Aus der Nuklearmedizinischen Klinik der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. BA (open) H.-W. Müller

Die funktionelle Konnektivität des Gyrus frontalis medialis in der auditiven und visuellen Einzelwort-Perzeption

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

> vorgelegt von Joel Aissa 2013

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf Dekan Referent: Univ.-Prof. Dr. med. BA (open) H.-W. Müller Korreferent: Prof. Dr. med. Dirk Blondin

Zusammenfassung

Einleitung:

Zentrales Thema der Dissertation ist die funktionelle Konnektivität des Gyrus frontalis medialis in der auditiven und visuellen Einzelwort-Perzeption. Der Gyrus frontalis medialis besitzt eine zentrale Funktion in der neuronalen Verarbeitung präsentierter Wörter. Wissensbedarf besteht jedoch auf dem Felde der funktionellen Konnektivität. Dabei konzentriert sich diese Dissertation auf die Entdeckung spezieller Hirnregionen, welche eine hohe funktionelle Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis aufweisen. Welche Regionen zeigen eine hohe funktionelle Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis? Zeigen sich im Vergleich der sieben Probanden reproduzierbare funktionelle Netzwerke?

Methodik:

Es handelt sich um eine fMRT Studie mit zwei voneinander getrennten Versuchsabschnitten: Zum einen wurden akustisch und zum anderen visuell Substantive präsentiert. Das *blood oxygen level dependant* (BOLD) Signal wurde während des Experimentes zur Messung der neuronalen Aktivität gemessen. Über Auswertung derjenigen Regionen, zu denen hohe funktionelle Konnektivität mit einer Korrelationsstärke von $\geq 0,6$ besteht, lassen sich stimulusspezifische Netzwerke identifizieren.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse zur funktionellen Konnektivität des bilateralen GFM in der Einzelwort-Perzeption zeigen während der auditiven Kondition probandenübergreifend hohe Konnektivitäten ausgehend von dem rechten GFM zu dem kontralateralen Gyrus frontalis medialis, dem ipsilateralen Gyrus frontalis superior, dem Precuneus beidseits, dem SMA beidseits und dem rechten Gyrus parietalis superior und inferior. Der linke GFM zeigt hohe Konnektivitäten zu dem kontralateralen Gyrus frontalis medialis, dem ipsilateralen Gyrus frontalis superior, der linksseitigen Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior, dem Precuneus links, dem SMA links und dem Gyrus parietalis inferior und superior links während der auditiven Kondition. Für die visuelle Kondition zeigt sich eine hohe Konnektivität des GFM beidseits zu dem jeweils ipsilateralen Gyrus frontalis superior, dem jeweils kontralateralen GFM, dem jeweils ipsilateralen Gyrus parietalis superior und dem SMA links. Der rechte GFM zeigt zudem eine erhöhte Konnektivität zu dem Precuneus beidseits. Die stärkste Konnektivität besteht zwischen dem linken GFM und der Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior links während der visuellen Kondition. Im Unterschied zu der auditiven Kondition findet sich eine erhöhte Konnektivität zwischen GFM rechts zum rechten Temporalpol und zwischen GFM links zur linken Precentralregion.

Schlussfolgerung:

Diese Arbeit unterstreicht die Einbindung des GFM in ein neuronales Netzwerk in der Modulation von akustischen und visuellen Reizen. Als neue Erkenntnis zeigt sich eine linksdominant hohe Konnektivität des linken GFM zu dem linken SMA, der linken Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior und dem Gyrus parietalis inferior links in der visuellen und auditiven Kondition. Entgegen Resting-State Arbeiten zur funktionellen Konnektivität der Sprachverarbeitung zeigt sich in dieser Arbeit eine erhöhte Konnektivität des rechten GFM zu dem Precuneus beidseits und des linken GFM zu dem linken Precuneus während beider Konditionen. Anders als bisherige methodische Ansätze zur Bestimmung der funktionellen Konnektivität wurde in dieser Studie eine Voxel basierte Bestimmung der Konnektivitätsstärke entlang des GFM einer Hemisphäre und einer Kondition angewandt. Zudem zeigen sich Übereinstimmungen zu Autoradiografiearbeiten und Traktografiearbeiten und fundieren somit Erkenntnisse zur effektiven Konnektivität.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AUD	auditiv
BA	Brodmann-Areal
BOLD	Blood oxygenation level dependent
DFPMC	dorsomedialer prefrontaler Kortex
DWI	diffusion tensor imaging
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie
GFM	Gyrus frontalis medialis
MNI- Koordinatensystem	Montreal Neurological Institute Koordinatensystem
MRT	Magnetresonanztomographie
MW	Mittelwert
Ncl./ Ncll.	Nucleus/ Nuclei
PCA	Principal Component Analysis
ICA	Independent Component Analysis
RAM	Random-Access-Memory
SLF	superior longitudinal fasciculus
ROI	Region of interest
SD	Standardabweichung
SMA	Supplementmotorisches Areal
Т	Tesla
Tab.	Tabelle
VIS	visuell
VOI	Voxel of interest
WLD	Word Listening by Domain

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	1						
1.1 Der Gyrus frontalis medialis	1						
1.2 Anatomie der grauen Substanz							
1.3 Das auditorische System	2						
1.4 Das visuelle System	4						
1.5 Funktionelle Anatomie des Sprachverständnisses und der Sprachproduktion	4						
1.6 Anteroposteriorer Konnektivitätsgradient der Sprachprozessierung	7						
1.7 Funktionelle Magnetresonanztomografie							
2 MATERIAL UND METHODEN	9						
2.1 Experiment 2.1.1 Probanden	9 9						
2.1.2 Experimenteller Aufbau2.1.3 Technische Daten2.1.4 Stimulusdesign	10 11 12						
 2.2 Definition der Ausgangsvoxel 2.2.1 Vorbereitung und Orientierung 2.2.2 Maskenerstellung und Maskenabgleich 2.2.3 Festlegung der Ausgangsvoxel 2.2.4 Ausgangsvoxel-Tabellarisierung und Zuordnung von NT Werten 	12 13 13 14 14						
 2.3 Funktionelle Konnektivität 2.3.1 Berechnung der funktionellen Konnektivität zu den Seedvoxel 2.3.2 Identifikation der lokalen Maxima für jeden Seedvoxel 2.3.3 Auswahl der lokalen Maxima 2.3.4 Räumliche Toleranz 2.3.5 Grafische Darstellung 	15 15 16 18 18 18						
 2.4 Auswertung 2.4.1 Tabellarische Darstellung der Kreuzkorrelogramme 2.4.2 Generierung von "Wenn" Funktionen zur Korrelationsmustereinteilung 2.4.3 Erstellen von Kreisdiagrammen zur Individualanalyse 2.4.4 Auswertung zur Gruppenanalyse 	19 19 20 21 22						
3 ERGEBNISSE	23						
3.1 Individualanalyse zur auditiven Kondition	23						
 3.1.1 Funktionelle Konnektivität rechter Gyrus frontalis medialis 3.1.1.1 Proband 1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.1.1.2 Proband 2 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.1.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.1.1.4 Proband 5 	23 23 23 24 25 25 26 27 27 28 29 III						

Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens	29 30
3.1.1.5 Proband 6	31
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	31
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	32
3.1.1.6 Proband 7	33
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	33
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	34
Zielregionen innerhalb des Frontallannens	35
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	36
3.1.2 Ausgangsvoxel linker Gyrus frontalis medialis	37 37
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	37
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	38
3.1.2.2 Proband 2	39
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	39
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	40
3.1.2.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallannens	41
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	41
3.1.2.4 Proband 5	43
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	43
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	44
3.1.2.5 Proband 6	45
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	45
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	46
Zielregionen innerhalb des Frontallannens	47
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	48
3.1.2.7 Proband 8	49
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	49
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	50
3.2 Individualanalyse zur visuellen Kondition	51
3.2.1 Ausgangsvoxel rechter Gyrus frontalis medialis	51
3.2.1.1 Proband 1	51
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	51
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	52
5.2.1.2 Proband 2 Zielregionen innerhalb des Frontallannens	53
Zielregionen auferhalb des Frontallannons	54
Zienegionen aubernaib des Fiontanabbens	55
3.2.1.3 Proband 4	55
3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens	22
3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens	55 56
3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens	55 56 57
3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens	55 56 57 57 58
3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6	55 56 57 57 58 59
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 	55 56 57 57 58 59 59
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 	53 56 57 57 58 59 59 60
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 	53 56 57 57 58 59 59 60 61
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen innerhalb des Frontallappens 	55 56 57 57 58 59 59 60 61 61
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 	55 56 57 57 58 59 59 60 61 61 62 62
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 	55 56 57 57 58 59 59 60 61 61 61 62 63 63
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 	55 56 57 57 58 59 59 60 61 61 62 63 63 63
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen außerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 	55 56 57 57 58 59 60 61 61 61 62 63 63 63
 3.2.1.3 Proband 4 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.4 Proband 5 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.5 Proband 6 Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.6 Proband 7 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.2.1.7 Proband 8 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.2.1.8 Proband 1 	55 56 57 57 58 59 59 60 61 61 61 62 63 63 63 64

Zielregionen innerhalb des Frontallappens	65							
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	66							
3.2.2.2 Proband 2 Zielregionen innerhalb des Frontallannens	67							
Zielregionen außerhalb des Frontallappens								
3.2.2.3 Proband 4	69							
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	69							
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	70							
3.2.2.4 Proband 5	71							
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	/1 72							
3.2.2.5 Proband 6	73							
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	73							
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	74							
3.2.2.6 Proband 7	75							
Zielregionen innerhalb des Frontallappens Zielregionen außerhalb des Frontallappens 3.2.2.7 Proband 8								
3.2.2.7 Proband 8 Zielregionen innerhalb des Frontallappens								
Zielregionen innerhalb des Frontallappens	77							
Zielregionen außerhalb des Frontallappens	78							
3.3 Gruppenanalyse zur auditiven Kondition	79							
3.3.1 Ausgangsvoxel rechter Gyrus frontalis medialis	80							
3.3.1.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens	80							
3.3.1.2 Zielregionen außerhalb des Frontallappens	81							
3.3.2 Ausgangsvoxel linker Gyrus frontalis medialis	82							
3.3.2.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens	82							
3.3.2.2 Zielregionen außerhalb des Frontallappens	83							
3.4 Gruppenanalyse zur visuellen Kondition	84							
3 4 1 Ausgangsvoxel rechter Cyrus frontalis medialis	84							
3.4.1 Ausgangsvoxel rechter Gyrus frontalis medialis 3.4.1.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens								
3.4.1.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens 3.4.1.2 Zielregionen außerhalb des Frontallappens								
3.4.2 Ausgangsvoxel linker Gyrus frontalis medialis	86							
3.4.2.1 Zielregionen außerhalb des Frontallappens	80							
5.4.2.2 Elenegionen aubernato des Frontanappens	80							
4 DISKUSSION	87							
4.1 Seed Voxel basierendes Analyseverfahren im Vergleich zu multivariaten Analyseverfahren	87							
4.2 Vergleich zwischen effektiver und funktioneller Konnektivität	89							
4.3 Vergleich der funktionellen Konnektivität des GFM mit Literaturergebnissen zur auditorischen								
und visuellen Wortverarbeitung	90							
4.4 Vergleich der Interkonnektivität des GFM mit Literaturergebnissen zur funktionellen Konnektivität der Sprachverarbeitung	95							
	50							
5 SCHLUSSFOLGERUNG	96							
6 LITERATURVERZEICHNIS								

1 Einleitung

In dieser Dissertation wird die funktionelle Konnektivität des Gyrus frontalis medialis während der auditiven und visuellen Sprachstimulation untersucht. Ziel der Arbeit ist die Identifikation von Kortexregionen, welche eine hohe funktionelle Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis aufweisen. Dies erfolgt in der Individualanalyse der einzelnen Probanden und in der sich anschließenden Gruppenanalyse.

Die folgenden Ausführungen zu der Anatomie sowie den funktionellen Aspekten des Gyrus frontalis medialis basieren auf den Ausführungen in Trepel, 2004.

1.1 Der Gyrus frontalis medialis

Der Gyrus frontalis medialis ist Teil des Frontallappens. Dieser liegt der knöchernen vorderen Schädelgrube auf und bildet den Frontalpol des Gehirns. Der Frontallappen unterteilt sich in den Gyrus frontalis superior, den Gyrus frontalis medialis und den Gyrus frontalis inferior. Die genannten Gyri werden durch den Sulcus frontalis superius und den Sulcus frontalis inferius voneinander getrennt. Die dorsale Abgrenzung erfährt der Gyrus frontalis medialis durch den Sulcus precentralis und den sich anschließenden Gyrus precentralis. Die Insula bildet ebenfalls einen Teil des Frontallappens. Der Gyrus frontalis inferior wird durch den Ramus ascendens und den Ramus anterior des Sulcus lateralis in eine Pars orbitalis, triangularis und opercularis unterteilt (Trepel, 2004).

Funktionell gliedert sich der Frontallappen in Areale mit einer primär sensomotorischen Funktion (Gyrus precentralis). Des Weiteren existieren Areale, die eine sekundär sensomotorische Funktion besitzen. Hierbei handelt es sich um die prämotorischen Areale des Frontallappens. Der Frontallappen besitzt zudem tertiäre Rindenfelder welche nur schwer abgrenzbar sind und in den Brodmann Arealen 9, 10 und 11 des Frontallappens liegen. Diese Felder sind für komplexe Bewegungssynergien verantwortlich. Solche sind beim Schreiben und Sprechen unverzichtbar. Der Gyrus frontalis medialis beinhaltet die Brodmann Areale 10, 46, 9 und 6. Das frontale Augenfeld liegt in dem Brodmann Areal 9 des Frontallappens. Funktionell ist das frontale Augenfeld für die Initiation willkürlicher Augeneinstellbewegungen auf ein gewähltes Blickziel verantwortlich. Das motorische

Sprachzentrum Broca nimmt den Anteil der Pars opercularis und Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior ein (Trepel, 2004). Es zeigt sich eine Einbindung des Gyrus frontalis medialis in den Fasciculus occpitofrontalis inferior. Dieser stellt eine wichtige Faserbahn des semantischen Systems dar (Bookheimer, 2002). Ebenfalls zeigt sich eine Anbindung des Gyrus frontalis medialis zu dem Fasciculus longitudinalis superior. Dieser bildet den Hauptanteil assoziativer Fasern, welche parietotemporale Areale mit dem Lobus frontalis verbinden (Makris et al., 2005). Zusätzlich kann vorausgesetzt werden, dass der Lobus frontalis in ein großes distributives Netzwerk eingebettet ist, welches die Sprachkontrolle über den Nucleus caudatus kontrolliert (Duffau, 2008).

1.2 Anatomie der grauen Substanz

Die graue Substanz bildet die Hirnrinde. Diese umhüllt das Großhirn als Großhirnrinde und das Kleinhirn als Kleinhirnrinde. Die graue Substanz beinhaltet Zellkörper, Dendriten und Axone. Axone sind unmyelinisierte axonale Aufzweigungen. Im Gegensatz dazu enthält die weiße Substanz nur Axone. Diese sind zu einem Hauptteil myelinisiert. Die graue Substanz kann in verschiedene Bauprinzipien unterteilt werden. Eine flächige Anordnung spricht für eine zweidimensionale Verarbeitung. Die Betonung einer Flächenrichtung spricht für eine eindimensionale Verarbeitung. Das Bauprinzip der Großhirnrinde folgt einem bestimmten Muster. In allen Schichten überwiegen Pyramidenzellen. Diese sind via Axonkollateralen und Assoziationsfasern durch die weiße Substanz miteinander verbunden. Histologisch kann die Großhirnrinde in senkrecht zur Hirnoberfläche stehende Säulen und in Schichten unterteilt werden. Eine typische Säule mit einem Durchmesser von 0,3 mm beinhaltet etwa 10000 Nervenzellen. Sie kann in sechs Schichten unterteilt werden. Die erste Schicht ist die Molekularschicht, welche sich direkt der Pia mater anschließt. Schicht zwei bildet die äußere Körnerzellschicht. Schicht drei bildet die äußere Pyramidenzellschicht. Daran schließt sich die innere Körnerzellschicht an. Schicht fünf wird als innere Pyramidenzellschicht bezeichnet. Die letzte Schicht ist die Lamina multiformis (Junqueira and Caneiro, 2000).

