 34,38 | 79,69 | 0,72 |
| P6 | 20,16 | 37,98 | 20,16 | 21,71 | 79,84 | 0,53 |
| P7 | 25,66 | 30,09 | 11,50 | 32,74 | 74,34 | 0,85 |
| P8 | 35,82 | 11,94 | 22,39 | 29,85 | 64,18 | 3,00 |
| P9 | 23,42 | 34,23 | 6,31 | 36,04 | 76,58 | 0,68 |
| P10 | 27,51 | 24,87 | 17,46 | 30,16 | 72,49 | 1,11 |
| P11 | 25,16 | 23,27 | 21,38 | 30,19 | 74,84 | 1,08 |
| P12 | 28,32 | 19,47 | 15,93 | 36,28 | 71,68 | 1,45 |
| %-Σ | 25,21 | 23,97 | 19,78 | 31,04 | 74,79 | 1,05 |

Tabelle: Proz. kontralaterales Verteilungsmuster „Links gegen Ruhe“ (ReHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox. re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. Ar. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| P1 | 40,08 | 25,74 | 11,39 | 22,78 | 59,92 | 1,56 |
| P2 | 32,65 | 32,24 | 11,84 | 23,27 | 67,35 | 1,01 |
| P3 | 43,28 | 32,34 | 6,47 | 17,91 | 56,72 | 1,34 |
| P4 | 42,51 | 18,47 | 18,47 | 20,56 | 57,49 | 2,30 |
| P5 | 48,20 | 16,67 | 4,50 | 30,63 | 51,80 | 2,89 |
| P6 | 39,00 | 26,97 | 9,13 | 24,90 | 61,00 | 1,45 |
| P7 | 47,01 | 33,47 | 5,58 | 13,94 | 52,99 | 1,40 |
| P8 | 41,83 | 20,26 | 8,50 | 29,41 | 58,17 | 2,06 |
| P9 | 34,78 | 33,48 | 4,35 | 27,39 | 65,22 | 1,04 |
| P10 | 28,73 | 24,31 | 11,60 | 35,36 | 71,27 | 1,18 |
| P11 | 36,61 | 39,73 | 7,59 | 16,07 | 63,39 | 0,92 |
| P12 | 47,00 | 23,96 | 5,07 | 23,96 | 53,00 | 1,96 |
| %-Σ | 40,36 | 27,02 | 8,90 | 23,72 | 59,64 | 1,49 |

8.1.1.6 Zusammenfassung „Bewegung gegen Ruhe“ (5%-Map)

| | | | | | | |
|--|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Wilcoxon-Test: | | | | | | |
| Vergleich ipsilateral „ReRu“ mit „LiRu“ („ReRu“ ReHem, „LiRu“ LiHem) (5%-Map) | | | | | | |
| | SM1 | PPC | SMA | PMA | sek Areale | SM1/PPC |
| p | <=0.4189 | <=0.795 | <=0.3408 | <=0.729 | <=0.4189 | <=0.5444 |

| | | | | | | |
|--|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Wilcoxon-Test: | | | | | | |
| Vergleich kontralateral „ReRu“ mit „LiRu“ („ReRu“ LiHem, „LiRu“ ReHem) (5%-Map) | | | | | | |
| | SM1 | PPC | SMA | PMA | sek Areale | SM1/PPC |
| p | <=0.09407 | <=0.1939 | <=0.1489 | <=0.2482 | <=0.106 | <=0.08853 |

Tabelle: Proz. ipsilaterale. Verteilung „ReRu“ (ReHem) & „LiRu“ (LiHem)/2 (5%-Map)

| Areal | SM1 ips / akt. | PPC ips / akt. | SMA ips / akt. | PMA ips / akt. | sek. A. ips / akt. | Quotient |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|
| Prob | Vox. ips (%) | SM1/PPCips |
| P1 | 26,75 | 18,77 | 21,33 | 33,15 | 73,25 | 1,42 |
| P2 | 28,53 | 27,95 | 23,27 | 20,24 | 71,47 | 1,02 |
| P3 | 26,35 | 22,09 | 17,62 | 33,95 | 73,65 | 1,19 |
| P4 | 23,82 | 18,66 | 28,78 | 28,73 | 76,18 | 1,28 |
| P5 | 20,98 | 28,50 | 13,75 | 36,78 | 79,02 | 0,74 |
| P6 | 21,90 | 28,99 | 19,62 | 29,49 | 78,10 | 0,76 |
| P7 | 30,86 | 32,39 | 9,15 | 27,60 | 69,14 | 0,95 |
| P8 | 33,66 | 10,69 | 17,89 | 37,76 | 66,34 | 3,15 |
| P9 | 24,53 | 33,78 | 13,41 | 28,27 | 75,47 | 0,73 |
| P10 | 25,97 | 16,50 | 20,94 | 36,59 | 74,03 | 1,57 |
| P11 | 25,95 | 25,01 | 17,38 | 31,65 | 74,05 | 1,04 |
| P12 | 31,41 | 26,99 | 12,54 | 29,06 | 68,59 | 1,16 |
| %-Σ | 26,73 | 24,46 | 18,04 | 30,77 | 73,27 | 1,09 |

Tabelle: Proz. kontralaterale Verteilung „ReRu“ (LiHem)& „LiRu“ (ReHem)/2 (5%-Map)

| Areal | SM1 kon / akt. | PPC kon / akt. | SMA kon / akt. | PMA kon / akt. | sek. A. kon / akt. | Quotient |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|
| Prob | Vox. kon (%) | SM1/PPKon |
| P1 | 37,90 | 23,02 | 15,47 | 23,61 | 62,10 | 1,65 |
| P2 | 32,71 | 34,44 | 14,11 | 18,74 | 67,29 | 0,95 |
| P3 | 38,81 | 30,93 | 10,46 | 19,80 | 61,19 | 1,25 |
| P4 | 40,52 | 24,52 | 16,87 | 18,09 | 59,48 | 1,65 |
| P5 | 42,28 | 26,88 | 4,43 | 26,41 | 57,72 | 1,57 |
| P6 | 36,74 | 29,39 | 10,81 | 23,05 | 63,26 | 1,25 |
| P7 | 46,17 | 33,09 | 4,19 | 16,55 | 53,83 | 1,40 |
| P8 | 39,93 | 23,67 | 10,76 | 25,64 | 60,07 | 1,69 |
| P9 | 35,21 | 30,72 | 5,43 | 28,64 | 64,79 | 1,15 |
| P10 | 32,56 | 24,91 | 12,26 | 30,26 | 67,44 | 1,31 |
| P11 | 35,54 | 37,97 | 8,32 | 18,17 | 64,46 | 0,94 |
| P12 | 41,95 | 30,91 | 6,66 | 20,48 | 58,05 | 1,36 |
| %-Σ | 38,45 | 28,98 | 10,12 | 22,45 | 61,55 | 1,33 |

8.1.1.7 „Rechts gegen Links“ (ReLi) (1%-Map)

Tabelle: Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (1%-Map)

| Areal — Prob | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|--------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| P1 | 0 | 1 | 2 | 17 | 19 | 6 | 59 | 84 | 21 | 24 | 80 | 108 |
| P2 | 0 | 0 | 71 | 2 | 59 | 0 | 130 | 30 | 130 | 2 | 260 | 32 |
| P3 | 0 | 0 | 13 | 18 | 4 | 0 | 98 | 45 | 17 | 18 | 115 | 63 |
| P4 | 5 | 0 | 19 | 14 | 23 | 6 | 71 | 71 | 47 | 20 | 118 | 91 |
| P5 | 0 | 0 | 48 | 26 | 0 | 0 | 136 | 64 | 48 | 26 | 184 | 90 |
| P6 | 5 | 9 | 10 | 13 | 8 | 5 | 73 | 46 | 23 | 27 | 96 | 73 |
| P7 | 3 | 0 | 28 | 3 | 26 | 0 | 158 | 73 | 57 | 3 | 215 | 76 |
| P8 | 5 | 21 | 16 | 5 | 10 | 29 | 89 | 54 | 31 | 55 | 120 | 109 |
| P9 | 0 | 0 | 125 | 103 | 0 | 0 | 40 | 22 | 125 | 103 | 165 | 125 |
| P10 | 5 | 7 | 39 | 16 | 14 | 13 | 122 | 83 | 58 | 36 | 180 | 119 |
| P11 | 5 | 0 | 4 | 0 | 102 | 43 | 98 | 6 | 111 | 43 | 209 | 49 |
| P12 | 0 | 0 | 21 | 5 | 0 | 0 | 164 | 86 | 21 | 5 | 185 | 91 |
| Σ | 28 | 38 | 396 | 222 | 265 | 102 | 1238 | 664 | 689 | 362 | 1927 | 1026 |

Tabelle: Proz. Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (ReHem) (1%-Map)

| Areal — Prob | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox.re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. A. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| P1 | 73,75 | 2,50 | 0,00 | 23,75 | 26,25 | 29,50 |
| P2 | 50,00 | 27,31 | 0,00 | 22,69 | 50,00 | 1,83 |
| P3 | 85,22 | 11,30 | 0,00 | 3,48 | 14,78 | 7,54 |
| P4 | 60,17 | 16,10 | 4,24 | 19,49 | 39,83 | 3,74 |
| P5 | 73,91 | 26,09 | 0,00 | 0,00 | 26,09 | 2,83 |
| P6 | 76,04 | 10,42 | 5,21 | 8,33 | 23,96 | 7,30 |
| P7 | 73,49 | 13,02 | 1,40 | 12,09 | 26,51 | 5,64 |
| P8 | 74,17 | 13,33 | 4,17 | 8,33 | 25,83 | 5,56 |
| P9 | 24,24 | 75,76 | 0,00 | 0,00 | 75,76 | 0,32 |
| P10 | 67,78 | 21,67 | 2,78 | 7,78 | 32,22 | 3,13 |
| P11 | 46,89 | 1,91 | 2,39 | 48,80 | 53,11 | 24,50 |
| P12 | 88,65 | 11,35 | 0,00 | 0,00 | 11,35 | 7,81 |
| %-Σ | 64,24 | 20,55 | 1,45 | 13,75 | 35,76 | 3,13 |

Tabelle: Proz. Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (LiHem) (1%-Map)

| Areal — Prob | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox.li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMALI / akt. Vox. li (%) | sek. A. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| P1 | 77,78 | 15,74 | 0,93 | 5,56 | 22,22 | 4,94 |
| P2 | 93,75 | 6,25 | 0,00 | 0,00 | 6,25 | 15,00 |
| P3 | 71,43 | 28,57 | 0,00 | 0,00 | 28,57 | 2,50 |
| P4 | 78,02 | 15,38 | 0,00 | 6,59 | 21,98 | 5,07 |
| P5 | 71,11 | 28,89 | 0,00 | 0,00 | 28,89 | 2,46 |
| P6 | 63,01 | 17,81 | 12,33 | 6,85 | 36,99 | 3,54 |
| P7 | 96,05 | 3,95 | 0,00 | 0,00 | 3,95 | 24,33 |
| P8 | 49,54 | 4,59 | 19,27 | 26,61 | 50,46 | 10,80 |
| P9 | 17,60 | 82,40 | 0,00 | 0,00 | 82,40 | 0,21 |
| P10 | 69,75 | 13,45 | 5,88 | 10,92 | 30,25 | 5,19 |
| P11 | 12,24 | 0,0 | 0,00 | 87,76 | 87,76 | 0,00 |
| P12 | 94,51 | 5,49 | 0,00 | 0,00 | 5,49 | 17,20 |
| %- Σ | 64,72 | 21,64 | 3,70 | 9,94 | 35,28 | 2,99 |

Tabelle: Proz. Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (BiHem) (1%-Map)

| Areal Prob | SM1 / akt. Vox. (%) | PPC / akt. Vox. (%) | SMA / akt. Vox. (%) | PMA / akt. Vox. (%) | sek. A. / akt. Vox. (%) | Quotient SM1/PPC |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------|
| P1 | 75,76 | 9,12 | 0,46 | 14,65 | 24,24 | 8,31 |
| P2 | 71,88 | 16,78 | 0,00 | 11,35 | 28,13 | 4,28 |
| P3 | 78,32 | 19,94 | 0,00 | 1,74 | 21,68 | 3,93 |
| P4 | 69,10 | 15,74 | 2,12 | 13,04 | 30,90 | 4,39 |
| P5 | 72,51 | 27,49 | 0,00 | 0,00 | 27,49 | 2,64 |
| P6 | 69,53 | 14,11 | 8,77 | 7,59 | 30,47 | 4,93 |
| P7 | 84,77 | 8,49 | 0,70 | 6,05 | 15,23 | 9,99 |
| P8 | 61,85 | 8,96 | 11,72 | 17,47 | 38,15 | 6,90 |
| P9 | 20,92 | 79,08 | 0,00 | 0,00 | 79,08 | 0,26 |
| P10 | 68,76 | 17,56 | 4,33 | 9,35 | 31,24 | 3,92 |
| P11 | 29,57 | 0,96 | 1,20 | 68,28 | 70,43 | 30,90 |
| P12 | 91,58 | 8,42 | 0,00 | 0,00 | 8,42 | 10,87 |
| %-Σ | 64,48 | 21,09 | 2,58 | 11,85 | 35,52 | 3,06 |