1.3 Das auditorische System

Das auditorische System bildet sich aus einem afferenten System, welches die

Signalkaskade zur primären Hörrinde weiterleitet. Daran schließt sich die Signalkaskade zur sekundären Hörrinde an. Die Hörbahn beginnt im Innenohr mit den afferenten Fortsätzen der bipolaren Hörnervenzellen. Ihre Signale werden zu den Ncll. Cochleares in der Medulla oblongata weitergeleitet. Von dort aus ziehen die Fasern zum größten Teil über das Corpus trapezoideum zur Gegenseite. Die meisten dieser Fasern werden an den Ncll. Olivares superiores und dem Ncl. Corporis trapezoidei verschaltet. Ein kleinerer Anteil verläuft auf der ipsilateralen Seite. Über den Lemniscus lateralis gelangen die kontralateralen Fasern zu den Colliculi inferiores. Von dort aus ziehen sie zu dem Corpus geniculatum mediale des Thalamus. Dort werden sie verschaltet um danach über die Hörstrahlung zur primären Hörrinde zu ziehen (Trepel, 2004).

Die primäre Hörrinde wird durch die Gyri temporales transversi oder Heschl-Querwindungen gebildet. Die Endungen aus der Hörstrahlung sind hier tonotopisch lokalisiert. Die Heschl-Querwindungen sind für die interpretationsfreie Bewusstwerdung der auditorischen Impulse aus dem Innenohr verantwortlich. Erst in der Weiterverarbeitung in der sekundären Hörrinde werden die Laute zu sinnvollen Wörtern zusammengesetzt. Die sekundäre Hörrinde ist auf den Arealen 42 und 22 nach Brodmann lokalisiert. Sie erhält den Großteil ihrer Afferenzen aus der primären Hörrinde. Hier erfolgt die interpretative Wortverarbeitung. Dabei ist die dominante Hemisphäre für die Art der Wortverarbeitung entscheidend. So legt die dominante Hemisphäre großes Gewicht auf das sensorische Sprachverständnis. In diesem Zusammenhang spricht man auch von dem Wernicke-Zentrum. Die nichtdominante Hemisphäre ist eher für die nichtrationale Wortverarbeitung zuständig. Afferenzen erhält die sekundäre Hörrinde ebenfalls vom Gyrus angularis. Dieser gilt als unverzichtbare Schaltstelle aus visuellem und auditorischem Kortex (Trepel, 2004).

Hirnareale innerhalb des Parietal- und Frontallappens reagieren sowohl auf visuelle als auch auf auditorische Signale. In manchen dieser sich überschneidenden Areale zeigen sich Assoziationen zu den "What"- und "Where"- Strömen des visuellen Systems. Der ventrale "What"-Strom zieht vom anterioren Teil des Kerngebietes und endet im präfrontalen Kortex. Dieser Strom identifiziert Schallereignisse. Der dorsale "Where"-Strom zieht vom posterioren Kerngebiet zum parietalen Kortex und zum präfrontalen Kortex. Hier werden Schallereignisse lokalisiert (Belin and Zatorre, 2000).

1.4 Das visuelle System

Das visuelle System gliedert sich in eine Sehbahn, welche das afferente System zur primären Sehrinde bildet. Die primäre Sehrinde leitet die verarbeiteten Informationen zur sekundären Sehrinde weiter. Das erste Neuron der Sehbahn bildet die Retina. Von dort aus werden die Signale zum zweiten Neuron der Sehbahn den bipolaren Zellen weitergeleitet. Nach Umschaltung projizieren die bipolaren Zellen zum dritten Neuron. Dieses wird aus den großen Ganglienzellen gebildet. Nach Eintritt des II Hirnnervs in die Schädelhöhle vereinigt er sich mit dem Nervus opticus der Gegenseite zum Chiasma opticum. Nach der Kreuzung der jeweiligen Faseranteile zieht der Tractus opticus zum Corpus geniculatum laterale des Thalamus. Dort werden die visuellen Signale auf das vierte Neuron weitergeleitet. Von dort aus zieht die Sehbahn über die Gratiolet-Sehstrahlung zur primären Sehrinde weiter. Die Wand des Sulcus calcarinus wird von der primären Sehrinde ausgekleidet. Nach Brodmann zeigt sich hier das Areal 17. Die primäre Sehrinde ist für das Bewusstwerden der visuellen Impulse verantwortlich. Efferenzen ziehen von hier zu den Arealen der sekundären Sehrinde. Die sekundäre Sehrinde erstreckt sich über den Okzipitallappen, bis in Regionen des Parietallappens und Temporallappens.

1.5 Funktionelle Anatomie des Sprachverständnisses und der Sprachproduktion

Aktuelle fMRI Studien zur funktionellen Konnektivität des Sprachverständnisses und der Sprachproduktion zeigen eine Vielzahl von anatomischen Hirnregionen auf, welche hohe Aktivitäten während spezifischer Sprachprozesse bei gesunden Erwachsenen aufweisen. Dabei wird zwischen fMRI Studien zur Sprachproduktion und zu dem Sprachverständnis unterschieden. Eine weitere Kategorie bilden die zugrunde liegenden Stimuli. So wird zwischen prelexikalem Stimulus, Einzelwortstimulus und Satzstimulus unterschieden (Price, 2010).

Die auditorische Sprachverarbeitung extrahiert sinnvolle Informationen aus sich kontinuierlich wechselnden akustischen Reizen und integriert diese in das Sprachverständnis. Die Art der gewonnenen Information wird durch die individuelle Erwartung und Intention des Zuhörers beeinflusst. Zusätzlich spielen äußere Faktoren wie beispielsweise Gestiken eine wichtige Rolle. Somit beinhaltet das Sprachverständnis die Integration von auditorischen und visuellen Reizen (Price, 2010).

Die prelexikale Sprachwahrnehmung beginnt vor der eigentlichen semantischen Erkennung und beinhaltet die akustische Analyse von Frequenzspektren und verschiedenen Zeitrahmen. FMRI Studien belegen, dass Teile des Gyrus temporalis superior eng mit der prelexikalen Sprachwahrnehmung verknüpft sind (Leff et al., 2009; Rauschecker and Scott, 2009). Von ebenfalls großer Bedeutung ist die Heschlregion für die prelexikale Sprachwahrnehmung (Britton et al., 2009; Leff et al., 2009). Bezüglich der semantischen Sprachverarbeitung zeigen bilaterale Anteile des Gyrus temporalis superior durchgehend erhöhte Aktivitäten (Friederici et al., 2010; Obleser and Kotz, 2010). Es ist anzumerken, dass fMRI Studien zur semantischen Sprachverarbeitung distribuierte Aktivitäten in den ventralen, anterioren und posterioren Anteilen des perisylvischen Kortex aufwiesen (Davis and Gaskell, 2009a; Kouider et al., 2010). Diese Distribution bildet möglicherweise ein Netzwerk der semantischen Sprachverarbeitung mit der Heschlregion als Schaltzentrum (Price, 2010; Rauschecker and Scott, 2009). Das Satzverständnis als weitere Untergruppe des Sprachverständnisses zeigt erhöhte Aktivitäten in anterioren und posterioren Anteilen des linken Gyrus temporalis medialis (Birn et al., 2010; Mashal et al., 2009). Zusätzlich zeigen bilaterale Anteile des anterioren Temporalpoles sowie der linke Gyrus angularis und der posteriore Precuneus übereinstimmende Aktivitäten (Mashal et al., 2009; Obleser and Kotz, 2010; Rogalsky and Hickok, 2009; Visser et al., 2010). Sind semantische Zusammenhänge komplex werden bilaterale Regionen der Pars orbitalis aktiviert (Bilenko et al., 2009; Willems et al., 2009; Ye and Zhou, 2009). Werden plausible Sätze von unplausiblen Zusammenhängen differenziert, zeigen sich bilaterale Aktivitäten in der Pars opercularis (Nosarti et al., 2010; Schafer and Constable, 2009; Tyler et al., 2010). FMRI Studien zum Vergleich von grammatikalisch korrekten zu falschen Sätzen ergaben, dass syntaktische Prozesse mit einer erhöhten Aktivität im linken posterioren Anteil des Planum temporale und dem linken Gyrus supramarginalis korrelieren (Friederici et al., 2009). Dieselben Regionen zeigen ebenfalls eine durchgehend erhöhte Aktivität während der Sprachproduktion in der Abwesenheit von auditorischen Hinweisen und könnten somit eine wesentliche Rolle während der subvokalen Artikulation spielen (Price, 2010).

Die Sprachproduktion basiert auf einem komplexen multimodalen Prozess, welcher konzeptionelle Ideen in Artikulation umwandelt. Die zu verwendeten Wörter müssen zum einen erkannt und in die sinnvolle Syntax eingegliedert werden. Wörter mit ähnlichem Inhalt müssen gleichzeitig unterdrückt werden. Somit stellt die Sprachproduktion einen dynamischen Prozess aus Verwendung geeigneter Wörter und Inhibition der ungeeigneten Wörter dar (Ali et al., 2010; Hocking et al., 2009).

Unter der Betrachtung des semantischen Gedächtnisses konnten sieben linksseitige Regionen eruiert werden, die mit der Speicherung und dem Abfragen einer semantischen Erinnerung eng verknüpft sind. Es handelt sich um den Gyrus frontalis inferior, den ventralen und dorsalen präfrontalen Kortex, Teile des Gyrus parietalis inferior, den Gyrus temporalis medialis, den fusiformen Gyrus, den Gyrus parahippocampalis und die Pars posterior des Gyrus cinguli (Binder et al., 2009). Diese Regionen werden auch während des Sprachverständnisses aktiviert. Ihre individuelle Beteiligung an der Sprachproduktion ist von der jeweiligen Aufgabe und dem Typ der semantischen Information abhängig (Birn et al., 2010; de Zubicaray and McMahon, 2009; Hocking et al., 2009; Ye and Zhou, 2009).

Dem Gyrus frontalis medialis kommt im Rahmen der Wortfindung eine wichtige Rolle zuteil. Wird die Wortgenerierung mit einer reinen Leseaufgabe verglichen so zeigten sich signifikante Prozesse innerhalb des linken Gyrus frontalis medialis und inferior, sowie der Pars opercularis und triangularis (Jeon et al., 2009; Whitney et al., 2009). Andere Studien zeigten zusätzlich, dass die Bedeutung des Gyrus frontalis medialis während der Wortfindung unabhängig vom Typ des zu generierenden Wortes ist (de Zubicaray and McMahon, 2009; Heim et al., 2009). Eine weitere wichtige Schaltstelle der Wortfindung stellt der linke dorsale Anteil der Pars opercularis dar (Fridriksson et al., 2009; Jeon et al., 2009). Zudem zeigte der linke ventrale Anteil der Pars opercularis durchgehend eine erhöhte Aktivität während der Wortfindung (Zheng, 2009). Beide Anteile der Pars opercularis sind somit mit dem Sprachverständnis und der Sprachproduktion eng verknüpft. Während der Artikulation, dem letzten Schritt der Sprachproduktion, zeigen der Motor- und Prämotorkortex, das Cerebellum, der supplementärmotorische Kortex und Anteile des Gyrus temporalis superior sowie des temporo-parietalen Kortex Aktivitätssteigerungen (Chang, 2009; Kircher, 2009).

Das Lesen erfordert die Koordination neuronaler Abläufe entlang einer großen Anzahl von Hirnregionen. Bisherige Arbeiten zeigten eine gut definierte dem Lesen zugeordnete Gruppe von funktionell aktiven Hirnregionen wie dem fronto-parietal und cinguloopercular kontrolliertem Netzwerk (Fiez and Petersen, 1998; Jobard et al., 2003). Neue Ergebnisse zeigen in fMRI Konnektivitätsstudien, dass die scheinbar lesespezifischen Netzwerke auch während anderer Aufgaben aktiviert werden (Vogel et al., 2013). Der aktuellste Wissenstand zur funktionellen Anatomie der Sprache basiert auf fundierten und umfangreichen Ergebnissen in welchem Rahmen spezifische Hirnregionen mit bestimmten Sprachaufgaben verknüpft sind. Diese Arbeit widmet sich der funktionellen Konnektivität des Gyrus frontalis medialis während der Einzelwort-Perzeption.

1.6 Anteroposteriorer Konnektivitätsgradient der Sprachprozessierung

Auch nach über 140 jähriger Forschung zur Anatomie und funktionellen Anatomie der Sprache bleiben die Konnektivitäten insbesondere des Broca Areals zu dem GFM noch unklar. Mehrere Forschungsarbeiten mit methodisch unterschiedlichen Ansätzen skizzieren Netzwerke mit einem anteroposterioren Konnektivitätsgradienten.

Aktuelle Resting-State Arbeiten zur funktionellen Konnektivität der Sprachverarbeitung zeigen Konnektivitäten zwischen dem Broca Areal und Anteilen des Gyrus precentralis als Region des primär motorischen Kortexes (Margulies and Petrides, 2013). Zusätzlich zeigten sich in dieser Arbeit Konnektivitäten zu dem Gyrus angularis, welcher in Anteilen des Gyrus parietalis inferior lokalisiert ist. Funktionelle Konnektivitätsarbeiten zeigten, dass ventrale Anteile des Gyrus precentralis die orofasziale Muskulatur representieren (Martin et al., 2004). Zusätzlich ließen sich Konnektivitäten zwischen der Pars opercularis des Gyrus frontalis inferior und Teilen das Gyrus frontalis medialis, dem SMA und dem Gyrus temporalis superior feststellen. Die Pars triangularis konnektiert zu anterioren Teilen des SMA und zu Anteilen des Gyrus frontalis superior und Teilen des Temporallappens. (Margulies and Petrides, 2013).

Autoradiografiemethoden an Makaken beschreiben einen ventralen temporofrontalen Strom von Faserbahnen, welcher auditorische und visuelle Kerngebiete verbindet. Der Strom endet in der Pars orbitalis und triangularis des Gyrus frontalis inferior. Zusätzlich wird ein dorsaler Strom beschrieben, welcher die Pars orbitalis und triangularis mit dem Gyrus parietalis inferior verbindet (Petrides and Pandya, 2009). Weitere Faserbahnen bestehen zwischen ventralen Anteilen des Gyrus parietalis inferior zu Anteilen des Gyrus praecentralis (Petrides and Pandya, 2009). Konnektivitäten existieren zudem zwischen Gyrus frontalis medialis und dem Broca Areal in Autoradiografiestudien an Makaken (Petrides and Pandya, 2002). Aktuelle Traktografiestudien zur strukturellen Anatomie das Broca Areals und des Gyrus frontalis medialis proklamieren eine anteroposterior gerichtete Faserbahn. Diese verbindet ventrale Anteile des Broca Areals mit den BA 6, 8 und 9 des frontomedialen Kortexes. Posteriore Anteile des Broca Areals zeigen hingegen Konnektivitäten zu dem SMA und Pre-SMA (Ford et al., 2010). Zudem konnektiert das Broca Areal zu dem inferioren Parietallappen sowie dem Gyrus temporalis medialis und superior (Catani et al., 2005; Frey et al., 2008).

1.7 Funktionelle Magnetresonanztomografie

Grundlage der Anwendung zur funktionellen MR Bildgebung ist der Versuch Hirnregionen zu identifizieren welche möglichst genau auf definierte äußere Anregung mit einer Veränderung des Signals reagieren. Dabei werden solche Signalveränderungen meistens auf T2 gewichteten Bildern beobachtet. Klassische Stimuli sind beispielsweise visuelle oder sensomotorische Reize. Es wird eine Korrelation zwischen Reiz und Signalveränderung beobachtet.

Als Signal dient in der fMRT das "*Blood Oxygen- Level Dependent*" (BOLD). Dabei wird davon ausgegangen, dass eine aktivierte Hirnregion einen Anstieg des Sauerstoffbedarfs verzeichnet. Das Gehirn reagiert daraufhin mit einem erhöhten kapillaren Blutfluss und einem erhöhten Blutvolumen. Die gesteigerte Zufuhr übertrifft den physiologischen Sauerstoffbedarf, so dass der Sauerstoffgehalt in der aktivierten Region ansteigt. Der erhöhte Anteil an sauerstofftragenden Hämgruppen im Hämoglobin verursacht eine längere T2 Zeit des umgebenden Wassers. Dies wiederum bedingt den Signalanstieg in den T2 gewichteten Bildern. Um den BOLD Effekt nachzuweisen werden meistens stark T2 gewichtete Sequenzen eingesetzt. Weiterhin werden meistens Block Design Untersuchungen durchgeführt, bei denen es bei kontinuierlicher Messung abwechselnde Aktivierungs- und Ruhephasen gibt (Weishaupt, 2006). Es wird von einem grob linearen Verhältnis zwischen Stimulus und BOLD Effekt ausgegangen (Dale and Buckner, 1997).

Über den zeitlichen Ablauf der lokalen Veränderung durch das Einschalten und das Ausschalten des Block-Designs werden für jedes Voxel Wahrscheinlichkeiten berechnet. Hierdurch wird die statistische Signifikanz geprüft. Wird der Schwellenwert der Wahrscheinlichkeit eines Voxel überschritten, so wird das jeweilige Voxel eingefärbt. Aufgrund der schlechten morphologischen Auflösung werden solche *activation maps* auf traditionelle MR-Bilder übertragen. So werden die funktionellen Komponenten mit den morphologischen Komponenten zusammen gebracht (Weishaupt, 2006).

2 Material und Methoden

2.1 Experiment

Die Ausführungen zu Punkt 2.1 basieren auf der Dissertation "Eine graphentheoretische Untersuchung zur funktionellen Konnektivität cerebraler Netzwerke in der fMRT: "Neural Traffic"." von Simon Baudrexel aus dem Jahr 2009 mit der Veröffentlichung "Neural traffic as voxel-based measure of cerebral functional connectivity in fMRI" (Beu et al., 2009).

2.1.1 Probanden

Die Studie wurde durch die Ethikkomission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf am 29.06.2005 mit dem Titel "fMRT-Untersuchungen zur funktionellen Konnektivität des auditorischen Systems bei einem passiven Hörparadigma mittels Neural Traffic Analyse des BOLD-Signals" genehmigt (Studiennummer: 2623).

Acht männliche gesunde Normalpersonen mit leerer Anamnese für neurologische oder psychiatrische Vorerkrankungen, Drogenabusus oder anderweitige schwere internistische Erkrankungen wurden in die fMRT-Studie eingeschlossen. Das durchschnittliche Alter betrug 29 Jahre (Range: 22-38 Jahre). Alle Probanden gaben nach ausführlicher Aufklärung über Ablauf der Untersuchung und mögliche gesundheitliche Risiken ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme. Eine Probandenversicherung wurde für die Fahrt von der Universitätsklinik Düsseldorf zum Untersuchungsort im Forschungszentrum Jülich abgeschlossen. Die Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 20 Euro. Alle Versuchspersonen sprachen Deutsch als Muttersprache, die Ergebnisse eines Worflüssigkeitstests und *Word Listening by Domain* (WLD)-Tests lagen für alle Probanden innerhalb des Referenzbereichs. Alle Probanden waren nach eigener Angabe und auf Grundlage des Edinburgh Handedness Inventory Rechtshänder.

2.1.2 Experimenteller Aufbau

Das fMRT Experiment gliedert sich in zwei streng voneinander getrennte auditorische und visuelle Abschnitte, in denen zweisilbige deutsche Substantive entweder akustisch über Kopfhörer oder in Druckbuchstaben geschrieben über einen Bildschirm präsentiert wurden. Jeder Abschnitt gliederte sich in 18 Blöcke, jeweils bestehend aus einer ON-Phase mit Präsentation von 30 unterschiedlichen Substantiven gefolgt von einer 30-sekündigen Ruhephase (OFF-Phase). Die Dauer der Stimuluspräsentation betrug im visuellen Teil des Experimentes genau 30 Sekunden, in der auditorischen Versuchsbedingung 36 Sekunden. Da die zeitliche Länge einzelner auf Tonband gespeicherter Worte um wenige ms variierte ergaben sich abhängig von der Stichprobe der gewählten Worte Abweichungen von nicht mehr als einer Sekunde von diesem Zahlenwert.

Die Auswahl der zweisilbigen Worte, die innerhalb eines Blockes präsentiert wurden, erfolgte pseudorandomisiert aus je einem von drei Pools mit einem Umfang von je 200 Worten. Währende der erste Pool Worte mit hohem Grad an Bildhaftigkeit (z.B. Blume) beinhaltete, umfasste der zweite Pool Worte mit hohem Grad an Abstraktheit (z.B. Theorie). Der dritte Pool enthielt zweisilbige Pseudoworte (z.B. Nurlik). Eine genaue Beschreibung der Auswahl der Stimuli erfolgt später. Die Stimuluspräsentation erfolgte derart, dass sowohl im auditorischen als auch im visuellen Versuchsteil jedes Wort höchstens einmal auftrat. Zusammenfassend bestand ein Versuchsteil aus 18 Blöcken, wobei je 6 Blöcke einer der drei Kategorien "Bildhaft', "Abstrakt' oder "Nonsense' zuzuordnen waren.

Die Probanden wurden angewiesen, den Worten zuzuhören bzw. diese zu lesen, ohne jedoch die Gedanken abschweifen zu lassen. Über den gesamten auditorischen Versuchsteil - nicht jedoch im visuellen Experiment - sollten die Versuchspersonen zudem die Augen geschlossen halten. Innerhalb der Ruhepausen sollten die Probanden versuchen, sich nach Möglichkeit zu entspannen. Alle Probanden gaben im Anschluss an das Experiment an, die Anweisungen nach bestem Wissen befolgt zu haben. Die Worte seien akustisch gut verständlich gewesen. Alle Probanden verneinten zudem, zu irgendeinem Zeitpunkt eingeschlafen zu sein.

2.1.3 Technische Daten

Die Messungen erfolgten an einem 1,5 T MR-Tomographen (Typ: Sonata, Siemens, Erlangen) am Institut für Medizin im Forschungszentrum Jülich. Die funktionellen Daten wurden mit einer T2*-gewichteten Gradientenecho-(EPI-) Sequenz mit den folgenden Parametern erhoben: TR (Repetition time) = 3s, TE (Echo time) = 60 ms, Flip angle = 90°, Field of View (FOV) = 200 mm. Es erfolgte eine axiale Schnittführung entlang der anterioren und posterioren Kommisur. Die Größe der (Schicht-) Matrix betrug 64*64 entsprechend einer räumlichen Auflösung von 3.12*3.13 mm2 in der (x-y-) Ebene. Die Anzahl der Schichten betrug 25, der Schichtabstand (in z-Richtung) 6 mm. Zusätzlich zu den funktionellen Daten erfolgte eine anatomische Messung mit einer hochauflösenden MP-RAGE-Sequenz mit folgenden Parametern: TR = 1.4 ms, TE = 4.4 ms, Flip angle 15°, FOV= 250 mm, sagittale Schnittführung, Matrixgröße 256*256 entsprechend einer räumlichen Auflösung von 0.98*0.98 mm2 in der (y-z-) Ebene, Anzahl der sagittalen Schichten: 128, Schichtdicke 1.25 mm.

Die akustische Präsentation der Worte erfolgte über eigens für psychophysische Experimente entwickelte MR-taugliche (Stereo-) Kopfhörer. Die Worte wurden zuvor von einem erfahrenen Sprecher auf Tonband aufgenommen, geschnitten und in elektronischer Form verlustfrei als Wav-Datei gepeichert. Die visuelle Präsentation der geschriebenen Worte erfolgte durch Projektion auf eine Leinwand über einen Videobeamer. Die Wortauswahl, das genaue Timing der Wortpräsentation und die zeitliche Koordination des Gesamtexperimentes erfolgte über die Stimulussoftware "Presentation" (Neurobehavioral Systems, Kalifornien, USA).

Die reine Messzeit des Experimentes betrug ca. 52 min (2x~20 min für die Wortpräsentation und 12 Minuten für die strukturelle Bildgebung). Für den funktionellen 3D-Datensatz ergaben sich bei einer TR von 3s ca. 400 Messpunkte sowohl für den auditorischen, als auch visuellen Versuchsabschnitt. Nach Verwerfung der Daten des ersten Versuchsblocks zur Vermeidung von Sättigungseffekten wurde die Zeitreihe für beide Bedingungen auf 376 Zeitpunkte beschränkt. Alle Details des Experimentes bezüglich Stimulus und den genauen Zeitpunkt der Präsentation wurden anonymisiert in elektronischer Form in einem Protokoll festgehalten.

2.1.4 Stimulusdesign

2.1.4.1 Auswahl der Worte aus den Kategorien "Bildhaft' und "Abstrakt'

Die Auswahl der Worte für die Kategorie ,Bildhaft' und ,Abstrakt' stützt sich im Wesentlichen auf die Arbeit von (Baschek and Battmer, 1977). 85 Versuchspersonen beurteilten in dieser Untersuchung 800 deutsche Substantive gemäß ihrem Gehalt an Bildhaftigkeit, Konkretheit und Bedeutung nach einer zuvor etablierten Werteskala durch Pavio 1968. Die Skala zur Beschreibung der Worte erstreckte sich dabei sich dabei jeweils von 1 bis 7, mit 7 als der höchsten Wertung im untersuchten Aspekt. Als Beispiel wurde für das Wort Vogel eine Bildhaftigkeit B von 6,4 bzw. eine Konkretheit K von 6,36 bestimmt. Das Wort Tendenz hingegen erhielt entsprechend die Werte B = 3,16 und K = 2,79. Da Konkretheit und Bildhaftigkeit in dieser Untersuchung sehr stark korrelieren, werden im Weiteren die Begriffe Konkretheit und Bildhaftigkeit Synonym verwendet. Worte mit einem sehr niedrigen Wert in beiden Kategorien werden vereinfachend als ,abstrakt' bezeichnet, entsprechend Worte mit einem hohen Bildhaftigkeitswert als ,bildhaft'.

2.1.4.2 Auswahl der Nonsense-Worte

Die Auswahl der Nonsense-Worte, also Worte die keine sinnhafte Bedeutung im Sprachgebrauch der Probanden haben sollten, wurde wie folgt vorgegangen: alle Worte des deutschen Grundwortschatzes wurden nach Silben getrennt und zufällig zu zweisilbigen Konstrukten zusammengefügt. So entstandene tatsächliche Worte. Worte, die diesen sehr ähnlich klingen, sei es in deutscher Sprache oder in einer anderen gängigen Fremdsprache, wurden aussortiert. 400 zufällig ausgewählte Nonsense-Worte wurden nun 5 Probanden vorgelegt, die ihrerseits entscheiden konnten, ob diese "Worte" auch subjektiv als nicht sinnhaft empfunden werden. Letztlich wurden Worte als "Nonsense-Wort" eingestuft, wenn mindestens 4 der 5 Testpersonen diese Meinung vertraten. Insgesamt wurden 200 Worte in den Nonsense-Wortpool aufgenommen.

2.2 Definition der Ausgangsvoxel

Ausgangsvoxel sind Voxel, die über die graue Substanz des Gyrus frontalis medialis in 4

mm dicken koronaren Schichten verteilt sind. Ein Ausgangsvoxel besitzt eine Größe von 1 x 1 x 1 mm. Jeder vierte Voxel wurde als *Region of interest* (ROI) auf einer koronaren Schicht erfasst. Von diesen Ausgangsvoxel des Gyrus frontalis medialis wird in einem späteren Schritt die funktionelle Konnektivität zu anderen Hirnregionen berechnet. Eine Region, die in funktionellem Kontakt mit einem Ausgangsvoxel steht, wird als Zielregion betrachtet. So kann im folgendem die Korrelationsstärke eines Ausgangsvoxel zu einer bestimmten Hirnregion betrachtet werden.

2.2.1 Vorbereitung und Orientierung

Bei dem untersuchten Hirnanteil handelt es sich um den Gyrus frontalis medialis beider Hemisphären. Der Gyrus frontalis medialis wird nach cranial vom Gyrus frontalis superior abgegrenzt. Die Abgrenzung nach caudal ist durch den Gyrus frontalis inferior vorgegeben. Der Gyrus precentralis stellt die dorsale Abgrenzung des Gyrus frontalis medialis dar. Zudem muss die individuelle Gyrierung mit beachtet werden. So werden in einem ersten Schritt die Abgrenzungen zu den oben beschriebenen Regionen lokalisiert und probandenspezifisch definiert. Als Grundlage wurde die zugrunde liegende Anatomie anhand von Bildatlanten erarbeitet (Zilles and Rehkämper, 1998), (Naidich et al., 2009).

Für die folgende Auswahl der Ausgangsvoxel ist eine einheitliche Schnittführung in den einzelnen MRT Ebenen notwendig. Hierzu wurde die koronare Schnittführung als Grundlage für das spätere Vorgehen definiert.

2.2.2 Maskenerstellung und Maskenabgleich

Die während des Experimentes erhobenen MRT Datensätze wurden mit der MRIcro medical image Software visualisiert. Die Abgrenzung des Gyrus frontalis medialis erfolgte durch das Erstellen von Masken, welche den Umriss des Gyrus frontalis medialis in allen koronaren Schichten markieren. Die Masken basieren auf dem Abgleich mit den genannten Bild-Atlanten und zweier Software Atlanten. Es wurden hierzu der AAL-Atlas und der Marina BION 0.3.1.0 Atlas verwendet. Beide Atlanten sind zur MRIcro medical image Software kompatibel. Die entstandenen Masken wurden als MRIroi Dateien erstellt. Somit ist der Gyrus frontalis medialis bei den Probanden P1, P2, P4, P5, P6, P7 und P8 festgelegt und kann als Basis für die Bestimmung der Ausgangsvoxel über den Gyrus frontalis medialis dienen.

Die Markierung des orbitalen Anteils des Gyrus frontalis medialis erfolgt ausschließlich durch den Marina Atlas.

2.2.3 Festlegung der Ausgangsvoxel

Als Grundlage für die anatomische Orientierung dienten die Masken der 7 Probanden. Die Markierung entlang der Ebenen erfolgte in der koronaren Schnittführung. Ausgangsvoxel wurden durch die ROI Funktion (*Regions of interest*) der MRIcro medical image software markiert. Als Basis dienten die MRIimg Dateien der 7 Probanden. Es wurden nur Voxel innerhalb der grauen Substanz des Gyrus frontalis medialis markiert. Hierzu diente die *"Pen for drawing object outline"* Funktion der MRIcro medical image Software. Innerhalb einer koronaren Schichtung wurde jedes vierte Voxel markiert. Die Schichtdicke betrug 4 mm. Ein Voxel besitzt eine Größe von 1 x 1 x 1 mm. Die rechte und die linke Hemisphäre wurden getrennt voneinander bearbeitet. Die entstandenen Bilddateien wurden als MRIroi Dateien gespeichert. Ziel war es eine homogene und vollständige Verteilung der markierten Ausgangsvoxel auf einer koronaren Schicht zu erzielen.

2.2.4 Ausgangsvoxel-Tabellarisierung und Zuordnung von NT Werten

Die ausgewählten Ausgangsvoxel wurden nun der Reihenfolge nach tabellarisiert. Dabei wird die Position eines Ausgangsvoxel durch seine MNI/ Talairach Koordinate definiert. Diese liegt auf der X, Y und Z Achse.

Die Tabellen enthalten zusätzlich zu der Lage noch den zugehörigen Trafficwerte für die auditive und die visuelle Kondition (Beu et al., 2009). Die entsprechenden Trafficwerte stammen aus den timeseries-traffic Dateien, die über die MRIcro medical image Software dargestellt werden können. Diese wurden über die "*joke*" Funktion mit den MRIroi Dateien des jeweiligen Probanden verknüpft.

Die dritte Information beinhaltet die Information, ob der Ausgangsvoxel sich auf der Pars orbitalis des Gyrus medialis frontalis befindet. Dazu wurde die Spalte "Bemerkung" angelegt. Hieraus kann abgelesen werden, ob ein Voxel in dem Gyrus frontalis medialis liegt oder in seinem orbitalen Part (Pars orbitalis). Die Tabellen wurden mit dem Microsoft Excel Programm erstellt.

2.3 Funktionelle Konnektivität

2.3.1 Berechnung der funktionellen Konnektivität zu den Seedvoxel

Die Berechnung der funktionellen Konnektivität erfolgte mit eigens geschriebenen Programmroutinen in der Programmiersprache C++. Als Compiler wurde die frei erhältliche Software Devil-C++ (http://www.bloodshed.net/c/index.html) verwendet. Ein moderner PC mit 4 Gigabyte RAM und einer Taktfrequenz von zwei Gigahertz diente als Hardware. Dieses Programm führte die Korrelationsberechnung des BOLD-Wertes eines Voxels mit den BOLD-Werten der anderen Voxel der fMRT-Dateien des gleichen Probanden durch. Eine hohe Korrelation spricht für eine hohe funktionelle Konnektivität und deutet auf ein ähnliches Aktivierungsmuster beider Hirnregionen hin. Die Ergebnisse dieser Korrelationsberechnung wurden als img-Datei gespeichert.

Um die Koordinatentabellen mit der Software Devil-C++ bearbeiten zu können, mussten diese erst in ein anderes Format gebracht werden. Daher wurden die Seedvoxel-Koordinaten beider Hemisphäre zunächst in ein Microsoft Word-Dokument als unformatierten Text eingefügt. Über die Funktion "Suchen & Ersetzen" wurden Tabstopps im Word-Dokument zwischen den Koordinaten durch ", " ersetzt. Am Ende einer Zeile wurde über die gleiche Funktion die Absatzmarke durch ein ", " mit direkt anschließenden manuellem Zeilenumbruch ersetzt. Die so formatierten Seedvoxel-Tabellen wurden in die vorgeschriebene C++-Datei hinter dem Punkt: *int koordinates[] = {* eingefügt.