8.1.1.8 „Rechts gegen Links“ (ReLi) (5%-Map)

Tabelle: Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (5%-Map)

| Areal Prob | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|---------------|-------------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | 22 | 28 | 57 | 30 | 29 | 45 | 92 | 90 | 108 | 103 | 200 | 193 |
| P2 | 11 | 9 | 33 | 49 | 34 | 52 | 51 | 55 | 78 | 110 | 129 | 165 |
| P3 | 1 | 2 | 75 | 47 | 30 | 14 | 92 | 76 | 106 | 63 | 198 | 139 |
| P4 | 74 | 19 | 74 | 106 | 28 | 19 | 111 | 104 | 176 | 144 | 287 | 248 |
| P5 | 10 | 7 | 71 | 70 | 31 | 29 | 126 | 73 | 112 | 106 | 238 | 179 |
| P6 | 10 | 26 | 36 | 50 | 46 | 18 | 109 | 88 | 92 | 94 | 201 | 182 |
| P7 | 4 | 4 | 68 | 21 | 41 | 18 | 65 | 49 | 113 | 43 | 178 | 92 |
| P8 | 13 | 10 | 47 | 83 | 27 | 38 | 94 | 84 | 87 | 131 | 181 | 215 |
| P9 | 12 | 7 | 73 | 30 | 54 | 22 | 86 | 63 | 139 | 59 | 225 | 122 |
| P10 | 12 | 15 | 51 | 52 | 34 | 49 | 63 | 53 | 97 | 116 | 160 | 169 |
| P11 | 14 | 10 | 84 | 28 | 54 | 62 | 54 | 51 | 152 | 100 | 206 | 151 |
| P12 | 15 | 17 | 56 | 46 | 28 | 25 | 94 | 69 | 99 | 88 | 193 | 157 |
| Σ | 16,5 | 12,83 | 60,42 | 51 | 36,33 | 32,58 | 86,42 | 71,25 | 84,94 | 72,31 | 149,8 | 125,8 |

Tabelle: Proz. Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (ReHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox. re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. A. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| P1 | 46 | 28,5 | 11 | 14,5 | 54 | 1,61 |
| P2 | 39,53 | 25,58 | 8,53 | 26,36 | 60,47 | 1,55 |
| P3 | 46,46 | 37,88 | 0,51 | 15,15 | 53,54 | 1,23 |
| P4 | 38,68 | 25,78 | 25,78 | 9,76 | 61,32 | 1,50 |
| P5 | 52,94 | 29,83 | 4,20 | 13,03 | 47,06 | 1,77 |
| P6 | 54,23 | 17,91 | 4,98 | 22,89 | 45,77 | 3,03 |
| P7 | 36,52 | 38,20 | 2,25 | 23,03 | 63,48 | 0,96 |
| P8 | 51,93 | 25,97 | 7,18 | 14,92 | 48,07 | 2,00 |
| P9 | 38,22 | 32,44 | 5,33 | 24,00 | 61,78 | 1,18 |
| P10 | 39,38 | 31,88 | 7,50 | 21,25 | 60,63 | 1,24 |
| P11 | 26,21 | 40,78 | 6,80 | 26,21 | 73,79 | 0,64 |
| P12 | 48,70 | 29,02 | 7,77 | 14,51 | 51,30 | 1,68 |
| %-Σ | 43,28 | 30,26 | 8,26 | 18,20 | 56,72 | 1,43 |

Tabelle: Proz. Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (LiHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox.li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMAli / akt. Vox. li (%) | sek. A. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| P1 | 46,63 | 15,54 | 14,51 | 23,32 | 53,37 | 3,00 |
| P2 | 33,33 | 29,70 | 5,45 | 31,52 | 66,67 | 1,12 |
| P3 | 54,68 | 33,81 | 1,44 | 10,07 | 45,32 | 1,62 |
| P4 | 41,94 | 42,74 | 7,66 | 7,66 | 58,06 | 0,98 |
| P5 | 40,78 | 39,11 | 3,91 | 16,20 | 59,22 | 1,04 |
| P6 | 48,35 | 27,47 | 14,29 | 9,89 | 51,65 | 1,76 |
| P7 | 53,26 | 22,83 | 4,35 | 19,57 | 46,74 | 2,33 |
| P8 | 39,07 | 38,60 | 4,65 | 17,67 | 60,93 | 1,01 |
| P9 | 51,64 | 24,59 | 5,74 | 18,03 | 48,36 | 2,10 |
| P10 | 31,36 | 30,77 | 8,88 | 28,99 | 68,64 | 1,02 |
| P11 | 33,77 | 18,54 | 6,62 | 41,06 | 66,23 | 1,82 |
| P12 | 43,95 | 29,30 | 10,83 | 15,92 | 56,05 | 1,50 |
| %-Σ | 42,50 | 30,42 | 7,65 | 19,43 | 57,50 | 1,40 |

Tabelle: Proz. Verteilungsmuster „Rechts gegen Links“ (BiHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1 / akt. Vox. (%) | PPC / akt. Vox. (%) | SMA / akt. Vox. (%) | PMA / akt. Vox. (%) | sek. A. / akt. Vox. (%) | Quotient SM1/PPC |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------|
| P1 | 46,32 | 22,02 | 12,75 | 18,91 | 53,68 | 2,10 |
| P2 | 36,43 | 27,64 | 6,99 | 28,94 | 63,57 | 1,32 |
| P3 | 50,57 | 35,85 | 0,97 | 12,61 | 49,43 | 1,41 |
| P4 | 40,31 | 34,26 | 16,72 | 8,71 | 59,69 | 1,18 |
| P5 | 46,86 | 34,47 | 4,06 | 14,61 | 53,14 | 1,36 |
| P6 | 51,29 | 22,69 | 9,63 | 16,39 | 48,71 | 2,26 |
| P7 | 44,89 | 30,51 | 3,30 | 21,30 | 55,11 | 1,47 |
| P8 | 45,50 | 32,29 | 5,92 | 16,30 | 54,50 | 1,41 |
| P9 | 44,93 | 28,52 | 5,54 | 21,02 | 55,07 | 1,58 |
| P10 | 35,37 | 31,32 | 8,19 | 25,12 | 64,63 | 1,13 |
| P11 | 29,99 | 29,66 | 6,71 | 33,64 | 70,01 | 1,01 |
| P12 | 46,33 | 29,16 | 9,30 | 15,22 | 53,67 | 1,59 |
| %-Σ | 42,89 | 30,34 | 7,96 | 18,82 | 57,11 | 1,41 |