In ähnlicher Weise wurden die Seedvoxel-Koordinaten mit ihrer kurzen Datei-Bezeichnung bearbeitet und in dasselbe C++-Dokument eingefügt. Auch hier wurden die Koordinaten der Excel-Tabellen kopiert, nun aber auch mit ihrer kurzen Datei-Bezeichnung (GFS, GOS) und als unformatierten Text in ein Word-Dokument eingefügt. Nun wurden jedoch die Tabstopps über die "Suchen & Ersetzen" -Funktion durch Unterstriche "_" ersetzt. Die Absatzmarke "^p" wird durch die Folge von Anführungszeichen oben, Komma, ^l (manueller Zeilenumbruch), Anführungszeichen oben, Unterstrich ersetzt. Nun konnte die so formatierte Tabelle in das C++-Dokument hinter dem Punk eingefügt werden.

Nun wurde die Datei mit Hilfe des Dev-C++ 4.9.9.2 Software kompiliert. Die

Korrelationen des BOLD-Wertes eines Ausgangsvoxels wurden mit den BOLD-Werten der anderen Voxel der fMRT-Dateien des gleichen Probanden berechnet und in einer Bilddatei ausgegeben.

2.3.2 Identifikation der lokalen Maxima für jeden Seedvoxel

Zur Auffindung lokaler Maxima für jeden Seedvoxel in den berechneten Maxima diente das "neu_nachbar_max_aal_brod.exe"-Progamm. Dieses Programm durchsuchte die gebildeten Korrelationen nach Maxima. Gefundene Maxima wurden den entsprechenden Zielregionen, AAL-Regionen und Brodmann-Arealen zugeordnet.

Die Eingabe der Seedvoxel eines Probanden in das "neu nachbar max aal brod.exe"-Progamm erfolgte in Abschnitten mit je 300 Voxeln, um das Auftreten von Programmfehlern auf Grund einer zu großen Datenmenge zu vermeiden. Zunächst wurden über die Windows Eingabeaufforderung die von der C++-Software erstellen .img-Dateien in eine Textdatei mit allen Koordinaten und Korrelationswerten des Probanden umgewandelt, da nur in diesem Format eine Weiterverarbeitung mit dem Maximafindungsprogramm "neu_nachbar_max_aal_brod.exe" möglich war. Daher wurde zuerst in der Windows Eingabeaufforderung mit Hilfe des Befehls "cd" (change directory) der Ordner gesucht, in dem die erstellten Bilddateien eines Probanden für einen Versuchsablauf abgespeichert wurden. Mit Hilfe des Befehls .,>dir B*.img>p1 aud in.txt" wurden die Bilddateien zu einer Textdatei mit dem Namen "p1 aud in.txt" umgewandelt. Der Name der Ausgabedatei wurde entsprechend des Probanden und des Versuchsablaufes umbenannt. Dann wurde das Programm "neu nachbar max aal brod.exe" gestartet. In einem Schritt wurden 300 Voxel aus einer Quelldatei auf Maxima durchsucht. Danach wurden die entsprechenden 300 Voxel aus der Quelldatei z.B. "p1_aud_in.txt" manuell gelöscht, in dem diese mit dem Microsoft Editor aufgerufen wurde, die entsprechenden Voxel markiert und gelöscht wurden. Die Datei "p1 aud in.txt" wurde unter dem gleichen Namen abgespeichert und die nächsten 300 Voxel konnten auf Maxima durchsucht werden. Die gefundenen Maxima wurden für jeden Probanden nach Hemisphären und Versuchabläufen getrennt in Ordnern gespeichert.

Nun konnten sowohl die Maxima- als auch die Koordinaten-Dateien eingelesen werden. Hierzu wurden zunächst die Koordinatentabellen der zu untersuchenden Hemisphäre geladen, indem deren Speicherort ausgewählt wurde, die Datei der Koordinatentabellen, z.

B. "Proband 1 links ohne GR.txt", markiert und die Funktion "Liste laden" angewählt wurde. Die entsprechenden Maxima der Hemisphäre wurden durch Auswahl des Versuchsablaufs (VIS oder AUD) und Wählen der Funktion "Daten einlesen" eingelesen. In dem Menüfenster "Optionsfenster 2" wurden bestimmte anatomische Zielregion aus der Liste ausgewählt und über die Pfeiltasten in eine einheitliche Reihenfolge gebracht. Die Reihenfolge richtete sich nach der anatomischen Lokalisation. Die Regionen lauteten:

- Olfactory ٠
- Frontal Sup •
- Frontal_Sup_Medial •
- Frontal Sup Orb •
- Frontal Mid •
- Frontal Mid Orb
- Frontal Inf Orb •
- Frontal Inf Tri
- Frontal Inf Oper
- Rolandic Oper
- Rectus
- Supp Motor Area
- Precentral •
- Postcentral
- Parietal Sup
- Parietal Inf •
- SupraMarginal
- Angular
- Paracentral Lobule
- Precuneus
- Insula
- Heschl
- Temporal Sup
- Temporal Pole Sup •
- Temporal Mid
- Temporal Pole Mid
- Occipital Sup
- Occipital Mid
- Occipital Inf •
- Cuneus
- Calcarine
- Lingual
- Fusiform
- Cingulum Ant
- Cingulum Mid
- Cingulum Post •
- ParaHippocampal
- Hippocampus

- Olfaktorischer Kortex
- Gyrus frontalis superior
- Gyrus frontalis superior, Pars media
- Gyrus frontalis superior, Pars orbitalis
- Gyrus frontalis medius
- Gyrus frontalis medius, Pars orbitalis
- Gyrus frontalis inferior, Pars orbitalis
- Gyrus frontalis inferior, Pars triangularis
- Gyrus frontalis inferior, Pars opercularis
- rolandisches Operculum
- Gyrus rectus
 - supplementärmotorisches Areal
- Gyrus precentralis
- Gyrus postcentralis
- Gyrus parietalis superior
- Gyrus parietalis inferior
- Gyrus supramarginalis
- Gyrus angularis
- Lobulus paracentralis
- Precuneus
- Insula
- Heschlregion
- Gyrus temporalis superior
- Gyrus temporalis superior, Polus temporalis
- Gyrus temporalis medius
- Gyrus temporalis medius, Polus temporalis
- Gyrus occipitalis superior
- Gyrus occipitalis medius
- Gyrus occipitalis inferior Cuneus
- - calcarinische Region
 - Gyrus lingualis
 - Gyrus fusiformis
 - Gyrus cinguli, Pars anterior
 - Gyrus cinguli, Pars media
 - Gyrus cinguli, Pars posterior
 - Gyrus parahippocampalis Hippocampus

Die Reihenfolge beginnt mit frontalen Anteilen und verläuft nach occipital. Sie endet mit den hippocampalen Strukturen. Des Weiteren wurde die Farbgebung der Korrelationswerte im Diagramm angepasst, so dass sich die Farben und die entsprechenden Korrelationswerte in allen Diagrammen gleichen.

2.3.3 Auswahl der lokalen Maxima

Ein lokales Maximum war definiert als ein Voxel mit einem Korrelationswert > 0,3, der von 9 Voxeln umgeben ist, die ebenfalls eine Korrelation > 0,3 haben mussten. Der Wert 0,3 wurde in dem Programm "neu_nachbar_max_aal_brod.exe" als Schwellenwert eingegeben und als Clustergröße wurde 10 angegeben.

2.3.4 Räumliche Toleranz

Maxima wurden mit einer Toleranz von bis zu 6 mm, entspricht 3 Voxeln, Abstand zu einer AAL- oder Brodmann-Region dieser zugeordnet. Lagen in einem Umkreis von 6 mm zwei unterschiedliche Regionen in der Nähe eines Maximums, wurde das Maximum der Region, der es am nächsten lag, zugeordnet.

2.3.5 Grafische Darstellung

Die grafische Darstellung erfolgte mit Hilfe des Seedvoxel-Visualisierungsprogrammes (Project1). Anhand des Seed-Voxel-Visualisierungsprogrammes wurden für jeden markierten Seedvoxel die Korrelationswerte für eine Auswahl von anatomischen Zielregionen in einer Grafik angezeigt. Exemplarisch zeigt die Abbildung 2 die grafische Zuordnung von Korrelationsstärken zwischen Ausgangsvoxel und Zielregion.

Vorbereitend mussten die Koordinaten einer Hemisphäre aus dem Excel-Format in das txt-Format umgewandelt werden. Die Koordinatenliste wurde in dem gleichen Ordner des Probanden gespeichert wie die Maxima-Textdateien für die entsprechende Hemisphäre.

Die Bearbeitung der Maxima-Dateien erfolgte nach Hemisphären getrennt. Im "Project1" wurde unter dem Punkt "Sammlung" mittels der Option "Proband, Bez. hinzufügen" für jeden Probanden ein Ordner erstellt. Jeder Ordner wurde nach dem Probanden und der Hemisphäre benannt, bspw. "Proband 1 links". Automatisch wurden für jeden Probanden

ein Unterordner "AUD" zur Darstellung des auditiven Versuchsablaufs und einen Unterordner "VIS" zur Darstellung des visuellen Versuchsablaufs erstellt.



Abb.2: Ausschnitt eines Kreuzkorrelogramms des Probanden 5 für die auditive Kondition mit der grafischen Darstellung der Korrelationsstärken der einzelnen Ausgangsvoxel des rechten Gyrus frontalis medialis zu den betrachteten Zielregionen. Auf der x Achse sind die in koronaren Schichten (Schichtdicke 4 mm) erfassten Ausgangsvoxel, mit einer Größe von 1 x 1 x 1 mm, entlang der grauen Substanz des rechten Gyrus frontalis medialis aufgetragen. Die Ausgangsvoxel sind durch ihre Koordinate auf dem MNI/ Talairach System gekennzeichnet. Der y Achse sind die betrachteten Zielregionen von frontal nach occipital zu entnehmen. Farblich hinterlegt ist der maximale Korrelationswert zwischen Ausgangsvoxel und Zielregion auf einer Scala von 0 bis 1. Der Korrelationswert dient als Ausdruck der funktionellen Konnektivität zwischen Ausgangsvoxel und Zielregion.

2.4 Auswertung

2.4.1 Tabellarische Darstellung der Kreuzkorrelogramme

Nach der Fertigstellung des jeweiligen Kreuzkorrelogramms wurden die Korrelationswerte in eine Exceltabelle eingefügt. Dies wurde durch die Funktion "Einfügen" (Strg + C) in Excel erreicht. Diese Tabelle dient zur statistischen Auswertung der einzelnen Korrelationsstärken.

2.4.2 Generierung von "Wenn" Funktionen zur Korrelationsmustereinteilung

Als nächster Schritt wurden die einzelnen Korrelationswerte kategorisiert. Dabei stellen alle Werte $\geq 0,6$ starke Korrelationsstärken dar. Werte zwischen 0,31 und 0,59 gelten als mittlere Korrelationsstärken. Werte $\leq 0,3$ sind als schwache Korrelationsstärken definiert. Um diese spezifischen Werte leichter zu erkennen und zusammenfassen zu können, wurden sie wie folgt weiterverarbeitet.

Die in Punkt 2.4.1 Tabellarische Darstellung der Kreuzkorrelogramme erstellten Exceldateien wurden mit Hilfe der Funktion (=WENN(A4:E4 \geq 0,6;1;0) ausgewertet. Alle per Definition starken Korrelationsstärken wurden durch eine 1 und alle Werte unter 0,6 durch eine 0 ersetzt. Werte die durch eine 1 ersetzt wurden, werden im folgendem als Einserwerte beschrieben (Tab. 1). In einem weiteren Schritt wurde die Summe aus allen Korrelationsstärken einer Zielregion gebildet (=SUMME(A4:E4)). Die so erstellten Summen aller Zielregionen wurden mit der entsprechenden Zielregion in eine weitere Excel-Tabelle kopiert.

Im darauf folgendem Schritt wurden die Zielregionen nach der Rangfolge ihrer Summen aus der "Wenn- Funktion" für $\geq 0,6$ sortiert. Hierzu werden die entsprechenden Zellen markiert und mit der Funktion "von A bis Z" geordnet. Aufgrund der besseren Übersicht werden die betrachteten Zielregionen anatomisch geordnet dargestellt. Zielregionen mit einer engen anatomischen Lagebeziehung zu dem Gyrus frontalis medialis werden gesondert dargestellt. Die restlichen Zielregionen kommen in einer ergänzenden Grafik zur Darstellung. Somit wird die in den Kreuzkorrelogrammen vorgegebene anatomische Reihenfolge beibehalten. Die Diagramme zu den frontalen Zielregionen beinhalten alle Zielregionen mit einer engen anatomischen Zugehörigkeit zu dem Gyrus frontalis medialis. Die Diagramme zu den restlichen Zielregionen beinhalten die 25 bis 30 Zielregionen mit der höchsten Anzahl an starken Korrelationswerten. **Tab.1:** Ausschnitt der Kategorisierungtabelle zur statistischen Auswertung hoher Korrelationsstärken zwischen Ausgangsvoxel und Zielregion. Der Wert 0 steht für einen maximalen Korrelationwert von < 0,6. Eine 1 kodiert einen maximalen Korrelationswert zwischen Ausgangsvoxel und Zielregion von $\ge 0,6$. Die oberste Zeile beinhaltet die Ausgangsvoxel in koronarer Schichtführung (Schichtdicke 4 mm) mit einer Größe von 1 x 1 x 1 mm entlang der grauen Substanz des Gyrus frontalis medialis. Die erste Spalte beinhaltet einen exemplarischen Ausschnitt der betrachteten Zielregionen.

0	A		В	С	D	E	F	G	H	1 I	J	K	L	M	N	0	P	
1				[-31,65,-11] ([-23,65,-11] ([-29,65,-14]	([-26,65,-13]	[[-24,65,-16]	(i [-20,65,-14]	(i [-18,65,-18] ((† [-13,65,-18] ([-12,65,-22] ([-9,65,-23] (#	[-33,61,10] (#	# [-31,61,11] (#	# [-29,61,14] (#	[-31,61,17] (# [·
2	Olfactory	1		0	0	C	0 0	() (0 0	0	0	0	0	0	0	0)
3	Olfactory	r		0	0	0	0 0	0) () 0	0	0	0	0	0	0)
4	Frontal_Sup	1		1	0	0) 1	() () 0	0	0	0	1	1	1	1	1
5	Frontal_Sup	r		1	0	0	0 0	() () ()	0	0	0	1	1	1	0	J
6	Frontal_Sup_	11		1	0	0	0 0	() () 0	0	0	0	1	1	1	1	1
7	Frontal_Sup_	lr 👘		0	0	0	0 0	() () 0	0	0	0	1	1	1	0)
8	Frontal_Sup_	<u>(1</u>		1	0	1	1	1	() 0	1	0	0	1	1	0	0)
9	Frontal_Sup_	(r		0	0	0	0 0	1	() 0	0	0	0	0	0	0	()
0	Frontal_Mid	1		1	0	0) 1	() () 0	0	0	0	1	1	1	1	1
11	Frontal_Mid	r		1	0	0) 1	() (0 0	0	0	0	1	1	1	1	1
2	Frontal_Mid_0	(1		1	1	1	1	() 1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
13	Frontal_Mid_	(r		1	1	1	1 1	() 1	0	0	0	0	1	1	1	(1
4	Frontal_Inf_O			0	0	0	0 0	() (0 0	0	0	0	1	1	0	1	1
15	Frontal_Inf_O	r		0	0	0	0 0	() (0 0	0	0	0	0	0	1	1	1
16	Frontal Inf T	r I		1	0	0	0 0	0) () 0	0	0	0	1	1	1	(3
.7	Frontal Inf T	r r		0	0	0	0 0	() () 0	0	0	0	1	1	0	(J
8	Frontal Inf O	1		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(J
9	Frontal Inf O	r		0	0	0	0 0	() (0 0	0	0	0	0	0	0	(3
20	Rolandic Ope	61		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(J
21	Rolandic Ope	er		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(3
2!Z	Rectus	1		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	1	0	1	0	(J
23	Rectus	r		0	0	0	0 0	0) 1	0	0	1	0	0	0	0	(3
24	Supp Motor	1		1	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	1	1	1	1	1
25	Supp Motor	r		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(5
26	Precentral	1		1	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(3
27	Precentral	r		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(٥ ا
28	Postcentral	1		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(3
29	Postcentral	r		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(J
30	Parietal Sup	1		1	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	1	1	1	(J
11	Parietal_Sup	r		0	0	0	0 0	() (0 0	0	0	0	0	0	0	(3
32	Parietal Inf	1		1	0	0	0 0	0) () 0	0	0	0	1	1	1	1	1
33	Parietal Inf	r		0	0	0	0 0	0) () 0	0	0	0	0	0	0	(3
34	SupraMargina	1		0	0	0	0 0	() (0 0	0	0	0	0	0	1	(J
15	SupraMargina	a r		0	0	0	0 0	0) () 0	0	0	0	0	0	0	(3
16	Angular	1		1	0	0	0 0	() () 0	0	0	0	1	1	1	(3
37	Angular	r		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	1	(J
18	Paracentral L	1		1	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	1	1	1	1	1
19	Paracentral L	r		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(J
10	Precuneus	1		1	0	0) 1	() (0 0	0	0	0	1	1	1	1	1
11	Precuneus	r		1	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	1	(3
12	Insula	1		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	(J
13	Insula	r		0	0	0	0 0	0) () 0	0	0	0	0	0	0		3
4	Heschl	1		0	0	0	0 0	0) (0 0	0	0	0	0	0	0	0	J

2.4.3 Erstellen von Kreisdiagrammen zur Individualanalyse

Daraufhin wurden die 20 stärksten Zielregionen mit ihren entsprechenden Summen markiert. Mithilfe der Funktion "Einfügen + Diagramme" konnte dieser Schritt realisiert werden. Die Zielregionen mit einer engen anatomischen Beziehung zu dem Gyrus frontalis medialis wurden einzeln dargestellt. Es schließt sich daraufhin die Auswertung der Zielregionen außerhalb des Frontallappens an. Es wurden für jeden Probanden vier Diagramme mit den stärksten Zielregionen innerhalb und außerhalb des Lobus frontalis erstellt. Die Diagramme zeigen die absolute Anzahl der Ausgangsvoxel, welche eine Konnektivität von $\geq 0,6$ aufweisen. In der Legende ist zusätzlich die Gesamtzahl der auf den jeweiligen Gyrus frontalis medialis verteilten Ausgangsvoxel angegeben (Abb. 3). Zu den stärksten Zielregionen wird im Text der relative Anteil der Ausgangsvoxel mit einer hohen funktionellen Konnektivität zu der Gesamtzahl an Ausgangsvoxel angegeben.



Abb. 3: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 23 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

2.4.4 Auswertung zur Gruppenanalyse

Die Gruppenanalyse basiert auf der Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Ausgangsvoxelanzahl mit einer hohen Konnektivität zu einer spezifischen Zielregion bei allen sieben Probanden. Außerdem wird der Rang innerhalb der Diagramme im Überblick für alle sieben Probanden angegeben. Ziel ist die Identifizierung von Zielregionen, welche probandenübergreifend eine spezifisch hohe Konnektivität aufweisen.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Individualanalyse vorgestellt. Zunächst werden die Ergebnisse der auditiven Kondition des rechten GFM und des linken GFM der sieben Probanden präsentiert. Es folgen mit Punkt 6.2. die Ergebnisse des visuellen Versuchsaufbaus. Die Individualanalyse stellt von insgesamt 76 betrachteten Zielregionen die Zielregionen heraus, welche die probandenspezifisch höchste funktionelle Konnektivität zu dem GFM aufweisen. Die Zielregionen sind in Form von Kreisdiagrammen dargestellt. Dabei werden die Zielregionen innerhalb des Frontallappens und die Zielregionen außerhalb des Frontallappens separat aufgeführt. Als Grundlage dienen die, wie in Punkt 2.4.2. ausgeführten Summen der Korrelationswerte \geq 0,6. Die Korrelationswerte mit einem Korrelationswerte \geq 0,6 gelten als Ausgangsvoxel mit einer hohen Korrelation zu der jeweiligen Zielregion. Die probandenspezifisch betrachtete Gesamtanzahl an Ausgangsvoxel mit einer hohen funktionellen Konnektivität. Dieser wird im Text für die jeweils stärksten Zielregionen angegeben.

3.1 Individualanalyse zur auditiven Kondition

3.1.1 Funktionelle Konnektivität rechter Gyrus frontalis medialis

3.1.1.1 Proband 1

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

235 Ausgangsvoxel des rechten GFM weisen starke Korrelationen zum linken GFM auf (Abb. 4). Dies entspricht bei einer Gesamtzahl von 411 Voxeln 57,2 %. Es folgt die Region Frontal_Sup rechts mit einer Anzahl von 215 Ausgangsvoxel mit starken Korrelationswerten. Es folgen acht Regionen, mit einer Anzahl zwischen 101 - 180 Ausgangsvoxeln mit einer starken Korrelation. Die Gesamtanzahl der beobachteten hohen Korrelationen übersteigt die Anzahl an definierten Ausgangsvoxel. Somit korreliert ein Ausgangsvoxel zu mehreren Zielregionen innerhalb einer Kondition. Diese Beobachtung zeigt sich bei allen Probanden und allen Konditionen.



Abb. 4: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 411 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben. Zu 16 Zielregionen existiert eine Gesamtanzahl von 2204 hohen Korrelationen.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Von den 411 Ausgangsvoxeln zeigen 166 hohe Korrelationswerte für die Region Precuneus links (Abb. 5). Somit zeigen 40,4 % der Ausgangsvoxel des GFM rechts eine hohe Korrelation zu der Region Precuneus links. Eine ähnlich hohe Anzahl ergibt sich für die rechte Precuneus Region. Hier weisen 163 Ausgangsvoxel eine hohe funktionelle Konnektivität auf. Dies entspricht 39,7 % aller betrachteten Voxel. Die Zielregion Parietal_Inf links besitzt ebenfalls eine hohe funktionelle Konnektivität. 38,4 % der Ausgangsvoxel wiesen hohe Korrelationswerte zu dieser Zielregion auf.



Abb. 5: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 22 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 411 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.1.2 Proband 2

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

113 Ausgangsvoxel weisen eine hohe Korrelation zum Gyrus frontalis superior rechts auf (Abb. 6). Bei einer Gesamtzahl von 404 Ausgangsvoxeln, zeigen 28% der Ausgangsvoxel hohe Korrelation zum GFM superior rechts. 73 Ausgangsvoxel besitzten eine hohe funktionelle Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis links. Dies entspricht einem relativen Anteil von 18,1 % aller Ausgangsvoxel.



Abb. 6: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 404 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Die Region Parietal_Sup rechts zeigt mit 58 Ausgangsvoxeln die höchste Anzahl starker Korrelationen (Abb. 7). Bei einer Gesamtzahl von 404 Ausgangsvoxeln entfallen 14,4% der hohen Korrelationen auf diese Region. Ähnlich starke Verteilungen zeigen die Regionen Supp_Motor_Area links, Precuneus rechts und Precuneus links.



Abb. 7: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 24 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 404 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.1.3 Proband 4

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Der Hauptteil entfällt auf die Ausgangsregion. Hier zeigt sich eine Anzahl von 251 Ausgangsvoxeln mit starken Korrelationen. 95 Ausgangsvoxel mit hohen Korrelationswerten von insgesamt 390 Ausgangsvoxeln entfallen auf die Region Frontal_Mid links (Abb. 8). Damit zeigen 24,4% der Ausgangsvoxel eine hohe Korrelation zum Gyrus frontalis medialis links. Folgende Regionen zeigen ebenfalls eine hohe funktionelle Konnektivität zum GFM rechts. Frontal_Sup rechts 20,3%, Frontal_Mid_Orb rechts mit 18,7% und Frontal Sup Medial links mit 17,9%.



Abb. 8: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

78 von insgesamt 390 Ausgangsvoxel zeigen für die Region Parietal_Sup rechts hohe Korrelationsstärken zum rechten GFM. Dies entspricht einem relativen Anteil von 20 %. Die nächst höhere Anzahl funktioneller Konnektivitäten besitzen die Zielregionen Temporal_Pole_Sup rechts, Postcentral rechts und Supp_Motor_Area links.



Abb. 9: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 23 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.1.4 Proband 5

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

24,8% der Ausgangsvoxel zeigen für die Region Frontal_Sup rechts hohe Korrelationsstärken (Abb. 10). 24% entfallen auf die Region Frontal_Mid_Orb r. Die Region Frontal_Mid links liegt mit 17% an achter Stelle. Dies entspricht einer Anzahl von 64 Ausgangsvoxel mit einer hohen funktionellen Konnektivität.


Abb. 10: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 375 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Mit 20,3% zeigen die Regionen Precentral links und Precuneus links die höchsten Anteile an Ausgangsvoxeln mit einer hohen Korrelation (Abb. 11). Dies entspricht einem absoluten Anteil von jeweils 76 Ausgangsvoxel mit hohen funktionellen Konnektivitäten. Es folgt mit einem Anteil von 18,4% die Region Supp_Motor_Area links und mit 18,1 % an Ausgangsvoxeln mit hohen funktionellen Konnektivitäten die Zielregion Parietal_Sup rechts.



Abb. 11: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 25 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 375 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.1.5 Proband 6

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Die Ausgangsregion (Gyrus frontalis medialis rechts) wird gefolgt vom Gyrus frontalis superior der rechten Seite. Hier besitzen 67,6% der Ausgangsvoxel eine hohe funktionelle Konnektivität zu der Zielregion (Abb. 12). Ebenfalls eine Anzahl von über 200 Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten zeigen die Regionen Frontal_Sup_Medial links und Frontal_Mid links. Es lässt sich ein relativer Anteil von 62,1 % und 61,8 % an Ausgangsvoxel mit hohen Korrelationswerten ermitteln.



Abb.12: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 330 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Mit 170 von insgesamt 330 Ausgangsvoxeln besitzt die Region Supp_Motor_Area links die höchste Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis rechts (Abb. 13). Dies entspricht einem prozentuellen Anteil von 51,5%. Eine Anzahl von 140 bis 163 Ausgangsvoxel mit einer hohen Korrelationsstärke zeigen folgende Regionen auf: Precuneus links, Precuneus rechts, Temporal_Inf rechts und Temporal_Pole_Sup links.



Abb. 13: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 22 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 330 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.1.6 Proband 7

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

60% der Ausgangsvoxel besitzen hohe Korrelationsstärken zur Region Frontal_Sup rechts. 51,7% der Ausgangsvoxel zeigen starke Korrelationen zur Zielregion Frontal_Mid links (Abb. 14). Die Region Frontal_Sup_Medial links zeigt eine Konnektivität von 44,6% an starken Ausgangsvoxeln.



Abb. 14: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 327 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

146 der 327 Ausgangsvoxel weisen eine hohe Korrelationsstärke für die Region Precuneus rechts auf (Abb. 15). Dies entspricht einem Anteil von 44,6%. Es schließen sich die Zielregionen Precuneus links, Parietal_Sup rechts und Angular rechts an. Diese Zielregionen besitzen einen relativen Anteil an Ausgangsvoxel mit einer hohen funktionellen Konnektivität von 41 %, 40,1 % und 40,4 %.



Abb. 15: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 23 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 327 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.1.7 Proband 8

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Mit 222 von 390 Ausgangsvoxeln zeigt die Region Frontal_Mid links einen Anteil von 57 % an Ausgangsvoxeln mit einer hohen Korrelationsstärke (Abb. 16). Es folgt die Region Frontal_Sup rechts mit einem Anteil von 55,4%. Auf die Regionen Frontal_Sup links und Frontal_Sup_Medial links entfallen 50,3% und 47,4% an Ausgangsvoxeln mit einer hohen funktionellen Konnektivität.



Abb. 16: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Die Verteilung der Zielregionen mit der höchsten Anzahl an hohen Korrelationswerten zeigt die höchste Anzahl für die Regionen Supp_Motor_Area links und Precuneus links mit einem Anteil an Ausgangsvoxeln mit hoher Konnektivität von 43,1% und 42,8% (Abb. 17).



Abb. 17: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 20 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.2 Ausgangsvoxel linker Gyrus frontalis medialis

3.1.2.1 Proband 1

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 390 Ausgangsvoxeln des linken Gyrus frontalis medialis, weisen 240 eine hohe Konnektivität zur rechten Frontal_Mid Zielregion auf (Abb. 18). Dies entspricht einem relativen Anteil von 69,2 % der Ausgangsvoxel. 207 Ausgangsvoxel zeigen starke Konnektivität zur Region Frontal_Sup_Medial links. Dies entspricht 53,1% der Ausgangsvoxel. 206 stark konnektivierende Ausgangsvoxel zeigt die Zielregion Frontal_Sup links. Damit zeigen 52,8% der Ausgangsvoxel eine starke Konnektivität zu

dieser Zielregion.



Abb. 18: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Für die Zielregionen außerhalb des Lobus frontalis zeigen die Zielregionen Precuneus links und Parietal_Inf links mit einer Ausgangsvoxelanzahl mit hohen Korrelationswerten von 227 und 226 (Abb. 19). Die Gesamtzahl an Ausgangsvoxel liegt bei 390. Diese Ausgangsvoxelanzahlen entsprechen relativen Werten von 58,2% und 57,9%. Ebenfalls eine hohe Konnektivität weisen die Zielregionen Temporal_Pole_Sup links (184) und Supp_Motor_Area links (177) auf. Damit konnektieren 47,2% der Ausgangsvoxel in einem hohen Maße zur Zielregion Temporal_Pole_Sup links. 45,4% der Ausgangsvoxel konnektieren in einem hohen Maße zur Zielregion Supp_Motor_Area links.



Abb. 19: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 21 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.2.2 Proband 2

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Die Gesamtzahl an Ausgangsvoxel, die über den linken GFM verteilt wurden liegt bei 460. Für Zielregionen innerhalb des Lobus frontalis zeigt die Region Frontal_Inf_Tri links eine Anzahl von 104 Voxel mit hoher Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis (Abb. 20). Dies entspricht einem Anteil von 22,6% der Ausgangsvoxel. Es folgen Frontal_Sup links mit einer Voxelanzahl von 96 (23,6%) und die Zielregion Frontal_Mid rechts mit 79 (17,1%) Voxel mit einer hohen Konnektivität.



Abb. 20: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 460 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Die größte Anzahl an hohen Korrelationswerten zeigt die Region Supp_Motor Area links mit 63 starken Korrelationswerten (Abb. 21). Es konnektieren 13,6% der Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivitätsstärke zu dieser Zielregion. Es folgen die Zielregionen Parietal_Inf links (56 starke Korrelationswerte, 12,2%), Paracentral_Lobule links mit 55 (12,0%) starken Korrelationswerten, Precentral links mit 53 (11,5%) starken Korrelationswerten.



Abb. 21: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 24 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 460 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.2.3 Proband 4

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Die Zielregion Frontal_Inf_Tri links weißt 146 Ausgangsvoxel mit hohen Korrelationswerten auf (Abb. 22). Dies entspricht einem relativen Anteil von 36,4%. Die Gesamtzahl an Ausgangsvoxel verteilt über den Gyrus frontalis medialis liegt bei 401. Es folgt die Zielregion Frontal_Mid rechts mit einer Anzahl von 117 Voxeln welche eine hohe Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis aufweisen. 117 Ausgangsvoxel mit einer starken Konnektivität zur Ausgangsregion entsprechen einem Anteil von 29,2% der Ausgangsvoxel.



Abb. 22: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 401 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Es wurden 401 Ausgangsvoxel über den linken Gyrus frontalis medialis verteilt. Davon weisen 122 Voxel eine hohe Konnektivität zur Zielregion Parietal Inf links auf (Abb. 23). Damit zeigen 30,4% der Ausgangsvoxel eine starke Konnektivität zur Zielregion. 95 Voxel zeigen hohe Konnektivitäten zur Zielregion Temporal_Pole_Sup links. Dies entspricht einem relativen Anteil von 23,7%. Es folgt die Zielregion Supp_Motor_Area links mit 94 (23,4%) starken Ausgangsvoxeln und die Zielregion Precentral links mit 86 (21,1%) starken Ausgangsvoxel.



Abb. 23: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 21 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 401 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.2.4 Proband 5

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Folgende Zielregionen weisen bei einer Gesamtvoxelanzahl von 454 eine Anzahl an hohen funktionellen Konnektivitäten von über 100 auf. Dabei handelt es sich um die Zielregionen Frontal_Inf_Tri links mit 128 (28,2%), Frontal_Sup rechts mit 111 (24,4%) starken Konnektivitäten, Frontal_Sup links mit 107 (23,6%) Voxel, Frontal_Mid_Orb links mit 105 (23,1%) Voxeln, Frontal_Sup_Medial links mit 104 (22,9%) starken Ausgangsvoxeln und die Zielregion Frontal_Mid rechts mit 103 (22,7%) Voxeln mit hohen Korrelationswerten (Abb. 24).