8.1.1.9 „Rechts gegen Vorstellung Links“ (ReVLI)

Tabelle: Verteilungsmuster „Rechts gegen Vorstellung Links“ (5%-Map)

| Areal Prob | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| P1 | 22 | 28 | 35 | 37 | 42 | 51 | 19 | 77 | 99 | 116 | 118 | 193 |
| P2 | 19 | 29 | 24 | 92 | 30 | 53 | 27 | 91 | 73 | 174 | 100 | 265 |
| P3 | 13 | 12 | 47 | 24 | 31 | 28 | 24 | 25 | 91 | 64 | 115 | 89 |
| P4 | 4 | 16 | 52 | 77 | 46 | 24 | 29 | 119 | 102 | 117 | 131 | 236 |
| P5 | 7 | 9 | 35 | 73 | 42 | 33 | 34 | 68 | 84 | 115 | 118 | 183 |
| P6 | 9 | 10 | 30 | 37 | 41 | 31 | 51 | 51 | 80 | 78 | 131 | 129 |
| P7 | 4 | 8 | 27 | 61 | 34 | 37 | 25 | 97 | 65 | 106 | 90 | 203 |
| P8 | 6 | 18 | 30 | 57 | 68 | 57 | 31 | 89 | 104 | 132 | 135 | 221 |
| P9 | 7 | 8 | 36 | 43 | 39 | 45 | 24 | 60 | 82 | 96 | 106 | 156 |
| P10 | 8 | 11 | 38 | 56 | 37 | 44 | 45 | 62 | 83 | 111 | 128 | 173 |
| P11 | 16 | 29 | 31 | 117 | 27 | 51 | 32 | 104 | 74 | 197 | 106 | 301 |
| P12 | 12 | 19 | 30 | 78 | 37 | 27 | 41 | 27 | 79 | 124 | 120 | 151 |
| Σ | 10,58 | 16,42 | 34,58 | 62,67 | 39,50 | 40,08 | 31,83 | 72,50 | 84,67 | 119,2 | 116,5 | 191,7 |

Tabelle: Proz. ipsilaterale Verteilung „Rechts gegen Vorstellung Links“ (ReHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox.re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. A. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| P1 | 16,10 | 29,66 | 18,64 | 35,59 | 83,90 | 0,54 |
| P2 | 27,00 | 24,00 | 19,00 | 30,00 | 73,00 | 1,13 |
| P3 | 20,87 | 40,87 | 11,30 | 26,96 | 79,13 | 0,51 |
| P4 | 22,14 | 39,69 | 3,05 | 35,11 | 77,86 | 0,56 |
| P5 | 28,81 | 29,66 | 5,93 | 35,59 | 71,19 | 0,97 |
| P6 | 38,93 | 22,90 | 6,87 | 31,30 | 61,07 | 1,70 |
| P7 | 27,78 | 30,00 | 4,44 | 37,78 | 72,22 | 0,93 |
| P8 | 22,96 | 22,22 | 4,44 | 50,37 | 77,04 | 1,03 |
| P9 | 22,64 | 33,96 | 6,60 | 36,79 | 77,36 | 0,67 |
| P10 | 35,16 | 29,69 | 6,25 | 28,91 | 64,84 | 1,18 |
| P11 | 30,19 | 29,25 | 15,09 | 25,47 | 69,81 | 1,03 |
| P12 | 34,17 | 25,00 | 10,00 | 30,83 | 65,83 | 1,37 |
| %-Σ | 27,32 | 29,69 | 9,08 | 33,91 | 72,68 | 0,92 |

Tabelle: Proz. kontralaterale Verteilung „Rechts gegen Vorstellung Links“ (LiHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox.li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMAli / akt. Vox. li (%) | sek. A. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| P1 | 39,90 | 19,17 | 14,51 | 26,42 | 60,10 | 2,08 |
| P2 | 34,34 | 34,72 | 10,94 | 20,00 | 65,66 | 0,99 |
| P3 | 28,09 | 26,97 | 13,48 | 31,46 | 71,91 | 1,04 |
| P4 | 50,42 | 32,63 | 6,78 | 10,17 | 49,58 | 1,55 |
| P5 | 37,16 | 39,89 | 4,92 | 18,03 | 62,84 | 0,93 |
| P6 | 39,53 | 28,68 | 7,75 | 24,03 | 60,47 | 1,38 |
| P7 | 47,78 | 30,05 | 3,94 | 18,23 | 52,22 | 1,59 |
| P8 | 40,27 | 25,79 | 8,14 | 25,79 | 59,73 | 1,56 |
| P9 | 38,46 | 27,56 | 5,13 | 28,85 | 61,54 | 1,40 |
| P10 | 35,84 | 32,37 | 6,36 | 25,43 | 64,16 | 1,11 |
| P11 | 34,55 | 38,87 | 9,63 | 16,94 | 65,45 | 0,89 |
| P12 | 17,88 | 51,66 | 12,58 | 17,88 | 82,12 | 0,35 |
| %-Σ | 37,83 | 32,70 | 8,57 | 20,91 | 62,17 | 1,16 |

8.1.1.10 „Links gegen Vorstellung Rechts“ (LiVRe)