Abb. 24: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 454 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

Die Zielregion Precentral links zeigt 132 (29,1%) Voxel mit einem Korrelationswert > 0,6 (Abb. 25). Insgesamt gibt es 454 Ausgangsvoxel verteilt über den linken Gyrus frontalis medialis. Es folgen die Zielregionen Parietal_Inf links mit 121 (26,6%) Korrelationswerten \geq 0,6, die Zielregion Cingulum_Mid links mit 102 (22,5%) starken Korrelationswerten, die Zielregion Precuneus links mit 100 (22,0%) starken Korrelationswerten und die Zielregion Supp_Motor_Area links mit 96 (21,1%) Ausgangsvoxeln mit einer hohen Konnektivität.



Abb. 25: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 24 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 454 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

3.1.2.5 Proband 6

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Es wurden insgesamt 417 Ausgangsvoxel über den linken Gyrus frontalis medialis des Probanden sechs verteilt. 243 dieser 417 Ausgangsvoxel weisen eine hohe Konnektivität zur Zielregion Frontal_Sup_Medial links auf (Abb. 26). Dies entspricht einem relativen Anteil von 58,3%. 238 zur Zielregion Frontal_Mid rechts, welches einem relativen Anteil von 57,1% entspricht. Die Zielregion Frontal_Sup links zeigt 236 (56,6%) starke Verbindungen. Die Region Frontal_Sup_Medial rechts zeigt 231 (55,3%) starke Verbindungen zum Gyrus frontalis medialis. Es zeigt sich eine im Vergleich zu den Probanden 2, 4 und 5 höhere Anzahl an Ausgangsvoxel mit starken Korrelationswerten und dementsprechend ein höherer prozentueller Anteil an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten.



Abb. 26: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 417 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Für die Zielregionen außerhalb des Lobus frontalis zeigt sich bei einer Gesamtanzahl von 417 Ausgangsvoxel folgende Verteilung. Auf die Zielregion Supp_Motor_Area links entfallen 223 (53,5%) Ausgangsvoxel mit hoher Konnektivität (Abb. 27). Es folgt die Zielregion Postcentral links mit 209 (50,1%) starken Ausgangsvoxeln und die Zielregion Precuneus links mit einer Gesamtanzahl von 208 (49,9%) Ausgangsvoxel mit starker Konnektivität.



Abb. 27: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 26 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 417 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.2.6 Proband 7

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Auf die insgesamt 369 verteilten Ausgangsvoxel des linken Gyrus frontalis medialis des siebten Probanden. Eine hohe Konnektivität zur Zielregion Frontal_Inf_Tri links zeigen 189 der Ausgangsvoxel (Abb. 28). Dies entspricht einem relativen Anteil von (51,2%). Desweiteren entfallen 179 (48,5%) Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität auf die Zielregion Frontal_Mid rechts. 171 (46,3%) der Ausgangsvoxel zeigen hohe Konnektivitäten zur Zielregion Frontal_Sup_Medial links und die Zielregion Frontal_Sup links weißt 170 (46,1%) Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität auf.



Abb. 28: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 369 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Insgesamt wurden 369 Ausgangsvoxel über den linken Gyrus frontalis medialis verteilt. Die Zielregion Parietal_Inf links besitzt 184 Zielvoxel mit hohen Konnektivitäten zur Ausgangsregion (Abb. 29). Dies entspricht einem relativen Anteil von 49,9%. Es folgt die Zielregion Precuneus links mit 172 (46,6%) Voxeln mit hohen Korrelationsstäreken. Desweiteren sind die Zielregion Supp_motor_Area links und Precentral links zu nennen mit 160 (43,4%) und 156 (42,3%) Voxel mit jeweils starken Korrelationsstärken.



Abb. 29: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 21 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 369 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.1.2.7 Proband 8

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Für Proband 8 wurden insgesamt 293 Ausgangsvoxel über den Gyrus frontalis medialis verteilt. Davon zeigen 148 Voxel für die Zielregion Frontal_Mid rechts und 142 für die Region Frontal_Sup links hohe Korrelationswerte (Abb. 30). Dies entspricht für die Region Frontal_Mid rechts einem Anteil von 50,5% und für die Zielregion Frontal_Sup links. Es folgt die Zielregion Frontal_Sup_Medial links mit 131 Ausgangsvoxel mit hohen Korrelationsstärken.



Abb. 30: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 293 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Von den 293 über den linken Gyrus frontalis medialis verteilten Ausgangsvoxeln weist die Zielregion Supp_Motor_Area links 135 Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität zu dieser Region auf (Abb. 31). Dies entspricht einem relativen Anteil von 46,1%. Es folgt die Region Precuneus links mit 133 (45,4%) Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität zu dieser Region.



Abb. 31: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 25 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 293 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2 Individualanalyse zur visuellen Kondition

3.2.1 Ausgangsvoxel rechter Gyrus frontalis medialis

3.2.1.1 Proband 1

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Insgesamt wurden 411 Ausgangsvoxel über den rechten Gyrus frontalis medialis des ersten Probanden verteilt. Es zeigt sich für die Zielregion Frontal_Sup rechts, dass 186 Ausgangsvoxel in einem hohen Maße zur Zielregion konnektivieren (Abb. 32). Dies entspricht einem relativen Anteil von 45,3%. 156 Ausgangsvoxel korrelieren in einem



hohen Maße mit der Zielregion Frontal_Mid_Orb rechts. Dies entspricht 38% der Ausgangsvoxel.

Abb. 32: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 411 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Es zeigt sich, dass 97 der 411 Ausgangsvoxel starke Konnektivitäten zur Zielregion Temporal_Pole_Sup rechts aufweisen (Abb. 33). Damit zeigen 23,6% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zur Region Temporal_Pole_Sup rechts. Die Zielregion Temporal_Mid rechts besitzt 84 (20,4%) hohe Verbindungen zur Ausgangsregion. Desweiteren zeigen die Zielregionen Angular rechts und Temporal_Pole_Sup links starke Verbindungen zur Ausgangsregion.



Abb. 33: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 25 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 411 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.1.2 Proband 2

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Es werden 404 Ausgangsvoxel betrachtet. Von den insgesamt 404 Ausgangsvoxeln weisen 79 eine starke Konnektivität zur Zielregion Frontal_Sup rechts auf (Abb. 34). Damit zeigen 19,6% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zu dieser Zielregion. Es folgt die Zielregion Frontal_Mid_Orb rechts mit 55 Ausgangsvoxeln, die eine hohe Konnektivität zur Ausgangsregion aufweisen. Dies entspricht einem relativen Maß von 13,6%.



Abb. 34: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 404 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zur Zielregion Parietal_Sup rechts weisen 33 Ausgangsvoxel der insgesamt 404 Ausgangsvoxel hohe Konnektivitäten auf (Abb. 35). Damit zeigt sich hier ein relativer Anteil von 8,2%. Zusätzliche Zielregionen mit einer hohen funktionellen Konnektivität zu dem GFM rechts sind Precuneus rechts mit einer Anzahl an 22 (5,4%) funktionellen Konnektivitäten und Anular rechts mit 15 (3,7%) funktionellen Konnektivitäten.



Abb. 35: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 21 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 404 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.1.3 Proband 4

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Zur Zielregion Frontal_Mid links zeigen 176 (45,1%) der 390 Ausgangsvoxel hohe Korrelationswerte (Abb. 36). Es folgt die Zielregion Frontal_Sup rechts mit insgesamt 161 starken Verbindungen.



Abb. 36: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Für die Zielregionen außerhalb des Lobus frontalis medialis wird die Verteilung der Zielregionen mit hohen Konnektivitäten im folgendem erläutert. Von den insgesamt 390 Ausgangsvoxel konnektieren 127 Ausgangsvoxel mit einer starken Konnektivität zur Zielregion Parietal_Sup rechts (Abb. 37). Damit zeigen 32,6% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zur Ausgangsregion. Es folgt die Zielregion Temporal_Pole_Sup rechts mit 100 starken Verbindungen zu Ausgangsvoxel des rechten Gyrus frontalis medialis. Dies entspricht einem relativen Anteil von 25,6%.



Abb. 37: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 24 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.1.4 Proband 5

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 375 Ausgangsvoxel konnektieren 73 mit einer hohen Konnektivität zur Zielregion Frontal_Sup rechts (Abb. 38). Damit zeigen 19,5% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zur Zielregion. Es folgt die Zielregion Frontal_Mid_Orb rechts mit 65 starken Konnektionen. Dies entspricht einem relativen Anteil von 17,3%.



Abb. 38: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 375 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Von den insgesamt 375 Ausgangsvoxeln zeigen 57 Ausgangsvoxel hohe Korrelationswerte zur Zielregion Supp_Motor_Area links (Abb. 39). Dies entspricht einem prozentuellen Anteil von 15,2%. Es folgt die Zielregion Precentral links mit 52 Ausgangsvoxel, welche eine hohe Konnektivität zur Ausgangsregion aufweisen. Damit zeigen 13,9% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zur Ausgangsregion.



Abb. 39: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 26 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 375 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

3.2.1.5 Proband 6

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 331 Ausgangsvoxeln innerhalb des rechten Gyrus frontalis medialis zeigen 63 Ausgangsvoxel starke Verbindungen zur Zielregion Frontal_Mid rechts (Abb. 40). Dies entspricht einem prozentuellen Anteil von 19,0%. Es folgt die Zielregion Frontal_Sup rechts mit 51 (15,4%) starken Verbindungen. Die Region Frontal_Mid links weißt 48 (14,5%) starke Verbindungen auf.



Abb. 40: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 331 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Von den 331 Ausgangsvoxel des rechten GFM zeigen 25 (7,5%) starke Verbindungen zur Zielregion Parietal_Sup rechts (Abb. 41). Es ist zu sagen, dass die Gesamtanzahl der Ausgangsvoxel mit hohen Korrelationswerten für diesen Probanden niedriger ist als bei allen anderen Probanden bei der Betrachtung des rechten Gyrus frontalis medialis während der visuellen Kondition. Im Vergleich zur auditiven Kondition des Gyrus frontalis medialis dieses Probanden zeigt sich ein anderes Bild. Hier zeigten sich deutlich höhere Anzahlen an Korrelationswerten > = 0,6.



Abb. 41: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 23 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 331 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.1.6 Proband 7

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 327 Ausgangsvoxel konnektieren zur Zielregion Frontal_Sup rechts 112 Ausgangsvoxel mit einer hohen Korrelationstärke (Abb. 42). Damit zeigen 34,3% der Ausgangsvoxel hohe Konnektivität zu dieser Zielregion. Es folgt die Zielregion Frontal_Mid links mit 62 (19,0%) Ausgangsvoxel mit einer hohen Korrelationsstärke zu dieser Zielregion.



Abb. 42: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 327 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

69 der insgesamt 327 Ausgangsvoxel zeigen hohe Korrelationswerte zu der Zielregion Parietal_Sup rechts (Abb. 43). Dies entspricht einem prozentuellen Anteil von 21,1%. 55 (16,8%) Ausgangsvoxel konnektieren mit einer starken Konnektivität zur Zielregion Angular rechts.



Abb. 43: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 24 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 327 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.1.7 Proband 8

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

164 der 390 Ausgangsvoxel zeigen hohe Korrelationswerte zur Zielregion Frontal_Sup rechts (Abb. 44). Dies entspricht einem prozentuellen Anteil von 42,1%. 149 von insgesamt 390 Ausgangsvoxel konnektieren mit starken Verbindungen zur Zielregion Frontal_Mid links. Damit zeigen 38,2% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zu dieser Zielregion.



Abb. 44: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Von den insgesamt 390 Ausgangsvoxel zeigen 89 hohe Korrelationswerte zur Zielregion Precuneus rechts (Abb. 45). Dies entspricht 22,8% der Ausgangsvoxel. 77 (19,7%) Ausgangsvoxel konnektieren mit starken Korrelationswerten zur Zielregion Supp_Motor_Area links.



Abb. 45: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 24 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis rechts betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.2 Ausgangsvoxel linker Gyrus frontalis medialis

3.2.2.1 Proband 1

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 390 Ausgangsvoxel zeigen 158 Ausgangsvoxel starke Verbindungen zur Zielregion Frontal_Sup links (Abb. 46) Dies entspricht einem relativen Anteil von 40,5%. Es folgt mit 141 (36,2%) starken Verbindungen die Zielregion Frontal_Mid_Orb links und mit 133 (34,1%) starken Verbindungen die Zielregion Frontal_Mid rechts.


Abb. 46: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Außerhalb des Lobus frontalis zeigen, bei einer Gesamtzahl von 390 Ausgangsvoxel, 115 Ausgangsvoxel hohe Korrelationswerte zur Zielregion Parietal_Inf links (Abb. 47). Damit zeigen 29,5% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zu dieser Zielregion. 98 Ausgangsvoxel konnektieren mit der Zielregion Precentral links in besonders hohem Maße. Dies entspricht einem relativen Anteil von 25,1%.



Abb. 47: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 23 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 390 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.2.2 Proband 2

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von 460 Ausgangsvoxel verteilt über den Gyrus frontalis medialis links zeigen 65 (14,1%) Ausgangsvoxel starke Konnektionen zur Zielregion Frontal_Mid_Orb links (Abb. 48). 54 (11,7%) Ausgangsvoxel konnektieren zur Zielregion Frontal_Inf_Tri links.



Abb. 48: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 460 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Wie schon der rechte Gyrus frontalis medialis des Probanden 2 während der visuellen Kondition gezeigt hat, zeigt auch der linke Gyrus eine niedrige Gesamtanzahl an Ausgangsvoxel mit Korrelationswerten $\geq 0,6$. Hier zeigt sich, dass bei insgesamt 460 Ausgangsvoxel nur 36 (7,8%) mit starken Korrelationswerten zur Zielregion Parietal_Inf links konnektieren (Abb. 49). Es folgt die Region Precuneus links mit 28 (6,1%) Ausgangsvoxel mit einer Korrelationsstärke von $\geq 0,6$.



Abb. 49: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 21 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 460 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.2.3 Proband 4

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Bei insgesamt 401 Ausgangsvoxel zeigen 180 hohe Korrelationswerte zur Zielregion Frontal_Inf_Tri links. Dies entspricht einem prozentuellen Anteil von 44,8% (Abb. 50). Es folgen die Zielregionen Frontal_Mid rechts und Frontal_Inf_Orb links mit 173 (43,1%) und 166 (41,4%) Ausgangsvoxel mit hohen Korrelationswerten zur Ausgangsregion.



Abb. 50: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 401 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

132 Ausgangsvoxel konnektieren mit hohen Korrelationswerten zur Zielregion Parietal_Inf links. Dies entspricht einem relativen Anteil von 32,9% (Abb. 51). 131 der Ausgangsvoxel konnektieren mit hohen Korrelationswerten zur Zielregion Precentral links. Damit zeigen 32,7% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zu dieser Zielregion.



Abb. 51: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 21 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 401 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.2.4 Proband 5

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von 454 zeigen 112 Ausgangsvoxel hohe Korrelationswerte zur Zielregion Frontal_Inf_Tri links (Abb. 52). Damit zeigen 24,6% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zu dieser Zielregion. 105 der Ausgangsvoxel zeigen eine hohe Konnektivität zur Zielregion Frontal_Mid rechts. Dies entspricht einem relativen Anteil von 23,1% der Ausgangsvoxel.



Abb. 52: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 454 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Von 454 Ausgangsvoxel zeigen 143 (31,5%) hohe Korrelationswerte zur Zielregion Parietal_Inf links (Abb. 53). 128 (28,2%) der Ausgangsvoxel besitzen hohe Korrelationswerte zur Zielregion Precentral links. 103 (22,7%) Ausgangsvoxel zeigen starke Verbindungen zur Zielregion Precuneus links.



Abb. 53: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 24 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 454 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.2.5 Proband 6

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 417 Ausgangsvoxel zeigen 77 (18,5%) hohe Korrelationswerte zur Zielregion Frontal_Inf_Tri links (Abb. 54). 73 (17,5%) Ausgangsvoxel besitzen starke Korrelationen zur Zielregion Frontal_Mid rechts.



Abb. 54: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 417 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 417 Ausgangsvoxel zeigen 41 (9,8%) hohe Korrelationen zur Zielregion Precuneus links. 38 (9,1%) Ausgangsvoxel korrelieren in einem hohen Maße zur Zielregion Precentral links (Abb. 55). 36 (8,6%) Ausgangsvoxel besitzen starke Verbindungen zur Zielregion Supp Motor Area links.



Abb. 55: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 25 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 417 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.2.6 Proband 7

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von 369 Ausgangsvoxel zeigen 115 starke Korrelationswerte zur Zielregion Frontal_Inf_Tri links (Abb. 56). Damit zeigen 31,2% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zu dieser Zielregion. 83 konnektieren zur Zielregion Frontal_Sup_Medial links. Dies sind 22,5% der Ausgangsvoxel.



Abb. 56: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 369 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Von den 369 Ausgangsvoxel, verteilt über den linken Gyrus frontalis medialis zeigen 75 Ausgangsvoxel starke Verbindungen zur Zielregion Parietal_Inf links (Abb. 57). Damit zeigen 20,3% der Ausgangsvoxel eine hohe Konnektivität zur Zielregion. 68 Ausgangsvoxel korrelieren stark zur Zielregion Cingulum_Mid links.



Abb. 57: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 22 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 369 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

3.2.2.7 Proband 8

Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 293 Ausgangsvoxel zeigen 110 (37,5%) hohe Korrelationswerte zur Zielregion Frontal_Mid rechts (Abb. 58). 103 (35,2%) Ausgangsvoxel konnektieren mit starken Verbindungen zur Zielregion Frontal_Sup links.



Abb. 58: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete innerhalb des Frontallappens. Es sind die 16 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von ≥ 0.6 zu der betrachteten Zielregion innerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 293 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt rechts oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten (≥ 0.6) angegeben.

Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Von den insgesamt 293 Ausgangsvoxel korrelieren 95 (32,4%) mit hohen Korrelationsstärken zur Zielregion Parietal_Inf links (Abb. 59). 79 (27,0%) Ausgangsvoxel korrelieren zur Zielregion Precuneus links mit hohen Korrelationswerten.



Abb. 59: Gyrus frontalis medialis: Anzahl der funktionellen Konnektivitäten in Kortexgebiete außerhalb des Frontallappens. Es sind die 20 (von 76) Zielregionen mit der höchsten Anzahl an Korrelationsstärken von $\ge 0,6$ zu der betrachteten Zielregion außerhalb des Lobus frontalis aufgeführt. Es wurden 293 Ausgangsvoxel im Gyrus frontalis medialis links betrachtet. Die Zielregionen sind nach absteigender Anzahl von Korrelationen aufgeführt. Die Reihenfolge der genannten Zielregionen in der Legende beginnt links oben und endet rechts unten. Die Zielregionen sind dem entsprechend entlang des Uhrzeigesinns dem Kreisdiagramm zu entnehmen, beginnend mit 0 h. Es wird jeweils die absolute Anzahl an Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten ($\ge 0,6$) angegeben.

3.3 Gruppenanalyse zur auditiven Kondition

Ziel der Gruppenanalyse ist es probandenübergreifend Zielregionen mit einer hohen funktionellen Konnektivität herauszustellen. Die Form der Präsentation der Ergebnisse folgt der Individualanalyse. Die Ergebnisse werden zunächst für den auditiven Versuchsablauf präsentiert. Punkt 6.4. analysiert die Ergebnisse des Gruppenvergleichs der visuellen Kondition. Die Zielregionen innerhalb und außerhalb des Frontallappens werden separat vorgestellt. Die Gruppenanalyse ermittelt Zielregionen, welche bei allen Probanden einer Kondition eine hohe Anzahl an hohen funktionellen Konnektivitäten aufweisen. Aus der in der Individualanalyse erhobenen Anzahl an Ausgangsvoxeln mit einer hohen Korrelation zur jeweiligen Zielregion wird ein probandenübergreifender Mittelwert gebildet. Zusätzlich wird die Standardabweichung angegeben. Außerdem ist die Position der jeweiligen Zielregion innerhalb der Kreisdiagramme von Bedeutung.

3.3.1 Ausgangsvoxel rechter Gyrus frontalis medialis

3.3.1.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Die Zielregion Frontal_Mid rechts besitzt bei allen Probanden die größte Anzahl an starken Korrelationswerten. Dabei handelt es sich um Autokorrelationen. Diese werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Eine weitere Zielregion, welche eine hohe funktionelle Konnektivität aufweist ist die Region Frontal_Sup rechts. Sie liegt bei allen Probanden unter den stärksten drei Zielregionen innerhalb des Lobus frontalis. Dabei ergibt sich ein Mittelwert von 162,1 Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität, bei einer Standardabweichung von 64,1 Voxeln. Damit ist die Zielregion Frontal_Sup rechts die am stärksten konnektivierende Zielregion innerhalb des Lobus frontalis.

Eine wichtige Rolle spielt die Region Frontal_Mid links. Sie liegt außer bei Proband 5 unter den vier am stärksten konnektivierenden Zielregionen innerhalb des Lobus frontalis. Bei Proband 5 liegt diese Zielregion an siebter Position mit 64 Ausgangsvoxeln mit hohen Korrelationswerten. Dabei besitzt sie einen Mittelwert von 151,7 Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität. Die Standardabweichung gemessen über die Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität aller Probanden liegt bei 73 Voxel (Tab.2).

Des Weiteren zeigt die Zielregion Frontal_Mid_Orb rechts auch ein probandenübergreifend starkes Konnektivitätsmuster. Diese Region liegt bei fast allen Probanden unter den stärksten fünf Zielregionen. Eine Ausnahme bildet Proband sechs. Hier liegt die Zielregion Frontal_Mid_Orb rechts an siebter Position. Der Mittelwert liegt bei 107,7. Die Standardabweichung beträgt 39,6 Voxel.

Die Zielregion Frontal_Sup links zeigt einen Mittelwert von 108,1 Ausgangsvoxel. Damit liegt sie im Vergleich zur gegenseitigen Region Frontal_Sup rechts deutlich niedriger und weist eine schwächere Konnektivität auf.

3.3.1.2 Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Außerhalb des Lobus frontalis wurden 61 Zielregionen betrachtet. Die im Mittel höchste Anzahl an stark konnektivierenden Ausgangsvoxel besitzt die Zielregion Precuneus links. Für sie zeigt sich ein Mittelwert von 111,4 starken Ausgangsvoxeln. Die Standardabweichung beträgt 50,8. Außer bei Proband 4 (Position 15) liegt sie im Vergleich der am stärksten konnektierenden Zielregionen unter den Stärksten vier. Für Proband 1 auf Rang eins, für die Probanden 5, 6, 7 und 8 auf dem Rang zwei. Auffällig ist die Beobachtung, dass die Precuneusregion der rechten Seite eine vergleichbar starke Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis rechts aufweist. Hier ergibt sich ein Mittelwert von 111 starken Ausgangsvoxeln mit einer Standardabweichung von 57. Die Zielregion Precuneus rechts liegt bei allen Probanden unter den elf stärksten korrelierenden Zielregionen. Bei den Probanden 1, 2, 6 und 7 liegt sie unter den stärksten 4 Zielregionen außerhalb des Frontallappens.

Die Zielregion Supp_Motor_Area links liegt bei allen Probanden unter den 7 stärksten korrelierenden Zielregionen. Der Mittelwert der Ausgangsvoxel mit einer starken Konnektivität zu dieser Zielregion liegt bei 108,1 Ausgangsvoxel. Es zeigt sich eine Standardabweichung von 50,7 Ausgangsvoxel.

Bemerkenswert ist, dass die Supp_Motor_Area der rechten Seite in einem geringeren Ausmaß zum rechten Gyrus frontalis medialis konnektiert als die linke Supp_Motor_Area. Für die rechte Supp_Motor_Area zeigt sich ein Mittelwert an stark konnektierenden Ausgangsvoxel von 81. Die Standardabweichung liegt bei 42,5 Voxel.

Eine auffallend starke funktionelle Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis zeigen auch zwei Zielregionen des rechten Parietallappens. Dabei handelt es sich um die Regionen Parietal_Sup rechts und Parietal_Inf rechts. Die Region Parietal_Sup rechts liegt außer bei Proband 1 (Rang12) bei allen Probanden unter den stärksten acht Zielregionen. Sie zeigt einen Mittelwert von 104,3 starken Ausgangsvoxel. Die Standardabweichung liegt bei 34,8 Ausgangsvoxel. Die Zielregion Parietal_Inf rechts besitzt gemittelt über alle stark konnektierenden Ausgangsvoxel aller Probanden einen Mittelwert von 88,1 Voxel und eine Standardabweichung von 50.

3.3.2 Ausgangsvoxel linker Gyrus frontalis medialis

3.3.2.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Auch hier ist zu erkennen, dass bei allen Probanden die größte Anzahl an starken Verbindungen auf die eigentliche Ausgangsregion fällt. Diese Beobachtung der Autokorrelation zeigt sich auch für den linken Gyrus frontalis medialis dieser Kondition.

Eine weitere stark konnektivierende Zielregion ist die Region Frontal_Mid rechts. Sie liegt bei allen Probanden außer bei Proband 5 unter den stärksten vier Zielregionen. Bei Proband 5 liegt sie an Position 7. Ihr Mittelwert zeigt 157,7 starke Ausgangsvoxel verteilt über die 7 Probanden, bei einer Standardabweichung von 64 Ausgangsvoxel. Damit ist die Zielregion Frontal_Mid rechts die am stärksten konnektivierende Zielregion innerhalb des Lobus frontalis.

Die Zielregion Frontal_Sup links zeigt auffällig starke Verbindungen zum Gyrus frontalis medialis links. Sie liegt bei nahezu allen Probanden unter den stärksten fünf Zielregionen. Eine Ausnahme bildet Proband 4. Hier liegt die Zielregion nur an Position 7. Sie besitzt einen Mittelwert von 138,7 Ausgangsvoxel mit einer starken Konnektivität. Ihre Standardabweichung liegt bei 60,1 Voxel.

Die Zielregion Frontal_Inf_Tri links zeigt ebenfalls durchgängig starke Konnektivitäten. So liegt sie bei den Probanden 2, 4, 5 und 7 sogar an zweiter Position. Sie besitzt einen Mittelwert von 152,7 starken Ausgangsvoxel. Ihre Standardabweichung beläuft sich auf 36,4 Voxel.

Des Weiteren zeigt die Zielregion Frontal_Sup_Med links ebenfalls eine starke Konnektivität. Sie konnektiert mit einem Mittelwert von 141,9 Ausgangsvoxeln mit starker Konnektivität zum GFM links. Die Standardabweichung liegt bei 68,2 Voxel. Damit liegt der Mittelwert dieser Zielregion über dem Mittelwert der Zielregion Frontal_Sup links. Bemerkenswert ist zudem, dass die Zielregion Frontal_Sup rechts in einem ähnlichen Maß zum Gyrus frontalis medialis links konnektiert wie die gegenüberliegende Zielregion Frontal_Sup links. Der Mittelwert liegt für die Region Frontal_Sup rechts bei 128,7 und weist eine Standardabweichung von 68,5 auf.

3.3.2.2 Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Die Zielregion mit der im Mittel größten Anzahl an stark konnektierenden Ausgangsvoxel ist die Zielregion Parietal_Inf links. Der Mittelwert der stark korrelierenden Ausgangsvoxel liegt bei 140 bei einer Standardabweichung von 53,7 Ausgangsvoxel. Dabei steht die Zielregion bei den Probanden 4 und 7 auf dem Rang 1. Bei den Probanden 1, 2 und 5 auf dem Rang 2. Bei dem Probanden 8 steht er auf Rang 3.

Zwei weitere stark funktionell konnektierende Zielregionen sind die Regionen Precuneus links und Supp_Motor_Area links. Die Region Precuneus links zeigt einen Mittelwert von 137,7 Ausgangsvoxel mit einer starken funktionellen Konnektivität. Es zeigt sich dabei eine Standardabweichung von 67,6 Ausgangsvoxel. Bei den insgesamt 61 betrachteten Zielregionen außerhalb des Lobus frontalis zeigt sich, dass die Zielregion Precuneus links bei allen Probanden unter den sechs am stärksten konnektivierenden Zielregionen liegt. Bei Proband 1 liegt sie auf Rang eins, bei den Probanden 7 und 8 auf dem Rang zwei.

Die Zielregion Supp_Motor_Area links weist einen Mittelwert von 135,4 zu dieser Region stark konnektivierenden Ausgangsvoxel auf. Es ergibt sich eine Standardabweichung von 55,6 Ausgangsvoxel. Es zeigt sich sowohl für die funktionelle Konnektivität des linken als auch des rechten Gyrus frontalis medialis eine herausragende Korrelation zur linken Supp_Motor_Area links.

Des Weiteren zeigt auch die Zielregion Parietal_Sup links einen im Vergleich hohen Mittelwert an stark konnektierenden Ausgangsvoxeln. Dieser liegt bei 117,6 und weist eine Standardabweichung von 53 Voxel auf. Auffallend ist ebenfalls die Region Cingulum_Mid links. Diese Region zeigt bei 6 von 7 Probanden eine funktionelle Konnektivität die zu den stärksten acht von 61 untersuchten Zielregionen außerhalb des Lobus frontalis gehört. Sie besitzt einen Mittelwert von 114,4 bei einer Standardabweichung von 59,2.

Tab.2: Spezifische Zielregionen für den auditiven Versuchsablauf. Probendenübergreifender Mittelwert über die Anzahlen hoher funktioneller Konnektivitäten in Kortexareale innerhalb und außerhalb des Frontallappens. Die erste Spalte von links beinhaltet die Zielregionen mit der probandenübergreifend stärksten funktionellen Konnektivität zum rechten GFM. Der zweiten Spalte von links ist der entsprechende Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) zu entnehmen. Die stärksten funktionellen Konnektivitäten zum GFM links sind der dritten Spalte von links zu entnehmen. Die jeweils korrelierenden MW sind der ersten Spalte von rechts zu entnehmen.

AUD					
Ausgangsvoxel rechter GFM			Ausgangsvoxel linker GFM		
Zielregion	MW	SD	Zielregion	MW	SD
Frontal_Mid links	151,7	73	Frontal_Mid rechts	157,7	64
Frontal_Sup rechts	162,1	64	Frontal_Sup links	138,7	60
Frontal_Mid_Orb rechts	107,7	40	Frontal_Inf_Tri links	152,7	36
Precuneus links	111,4	51	Frontal_Sup_Med li	141,9	68
Precuneus rechts	111	57	Frontal_Sup rechts	128,7	69
SMA links	108	51	Parietal_Inf links	140,4	54
Parietal_Sup rechts	104,3	35	Precuneus links	137,7	68
Parietal_Inf rechts	88,1	50	SMA links	135,4	56
SMA rechts	81	50	Parietal_Sup links	117,6	53

3.4 Gruppenanalyse zur visuellen Kondition

3.4.1 Ausgangsvoxel rechter Gyrus frontalis medialis

3.4.1.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Innerhalb des Frontallappens spielt die funktionelle Konnektivität des Gyrus frontalis medialis rechts zu der Zielregion Frontal_Sup rechts eine wichtige Rolle. Sie besitzt einen Mittelwert von 118 Ausgangsvoxel mit einer hohen Konnektivität. Die Standardabweichung beträgt 52,7 Voxel. Die Zielregion liegt bei allen Probanden unter den drei am stärksten konnektivierenden Regionen innerhalb des Lobus frontalis.

Es folgt die Zielregion Frontal_Mid links. Diese Zielregion zeigt einen Mittelwert von 91,7 Ausgangsvoxeln mit einer hohen Konnektivität zur Zielregion. Es zeigt sich eine Standardabweichung von 63,4 Voxel. Die Zielregion Frontal_Mid links liegt bei sechs von sieben Probanden unter den fünf am stärksten konnektivierenden Zielregionen.

Des Weiteren zeigt die Zielregion Frontal_Mid_Orb rechts eine starke Konnektivität zur Ausgangsregion. 82,7 Ausgangsvoxel konnektieren im Mittel bei allen Probanden in

hohem Maße. Die Standardabweichung beträgt 37,8 Voxel. Die Region Frontal_Mid_Orb rechts liegt bei allen Probanden unter den sieben am stärksten Konnektivierenden Zielregionen innerhalb des Lobus frontalis.

3.4.1.2 Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Von den 61 betrachteten Zielregionen außerhalb des Frontallappens zeigt die Zielregion Parietal_Sup rechts die größte Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis rechts. Dabei weist sie einen Mittelwert von 60,9 stark konnektierenden Ausgangsvoxel auf. Es zeigt sich eine Standardabweichung von 34,1 Ausgangsvoxel. Die Zielregion liegt bei den Probanden 2, 4, 5, 6, 7 und 8 unter den stärksten sechs Zielregionen außerhalb des Lobus frontalis. Bei den Probanden 2, 4, 6 und 7 steht sie auf Rang eins.

Es folgt die Zielregion Temporal_Pole rechts mit einem Mittelwert von 46 Ausgangsvoxeln mit einer starken Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis. Die Standardabweichung liegt bei 41,2 Voxel.