Tabelle: Verteilungsmuster „Links gegen Vorstellung Rechts“ (5%-Map)

| Areal Prob | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li | sek. Ar. re | sek. Ar. li | Akt. Vox. re | Akt. Vox. li |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | 24 | 28 | 77 | 24 | 33 | 42 | 104 | 30 | 134 | 94 | 238 | 124 |
| P2 | 19 | 20 | 54 | 4 | 66 | 56 | 68 | 13 | 139 | 80 | 207 | 93 |
| P3 | 13 | 14 | 97 | 11 | 39 | 30 | 100 | 15 | 149 | 55 | 249 | 70 |
| P4 | 22 | 16 | 66 | 75 | 39 | 33 | 117 | 28 | 127 | 124 | 244 | 152 |
| P5 | 18 | 17 | 75 | 42 | 61 | 27 | 102 | 20 | 154 | 86 | 256 | 106 |
| P6 | 5 | 13 | 29 | 49 | 35 | 18 | 67 | 39 | 69 | 80 | 136 | 119 |
| P7 | 8 | 8 | 71 | 31 | 43 | 36 | 87 | 21 | 122 | 75 | 209 | 96 |
| P8 | 13 | 6 | 43 | 24 | 42 | 48 | 120 | 11 | 98 | 78 | 218 | 89 |
| P9 | 6 | 9 | 50 | 46 | 46 | 41 | 49 | 35 | 102 | 96 | 151 | 131 |
| P10 | 18 | 16 | 48 | 14 | 54 | 47 | 55 | 22 | 120 | 77 | 175 | 99 |
| P11 | 7 | 10 | 74 | 89 | 23 | 70 | 67 | 70 | 104 | 169 | 171 | 239 |
| P12 | 17 | 19 | 86 | 31 | 43 | 23 | 117 | 26 | 146 | 73 | 263 | 99 |
| Σ | 14,17 | 14,67 | 64,17 | 36,67 | 43,67 | 39,25 | 87,75 | 27,5 | 122 | 90,58 | 209,8 | 118,1 |

Tabelle: Proz. ipsilaterale Verteilung „Links gegen Vorstellung Rechts“ (LiHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1li / akt. Vox. li (%) | PPCli / akt. Vox.li (%) | SMAli / akt. Vox. li (%) | PMAli / akt. Vox. li (%) | sek. Ar. li / akt. Vox. li (%) | Quotient SM1/PPCli |
|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| P1 | 24,19 | 19,35 | 22,58 | 33,87 | 75,81 | 1,25 |
| P2 | 13,98 | 4,30 | 21,51 | 60,22 | 86,02 | 3,25 |
| P3 | 21,43 | 15,71 | 20,00 | 42,86 | 78,57 | 1,36 |
| P4 | 18,42 | 49,34 | 10,53 | 21,71 | 81,58 | 0,37 |
| P5 | 18,87 | 39,62 | 16,04 | 25,47 | 81,13 | 0,48 |
| P6 | 32,77 | 41,18 | 10,92 | 15,13 | 67,23 | 0,80 |
| P7 | 21,88 | 32,29 | 8,33 | 37,50 | 78,13 | 0,68 |
| P8 | 12,36 | 26,97 | 6,74 | 53,93 | 87,64 | 0,46 |
| P9 | 26,72 | 35,11 | 6,87 | 31,30 | 73,28 | 0,76 |
| P10 | 22,22 | 14,14 | 16,16 | 47,47 | 77,78 | 1,57 |
| P11 | 29,29 | 37,24 | 4,18 | 29,29 | 70,71 | 0,79 |
| P12 | 26,26 | 31,31 | 19,19 | 23,23 | 73,74 | 0,84 |
| %-Σ | 23,29 | 31,05 | 12,42 | 33,24 | 76,71 | 0,75 |

Tabelle: Proz. kontralaterale Verteilung „Links gegen Vorstellung rechts“ (ReHem) (5%-Map)

| Areal Prob | SM1re / akt. Vox. re (%) | PPCre / akt. Vox.re (%) | SMAre / akt. Vox. re (%) | PMAre / akt. Vox. re (%) | sek. Ar. re / akt. Vox. re (%) | Quotient SM1/PPCre |
|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| P1 | 43,70 | 32,35 | 10,08 | 13,87 | 56,30 | 1,35 |
| P2 | 32,85 | 26,09 | 9,18 | 31,88 | 67,15 | 1,26 |
| P3 | 40,16 | 38,96 | 5,22 | 15,66 | 59,84 | 1,03 |
| P4 | 47,95 | 27,05 | 9,02 | 15,98 | 52,05 | 1,77 |
| P5 | 39,84 | 29,30 | 7,03 | 23,83 | 60,16 | 1,36 |
| P6 | 49,26 | 21,32 | 3,68 | 25,74 | 50,74 | 2,31 |
| P7 | 41,63 | 33,97 | 3,83 | 20,57 | 58,37 | 1,23 |
| P8 | 55,05 | 19,72 | 5,96 | 19,27 | 44,95 | 2,79 |
| P9 | 32,45 | 33,11 | 3,97 | 30,46 | 67,55 | 0,98 |
| P10 | 31,43 | 27,43 | 10,29 | 30,86 | 68,57 | 1,15 |
| P11 | 39,18 | 43,27 | 4,09 | 13,45 | 60,82 | 0,91 |
| P12 | 44,49 | 32,70 | 6,46 | 16,35 | 55,51 | 1,36 |
| %-Σ | 41,84 | 30,59 | 6,75 | 20,82 | 58,16 | 1,37 |

8.1.1.11 Zusammenfassung „Bewegung gegen Vorstellung Bewegung“

Wilcoxon-Test:

Vergleich ipsilat. „ReVLi“ mit „LiVRe“ (ReVLi: ReHem, LiVRe: LiHem) (5%-Map)

| | SM1 | PPC | SMA | PMA | sek. Areale | SM1/PPC |
|----------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| p | <=0.08326 | <=0.8174 | <=0.08326 | <=1 | <=0.09407 | <=0.6236 |

Wilcoxon-Test:

Vergleich kontralat. „ReVLi“ mit „LiVRe“ (ReVLi: LiHem, LiVRe: ReHem) (5%-Map)

| | SM1 | PPC | SMA | PMA | sek. Areale | SM1/PPC |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| p | <=0.1939 | <=0.7728 | <=0.204 | <=0.6442 | <=0.1939 | <=0.4025 |

| Areal Prob | SM1ips / akt. Vox. ips (%) | PPCips / akt. Vox. ips (%) | SMAips / akt. Vox. ips (%) | PMAips / akt. Vox. ips (%) | sek. A. ips / akt. Vox. ips (%) | Quotient SM1/PPCips |
|---------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| P1 | 20,15 | 24,51 | 20,61 | 34,73 | 79,85 | 0,82 |
| P2 | 20,49 | 14,15 | 20,25 | 45,11 | 79,51 | 1,45 |
| P3 | 21,15 | 28,29 | 15,65 | 34,91 | 78,85 | 0,75 |
| P4 | 20,28 | 44,52 | 6,79 | 28,41 | 79,72 | 0,46 |
| P5 | 23,84 | 34,64 | 10,98 | 30,53 | 76,16 | 0,69 |
| P6 | 35,85 | 32,04 | 8,90 | 23,21 | 64,15 | 1,12 |
| P7 | 24,83 | 31,15 | 6,39 | 37,64 | 75,17 | 0,80 |
| P8 | 17,66 | 24,59 | 5,59 | 52,15 | 82,34 | 0,72 |
| P9 | 24,68 | 34,54 | 6,74 | 34,05 | 75,32 | 0,71 |
| P10 | 28,69 | 21,91 | 11,21 | 38,19 | 71,31 | 1,31 |
| P11 | 29,74 | 33,24 | 9,64 | 27,38 | 70,26 | 0,89 |
| P12 | 30,21 | 28,16 | 14,60 | 27,03 | 69,79 | 1,07 |
| %-Σ | 25,31 | 30,37 | 10,75 | 33,57 | 74,69 | 0,83 |

| Areal Prob | SM1 kon / akt. Vox. kon (%) | PPC kon / akt. Vox. kon (%) | SMA kon / akt. Vox. kon (%) | PMA kon / akt. Vox. kon (%) | sek. A. kon / akt. Vox. kon (%) | Quotient SM1/PPCkon |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| P1 | 41,80 | 25,76 | 12,30 | 20,15 | 58,20 | 1,62 |
| P2 | 33,59 | 30,40 | 10,06 | 25,94 | 66,41 | 1,11 |
| P3 | 34,13 | 32,96 | 9,35 | 23,56 | 65,87 | 1,04 |
| P4 | 49,19 | 29,84 | 7,90 | 13,08 | 50,81 | 1,65 |
| P5 | 38,50 | 34,59 | 5,97 | 20,93 | 61,50 | 1,11 |
| P6 | 44,40 | 25,00 | 5,71 | 24,88 | 55,60 | 1,78 |
| P7 | 44,71 | 32,01 | 3,88 | 19,40 | 55,29 | 1,40 |
| P8 | 47,66 | 22,76 | 7,05 | 22,53 | 52,34 | 2,09 |
| P9 | 35,46 | 30,34 | 4,55 | 29,65 | 64,54 | 1,17 |
| P10 | 33,63 | 29,90 | 8,32 | 28,15 | 66,37 | 1,12 |
| P11 | 36,87 | 41,07 | 6,86 | 15,20 | 63,13 | 0,90 |
| P12 | 31,18 | 42,18 | 9,52 | 17,12 | 68,82 | 0,74 |
| %-Σ | 39,83 | 31,64 | 7,66 | 20,87 | 60,17 | 1,26 |

8.1.1.12 Abweichungssummen Short-TR „Rechts gegen Ruhe“

| Areal Prob | kontralateral (linke Hemis.) | | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | | |
|---------------|------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| | SM1 li | SMA li | PMA li | PPC li | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re |
| P1 | 0,46 | 0,47 | 0,53 | 0,48 | 0,53 | 0,45 | 0,54 | 0,50 |
| P2 | 0,46 | 0,55 | 0,51 | 0,53 | 0,57 | 0,56 | 0,56 | 0,61 |
| P3 | 0,44 | 0,49 | 0,48 | 0,48 | 0,55 | 0,52 | 0,55 | 0,59 |
| P4 | 0,48 | 0,62 | 0,57 | 0,56 | 0,60 | 0,61 | 0,62 | 0,62 |
| P5 | 0,58 | 0,51 | 0,79 | 0,66 | 0,80 | 0,51 | 1,00 | 0,75 |
| P6 | 0,43 | 0,49 | 0,49 | 0,50 | 0,60 | 0,57 | 0,55 | 0,42 |
| P7 | 0,62 | 0,40 | 0,47 | 0,49 | 0,44 | 0,40 | 0,45 | 0,49 |
| P8 | 0,40 | 0,47 | 0,43 | 0,41 | 0,48 | 0,61 | 0,53 | 0,55 |
| P9 | 0,43 | 0,56 | 0,55 | 0,50 | 0,65 | 0,58 | 0,66 | 0,69 |

Wilcoxon-Test der Abweichungssummen REF A

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | |
|--------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Areale | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li | SM1 re / SMA re | SM1 re / PMA re | SM1 re / PPC re |
| p | <=0.9648 | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.7239* | <=0.9648* |

Abweichungssummen REF B: Shift 0, slope +1

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | | |
|-------|------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Areal | SM1 li | SMA li | PMA li | PPC li | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re |
| Prob | | | | | | | | |
| P1 | 0,40 | 0,41 | 0,47 | 0,42 | 0,47 | 0,39 | 0,48 | 0,44 |
| P2 | 0,40 | 0,49 | 0,45 | 0,47 | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,56 |
| P3 | 0,38 | 0,43 | 0,42 | 0,42 | 0,49 | 0,46 | 0,49 | 0,54 |
| P4 | 0,42 | 0,57 | 0,51 | 0,50 | 0,56 | 0,56 | 0,58 | 0,59 |
| P5 | 0,52 | 0,45 | 0,75 | 0,60 | 0,77 | 0,45 | 0,98 | 0,74 |
| P6 | 0,37 | 0,43 | 0,43 | 0,44 | 0,56 | 0,52 | 0,51 | 0,40 |
| P7 | 0,56 | 0,34 | 0,41 | 0,43 | 0,38 | 0,34 | 0,39 | 0,43 |
| P8 | 0,34 | 0,41 | 0,37 | 0,35 | 0,43 | 0,55 | 0,48 | 0,49 |
| P9 | 0,37 | 0,50 | 0,49 | 0,44 | 0,61 | 0,52 | 0,62 | 0,66 |

Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF B:

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | |
|--------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Areale | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li | SM1 re / SMA re | SM1 re / PMA re | SM1 re / PPC re |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |

Abweichungssummen REF C: Shift 0, slope +2

| Areal | SM1 li | SMA li | PMA li | PPC li | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Prob | | | | | | | | |
| P1 | 0,34 | 0,35 | 0,41 | 0,36 | 0,43 | 0,34 | 0,42 | 0,39 |
| P2 | 0,34 | 0,44 | 0,39 | 0,42 | 0,47 | 0,45 | 0,46 | 0,52 |
| P3 | 0,32 | 0,39 | 0,37 | 0,36 | 0,43 | 0,42 | 0,43 | 0,50 |
| P4 | 0,36 | 0,53 | 0,46 | 0,44 | 0,52 | 0,52 | 0,54 | 0,57 |
| P5 | 0,46 | 0,39 | 0,71 | 0,56 | 0,73 | 0,40 | 0,94 | 0,70 |
| P6 | 0,31 | 0,38 | 0,38 | 0,39 | 0,54 | 0,48 | 0,48 | 0,40 |
| P7 | 0,52 | 0,32 | 0,35 | 0,38 | 0,32 | 0,31 | 0,34 | 0,37 |
| P8 | 0,30 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 0,39 | 0,53 | 0,45 | 0,44 |
| P9 | 0,31 | 0,46 | 0,43 | 0,39 | 0,57 | 0,47 | 0,58 | 0,64 |

Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF C:

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | |
|--------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Areale | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li | SM1 re / SMA re | SM1 re / PMA re | SM1 re / PPC re |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |

Abweichungssummen REF D: Shift 0, slope 3

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | | |
|-------------|------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Areal | SM1 li | SMA li | PMA li | PPC li | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re |
| Prob | | | | | | | | |
| P1 | 0,28 | 0,31 | 0,35 | 0,30 | 0,38 | 0,30 | 0,36 | 0,35 |
| P2 | 0,28 | 0,40 | 0,34 | 0,37 | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,49 |
| P3 | 0,28 | 0,35 | 0,32 | 0,30 | 0,40 | 0,38 | 0,39 | 0,46 |
| P4 | 0,30 | 0,48 | 0,41 | 0,38 | 0,49 | 0,47 | 0,52 | 0,55 |
| P5 | 0,41 | 0,35 | 0,66 | 0,51 | 0,68 | 0,36 | 0,89 | 0,65 |
| P6 | 0,25 | 0,33 | 0,34 | 0,34 | 0,52 | 0,43 | 0,45 | 0,37 |
| P7 | 0,52 | 0,32 | 0,33 | 0,36 | 0,28 | 0,30 | 0,31 | 0,33 |
| P8 | 0,25 | 0,31 | 0,28 | 0,26 | 0,35 | 0,51 | 0,41 | 0,39 |
| P9 | 0,25 | 0,41 | 0,37 | 0,34 | 0,53 | 0,43 | 0,55 | 0,63 |

Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF D:

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | |
|--------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Areale | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li | SM1 re / SMA re | SM1 re / PMA re | SM1 re / PPC re |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |

Abweichungssummen REF E: Shift +1, slope +2

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | | |
|-------------|------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Areal | SM1 li | SMA li | PMA li | PPC li | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re |
| Prob | | | | | | | | |
| P1 | 0,31 | 0,34 | 0,38 | 0,31 | 0,37 | 0,34 | 0,36 | 0,37 |
| P2 | 0,31 | 0,43 | 0,35 | 0,38 | 0,42 | 0,44 | 0,41 | 0,48 |
| P3 | 0,34 | 0,39 | 0,37 | 0,35 | 0,41 | 0,42 | 0,41 | 0,49 |
| P4 | 0,31 | 0,47 | 0,41 | 0,38 | 0,46 | 0,47 | 0,48 | 0,53 |
| P5 | 0,40 | 0,34 | 0,65 | 0,50 | 0,67 | 0,34 | 0,88 | 0,64 |
| P6 | 0,27 | 0,34 | 0,36 | 0,35 | 0,49 | 0,44 | 0,43 | 0,35 |
| P7 | 0,58 | 0,38 | 0,39 | 0,42 | 0,34 | 0,36 | 0,37 | 0,37 |
| P8 | 0,29 | 0,36 | 0,32 | 0,29 | 0,38 | 0,51 | 0,45 | 0,41 |
| P9 | 0,29 | 0,41 | 0,37 | 0,35 | 0,51 | 0,46 | 0,54 | 0,58 |

Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF E:

| ReRu | kontralateral (linke Hemis.) | | | ipsilateral (rechte Hemis.) | | |
|--------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Areale | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li | SM1 re / SMA re | SM1 re / PMA re | SM1 re / PPC re |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |

8.1.1.13 Abweichungssummen Short-TR „Links gegen Ruhe“

| Abweichungssummen REF A: Shift 0, slope 0 | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|--------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|--------|--|
| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | | | |
| Areal | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re | SM1 Li | SMA li | PMA li | PPC li | |
| <u>Prob</u> | | | | | | | | | |
| P1 | 0,52 | 0,48 | 0,48 | 0,54 | 0,54 | 0,50 | 0,50 | 0,57 | |
| P2 | 0,48 | 0,51 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,52 | 0,51 | 0,53 | |
| P3 | 0,45 | 0,51 | 0,50 | 0,51 | 0,57 | 0,48 | 0,58 | 0,62 | |
| P4 | 0,55 | 0,61 | 0,67 | 0,62 | 0,64 | 0,61 | 0,65 | 0,80 | |
| P5 | 0,49 | 0,53 | 0,54 | 0,58 | 0,63 | 0,57 | 0,60 | 0,68 | |
| P6 | 0,48 | 0,47 | 0,52 | 0,49 | 0,58 | 0,52 | 0,57 | 0,57 | |
| P7 | 0,43 | 0,41 | 0,40 | 0,38 | 0,42 | 0,37 | 0,38 | 0,44 | |
| P8 | 0,51 | 0,59 | 0,51 | 0,58 | 0,56 | 0,50 | 0,53 | 0,55 | |
| P9 | 0,69 | 0,48 | 0,58 | 0,55 | 0,60 | 0,52 | 0,55 | 0,64 | |

| Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF A: | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------|-----------------|--|----------------------------|-----------------|-----------------|--|--|
| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | | | |
| Areale | SM1 re / SMA re | SM1 re / PMA re | SM1 re / PPC re | | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li | | |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | | |

| Abweichungssummen REF B: Shift 0, slope +1 | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|--------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|--------|--|
| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | | | |
| Areal | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re | SM1 Li | SMA li | PMA li | PPC li | |
| <u>Prob</u> | | | | | | | | | |
| P1 | 0,46 | 0,42 | 0,42 | 0,49 | 0,48 | 0,44 | 0,45 | 0,51 | |
| P2 | 0,42 | 0,45 | 0,49 | 0,50 | 0,49 | 0,46 | 0,45 | 0,49 | |
| P3 | 0,39 | 0,48 | 0,45 | 0,45 | 0,55 | 0,43 | 0,56 | 0,60 | |
| P4 | 0,49 | 0,56 | 0,63 | 0,59 | 0,61 | 0,56 | 0,60 | 0,78 | |
| P5 | 0,43 | 0,48 | 0,48 | 0,55 | 0,60 | 0,53 | 0,54 | 0,67 | |
| P6 | 0,44 | 0,42 | 0,47 | 0,47 | 0,52 | 0,48 | 0,51 | 0,53 | |
| P7 | 0,37 | 0,35 | 0,34 | 0,32 | 0,36 | 0,31 | 0,33 | 0,38 | |
| P8 | 0,46 | 0,54 | 0,45 | 0,54 | 0,53 | 0,45 | 0,49 | 0,51 | |
| P9 | 0,63 | 0,42 | 0,54 | 0,50 | 0,56 | 0,46 | 0,51 | 0,61 | |

| Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF B: | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | |
|--------|----------------------------|-------------------|-------------------|--|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Areale | SM1 re/ SMA re | SM1 re/ PMA re | SM1 re/ PPC re | | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |

Abweichungssummen REF C: Shift 0, slope +2

| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | | |
|-------------|----------------------------|--------|--------|--------|--|----------------------------|--------|--------|--------|
| Areal | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re | | SM1 Li | SMA li | PMA li | PPC li |
| Prob | | | | | | | | | |
| P1 | 0,40 | 0,38 | 0,38 | 0,45 | | 0,44 | 0,40 | 0,41 | 0,47 |
| P2 | 0,37 | 0,41 | 0,45 | 0,46 | | 0,45 | 0,42 | 0,41 | 0,45 |
| P3 | 0,34 | 0,44 | 0,41 | 0,41 | | 0,51 | 0,39 | 0,52 | 0,58 |
| P4 | 0,45 | 0,52 | 0,59 | 0,55 | | 0,57 | 0,52 | 0,56 | 0,76 |
| P5 | 0,38 | 0,45 | 0,44 | 0,52 | | 0,58 | 0,49 | 0,53 | 0,66 |
| P6 | 0,40 | 0,38 | 0,44 | 0,43 | | 0,48 | 0,44 | 0,47 | 0,49 |
| P7 | 0,34 | 0,35 | 0,29 | 0,27 | | 0,32 | 0,30 | 0,30 | 0,34 |
| P8 | 0,42 | 0,50 | 0,41 | 0,50 | | 0,49 | 0,41 | 0,46 | 0,47 |
| P9 | 0,57 | 0,38 | 0,51 | 0,46 | | 0,52 | 0,42 | 0,47 | 0,58 |

Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF C:

| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | |
|--------|----------------------------|-------------------|-------------------|--|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Areale | SM1 re/ SMA re | SM1 re/ PMA re | SM1 re/ PPC re | | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |

Abweichungssummen REF D: Shift 0, slope 3

| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | | |
|-------------|----------------------------|--------|--------|--------|--|----------------------------|--------|--------|--------|
| Areal | SM1 re | SMA re | PMA re | PPC re | | SM1 Li | SMA li | PMA li | PPC li |
| Prob | | | | | | | | | |
| P1 | 0,36 | 0,34 | 0,34 | 0,40 | | 0,40 | 0,36 | 0,37 | 0,44 |
| P2 | 0,32 | 0,36 | 0,41 | 0,42 | | 0,41 | 0,37 | 0,38 | 0,41 |
| P3 | 0,29 | 0,39 | 0,36 | 0,37 | | 0,48 | 0,34 | 0,49 | 0,55 |
| P4 | 0,41 | 0,49 | 0,56 | 0,50 | | 0,54 | 0,49 | 0,53 | 0,74 |
| P5 | 0,33 | 0,41 | 0,41 | 0,50 | | 0,57 | 0,46 | 0,52 | 0,66 |
| P6 | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,38 | | 0,44 | 0,41 | 0,43 | 0,45 |
| P7 | 0,34 | 0,35 | 0,30 | 0,25 | | 0,32 | 0,31 | 0,31 | 0,31 |
| P8 | 0,37 | 0,47 | 0,37 | 0,47 | | 0,46 | 0,36 | 0,43 | 0,42 |
| P9 | 0,54 | 0,33 | 0,49 | 0,41 | | 0,47 | 0,37 | 0,44 | 0,55 |

Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF D:

| |
|--|
| |
|--|

| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | |
|----------|----------------------------|-------------------|-------------------|--|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Areale | SM1 re/ SMA re | SM1 re/ PMA re | SM1 re/ PPC re | | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |

Abweichungssummen REF E: Shift +1, slope +2

| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | | |
|-----------|----------------------------|--------|--------|--------|--|----------------------------|--------|--------|--------|
| Areal | SMA re | SMA li | PPC re | PPC li | | PMA re | PMA li | SM1 re | SM1 li |
| Prob | | | | | | | | | |
| P1 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,41 | | 0,42 | 0,40 | 0,41 | 0,45 |
| P2 | 0,33 | 0,38 | 0,41 | 0,42 | | 0,42 | 0,39 | 0,38 | 0,41 |
| P3 | 0,28 | 0,41 | 0,35 | 0,38 | | 0,45 | 0,38 | 0,46 | 0,52 |
| P4 | 0,40 | 0,48 | 0,53 | 0,49 | | 0,51 | 0,47 | 0,50 | 0,70 |
| P5 | 0,32 | 0,43 | 0,38 | 0,46 | | 0,52 | 0,46 | 0,47 | 0,60 |
| P6 | 0,36 | 0,35 | 0,43 | 0,42 | | 0,45 | 0,41 | 0,45 | 0,46 |
| P7 | 0,40 | 0,39 | 0,35 | 0,31 | | 0,37 | 0,36 | 0,36 | 0,36 |
| P8 | 0,39 | 0,49 | 0,39 | 0,47 | | 0,45 | 0,39 | 0,41 | 0,43 |
| P9 | 0,56 | 0,35 | 0,49 | 0,40 | | 0,46 | 0,38 | 0,42 | 0,52 |

Wilcoxon-Test Abweichungssummen REF E:

| LiRu | Kontralat. (rechte Hemis.) | | | | ipsilateral (linke Hemis.) | | |
|----------|----------------------------|-------------------|-------------------|--|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Areale | SM1 re/ SMA re | SM1 re/ PMA re | SM1 re/ PPC re | | SM1 li / SMA li | SM1 li / PMA li | SM1 li / PPC li |
| p | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* | | <=0.9648* | <=0.9648* | <=0.9648* |