Es schließt sich die Zielregion Supp_Motor_Area links an. Hier zeigt sich ein Mittelwert von 45 bei einer Standardabweichung von 28,5. Diese Region gehört bei allen Probanden zu den besten neun von 61 Zielregionen. Sie rangiert bei den Probanden 4, 5, 7 und 8 unter den stärksten drei Zielregionen.

Es schließt sich die Zielregion Precuneus rechts an. Sie zeigt einen Mittelwert von 44,3 bei einer Standardabweichung von 26,3 Voxel. Diese befindet sich bei den Probanden 1, 2, 5, 6, 7 und 8 unter den stärksten neun Zielregionen.

Schließlich sind noch die Zielregionen Supp_Motor_Area rechts mit einem Mittelwert von 27,9 Voxel, bei einer Standardabweichung von 33,3 Voxel und die Zielregion Precuneus links mit einem Mittelwert von 35,9 und einer Standardabweichung von 19,9 Voxel zu nennen.

3.4.2 Ausgangsvoxel linker Gyrus frontalis medialis

3.4.2.1 Zielregionen innerhalb des Frontallappens

Die Zielregion Frontal_Inf_Tri links zeigt eine starke Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis. Ihre Anzahl an starken Konnektivitäten kann auf einen Mittelwert von 103,6 Ausgangsvoxel berechnet werden. Die Standardabweichung beträgt 40 Voxel. Die Zielregion liegt bei den Probanden 2 bis 7 unter den stärksten drei Zielregionen innerhalb des Lobus frontalis. Bei Proband 1 liegt sie auf Rang 6 und bei Proband 8 auf Rang fünf.

Des Weiteren zeigt die Zielregion Frontal_Sup links mit einem Mittelwert von 92,3 starken Ausgangsvoxel eine starke Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis. Die Standardabweichung beträgt 45,7 Voxel. Außer bei Proband 5, bei dem sie auf Rang neun liegt, liegt sie bei allen restlichen Probanden unter den fünf stärksten Zielregionen.

Ebenfalls zeigt die Zielregion Frontal_Mid rechts mit einem Mittelwert von 95 Ausgangsvoxel eine starke Konnektivität zur Ausgangsregion. Ihre Standardabweichung beträgt 52 Voxel.

3.4.2.2 Zielregionen außerhalb des Frontallappens

Die Zielregion Parietal_Inf links zeigt unter allen Probanden den höchsten Mittelwert an Zielregionen, welche mit starken Korrelationswerten konnektieren. Dabei kommt Sie auf einen Mittelwert von 89,4 Ausgangsvoxel. Die Standardabweichung liegt bei 44,6 Ausgangsvoxel. Die Zielregion kommt bei allen Probanden außer Proband 6 an erster Stelle vor.

Eine ebenfalls hohe funktionelle Konnektivität zeigt die Zielregion Precentral links. Sie besitzt einen Mittelwert von 77,8 bei einer Standardabweichung von 42,8 Ausgangsvoxel. Sie liegt bei allen Probanden unter den acht am stärksten korrelierenden Zielregionen zum linken Gyrus frontalis medialis. Bei den Probanden 1, 4, 5 und 6 liegt diese Zielregion auf Rang 2.

Die Zielregion Precuneus links weist einen Mittelwert von 64,6 Ausgangsvoxel auf. Es

zeigt sich eine Standardabweichung von 24,5 Ausgangsvoxel. Zusätzlich liegt die Zielregion unter den besten fünf Zielregionen bei den Probanden 1, 2, 5, 6, 7 und 8.

Einen Mittelwert von 62,7 starken Ausgangsvoxel zeigt die Zielregion Supp_Motor_Area links (Tab.3). Dabei besitzt sie eine Standardabweichung von 38,4 Voxel. Zudem sind die Zielregionen Parietal_Sup links und Cingulum_Mid links zu nennen. Sie weisen einen Mittelwert von 58,4 und 52,3 Voxel auf.

Tab.3: Spezifische Zielregionen für den visuellen Versuchsablauf. Probendenübergreifender Mittelwert über die Anzahlen hoher funktioneller Konnektivitäten in Kortexareale innerhalb und außerhalb des Frontallappens. Die erste Spalte von links beinhaltet die Zielregionen mit der probandenübergreifend stärksten funktionellen Konnektivität zum rechten GFM. Der zweiten Spalte von links ist der entsprechende Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) zu entnehmen. Die stärksten funktionellen Konnektivitäten zum GFM links sind der dritten Spalte von links zu entnehmen. Die jeweils korrelierenden MW sind der ersten Spalte von rechts zu entnehmen.

VIS					
Ausgangsvoxel rechter GFM			Ausgangsvoxel linker GFM		
Zielregion	MW	SD	Zielregion	MW	SD
Frontal_Sup rechts	118	53	Frontal_Inf_Tri links	103,6	40
Frontal_Mid links	91,7	63	Frontal_Sup links	92,3	46
Frontal_Mid_Orb rechts	82,7	38	Frontal_Mid rechts	95	52
Parietal_Sup rechts	60,9	34	Parietal_Inf links	89,4	45
Temporal_Pole rechts	46	41	Precentral links	77,8	43
SMA links	45	28	Precuneus links	64,6	25
Precuneus rechts	44,3	26	SMA links	62,7	38
Precuneus links	36	20	Parietal_Sup links	58,4	41

4 Diskussion

4.1 Seed voxel basierendes Analyseverfahren im Vergleich zu multivariaten Analyseverfahren

Angewandte Analyse

Die angewandte *seed voxel* Analyse ermöglicht eine detaillierte Bestimmung der Ausgangsregion. Es wurden nur Ausgangsvoxel entlang der grauen Substanz des bilateralen Gyrus frontalis medialis betrachtet. Die fMRT Datensätze der sieben Probanden sind zur Berechnung der funktionellen Konnektivität des Gyrus frontalis medialis in mehreren Schritten ausgewertet worden. In dem ersten Schritt wurden die Ausgangsvoxel in einem engmaschigen Verteilungsmuster über den Gyrus frontalis medialis einer jeden Kondition definiert. Hierzu konnten die Ausgangsvoxel, in koronaren Schichten mit einer Schichtdicke von 4 mm, mit einer Größe von 1 x 1 x 1 mm entlang der grauen Substanz des Gyrus frontalis medialis der jeweiligen Hemisphäre aufgetragen werden. Im zweiten Schritt erfolgte die Berechnung der funktionellen Konnektivität zwischen Ausgangsvoxel und den 76 betrachteten Zielregionen, die durch ein Kreuzkorrelogramm dargestellt wurden. Einem Kreuzkorrelogramm ist die maximale Verbindungsstärke zwischen dem spezifischem VOI und aller 76 Zielregionen zu entnehmen. Zusätzlich ist die Lage des jeweiligen VOI entlang des Gyrus frontalis medialis über die MNI/ Talairach Koordinate definiert. Die Konnektivität des GFM einer Hemisphäre und einer Kondition kann anhand der Kreuzkorrelogramme für jedes VOI reproduziert werden.

Um die funktionelle Konnektivität des Gyrus frontalis medialis in ein neuronales Netzwerk einbetten zu können wurden nur Ausgangsvoxel mit einer hohen funktionellen Konnektivität zur jeweiligen Zielregion betrachtet. Eine hohe funktionelle Konnektivität ist durch einen Korrelationswert von $\geq 0,6$ definiert. Alle anderen Ausgangsvoxel wurden in der Folge nicht mehr betrachtet. Die Anzahl der Ausgangsvoxel mit Korrelationsstärken von $\geq 0,6$ zu der betrachteten Zielregion entspricht der funktionellen Konnektivität des gesamten Gyrus frontalis medialis zu der speziellen Zielregion. Durch die statistische Auswertung geht die MNI/ Talairach Koordinate des jeweils betrachteten Ausgangsvoxels verloren. Probandenübergreifend wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen dieser den gesamten GFM einer Hemisphäre umspannenden Konnektivität verglichen.

Alternative Methoden

Alternative Methoden zur Analyse der funktionellen Konnektivität stellen multivariate Verfahren dar. Diese Analysemethoden basieren nicht auf einer Vorselektion der zu analysierenden Voxel. Ein populäres Verfahren stellt die *Independent Component Analyse* (ICA) dar. Dieses mathematische Verfahren maximiert die paarweise statistische Unabhängigkeit ihrer Komponenten (Beckmann et al., 2005; Damoiseaux et al., 2006). Die Methode kann primär zur Entdeckung ausgeprägter räumlicher funktioneller Netzwerke herangezogen werden. Ein Nachteil der Methode ist die manuelle Beurteilung wichtiger Komponenten, welche Geräusche von physiologischen Signalen unterscheiden. Studien wiesen signifikante Übereinstimmungen zur Detektion funktioneller Konnektivitäten zwischen der ICA und der *seed voxel* basierten Methode auf (Rosazza et al., 2012).

Ein weiteres Analyseverfahren stellt die Principal Component Analyse (PCA) dar. Die

Berechnung basiert auf einem iterativen Prozess der es ermöglicht, umfangreiche Datensätze zu vereinfachen. Dabei werden Korrelationen zwischen Datenpunkten innerhalb einer Matrix berechnet. Die PCA kombiniert eine kleinere Zahl aussagekräftiger Linearkombinationen und stellt somit als ein multivariates Verfahren funktionelle Netzwerke heraus (Friston et al., 1993; Meyer-Baese et al., 2004).

4.2 Vergleich zwischen effektiver und funktioneller Konnektivität

Von der funktionellen Konnektivität, die als temporale Korrelation zwischen räumlich getrennten neurophysiologischen Prozessen definiert ist, ist die effektive Konnektivität zu unterscheiden (Friston, 1995). Die funktionelle Konnektivität ist dabei eine mathematisch eindeutige und modell-unabhängige Definition für intervall- und verhältnisskalierte Daten.

Effektive Konnektivität

Die effektive Konnektivität ist als der kausale Einfluss, den eine neuronale Einheit auf eine andere ausübt definiert (Friston, 1995). Sie ist im Gegensatz zu der funktionellen Konnektivität eine modell-abhängige Definition. Um die effektive Konnektivität zu bestimmen kann auf eine breite Methodenvielfalt zurückgegriffen werden. Gängige Verfahren stellen die linear univarianten Methoden der Regressionsmodelle dar (Friston et al., 1997). Zusätzliche übliche Methodiken sind die Pfadanalyse, das *Structural equation modelling* und das *Dynamic causal modelling*. Da die effektive Konnektivität ein Basismodell aus mehreren Endpunkten voraussetzt, wird sie meist mithilfe von *second-level* Analysen berechnet. Zuvor müssen die einzelnen Knotenpunkte des Netzwerkes über eine funktionelle Konnektivitätsermittlung definiert werden (Protzner and McIntosh, 2006).

Traktografieverfahren

Eine Methode zur Darstellung einer anatomischen Verbindung anhand von Faserbahnen entlang der weißen Substanz stellt die Traktografie dar. Diese Technik basiert auf der Diffusionsgewichteten Magnetresonanztomografie. Mithilfe des *diffusion tensor imaging* (DWI) kann die Diffusionsbewegung von Wassermolekülen im Zentralnervensystem gemessen werden. Jedes Voxel wird nicht als Skalarwert dargestellt, sondern anhand eines Tensors, einer dreidimensionalen Diffusionsmatrix. So spiegelt der größte Diffusionskoeffizient den Verlauf der Nervenfasern wider (Mori and van Zijl, 2002). Aktuelle Studien versuchen zu bestimmten Sprachaufgaben die funktionelle Konnektivität und die anatomischen Faserverläufe der weißen Substanz mittels DTI zu kombinieren (Beer et al., 2013). Somit können über eine Überlagerung der beiden Verfahren Rückschlüsse auf die effektive Konnektivität gezogen werden.

4.3 Vergleich der funktionellen Konnektivität des GFM mit Literaturergebnissen zur auditorischen und visuellen Wortverarbeitung

Die Studie "*The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009"* (Price, 2010) beschäftigt sich mit der funktionellen Korrelation einzelner Hirnareale zu bestimmten Sprachaufgaben. So sind die anatomischen Areale, die für bestimmte Sprachaufgaben wie z.B. das Satzverständnis oder das Wortverständnis verantwortlich sind, bekannt. Eine Wissenslücke besteht jedoch in der funktionellen Konnektivität der einzelnen Regionen untereinander im Sinne eines funktionellen Netzwerkes (Price, 2010). Daher beschäftigt sich diese Arbeit mit der funktionellen Konnektivität des Gyrus frontalis medialis in der auditiven und visuellen Einzelwort-Perzeption. Ziel der Arbeit ist die funktionelle Eingliederung des Gyrus frontalis medialis in ein neuronales Netzwerk während bestimmter Sprachaufgaben.

Individualanalyse

Die Ergebnisse der Individualanalyse werden einerseits für den auditiven Versuchsablauf und andererseits für den visuellen Versuchsablauf präsentiert. Als Grundlage dienten streng voneinander getrennt durchgeführte fMRT Untersuchungen, in denen zweisilbige deutsche Substantive entweder akustisch über Kopfhörer oder in Druckbuchstaben geschrieben über einen Monitor präsentiert wurden. Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte in der Individualanalyse eines jeden Probanden und in einer Gruppenanalyse. Die Individualanalyse gibt einen detaillierten Überblick der zum Gyrus frontalis medialis funktionell am stärksten korrelierenden Zielregionen wieder. Die von insgesamt 76 korrelierenden betrachteten Zielregionen am stärksten Zielregionen sind konditionsspezifisch und probandenspezifisch für den rechten und linken Gyrus frontalis medialis aufgeführt. Als starke Korrelation ist ein Korrelationswert von ≥ 0.6 definiert. Die Anzahl der starken Korrelationswerte gemessen über alle betrachteten Ausgangsvoxel entlang des Gyrus frontalis medialis einer Kondition gibt die funktionelle Konnektivität wieder. Die einzelnen Zielregionen mit einer erhöhten funktionellen Konnektivität können

im Sinne einer Katalogisierung individuell dem Abschnitt 3.1 und 3.2 Individualanalyse entnommen werden.

Gruppenanalyse

Die Gruppenanalyse basiert auf der Individualanalyse. Die Gruppenanalyse stellt die Zielregionen heraus, welche eine probandenübergreifend hohe funktionelle Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis aufweisen. Als statistische Merkmale dienen der probandenübergreifende Mittelwert und die Standardabweichung der Anzahl der VOI mit einer hohen Konnektivität zu der betrachteten Zielregion. Zusätzlich wurde die Rangfolge der Zielregionen mit einer hohen funktionellen Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis betrachtet.

Für den Gyrus frontalis medialis der rechten Hemisphäre zeigt der Gyrus frontalis medialis links eine hohe funktionelle Konnektivität in dem auditiven Versuchsablauf. Ebenfalls eine probandenübergreifend hohe funktionelle Konnektivität besitzt der Gyrus frontalis superior rechts. Die beiden Regionen weisen innerhalb des Frontallappens die höchste funktionelle Konnektivität auf. Außerhalb des Frontallappens zeigt sich im auditiven Versuchsablauf eine hohe funktionelle Konnektivität des Gyrus frontalis medialis rechts zu der Precuneusregion beidseits sowie der supplementär-motorischen Rinde beidseits. Hohe Konnektivitäten bestehen in Hirnareale des parietalen Kortex. So weisen die Hirnareale Gyrus parietalis superior rechts und Gyrus parietalis inferior rechts probandenübergreifend hohe Konnektivitäten zum Gyrus frontalis medialis rechts während des auditiven Versuchablaufs auf.

Probandenübergreifend hohe funktionelle Konnektivitäten zeigen die Zielregionen Gyrus frontalis medialis rechts und der Gyrus frontalis medialis links während der auditiven Kondition. Im Gegensatz zur Gegenseite zeigt sich innerhalb des Frontallappens eine hohe Konnektivität zu der Pars triangularis links des Gyrus frontalis inferior. Es besteht eine starke Konnektivität zu der supplement-motorischen Rinde der linken Seite. Starke Verbindungen können auch zwischen dem Gyrus frontalis medialis links und dem linken Parietallappen nachgewiesen werden. So besitzt der Gyrus parietalis inferior die probandenübergreifend höchste funktionelle Konnektivität zu dem Gyrus frontalis medialis außerhalb des Frontallappens.

Betrachtet man den visuellen Versuchsablauf für den rechten Gyrus frontalis medialis, so

zeigt sich eine hohe funktionelle Konnektivität zum Gyrus frontalis medialis links und zu dem Gyrus frontalis superior rechts. Hohe Korrelationen zeigt der linke supplementmotorische Kortex und der rechte Gyrus parietalis superior.

Der Gyrus frontalis medialis links besitzt während der auditiven Kondition starke Konnektivität zu der Pars triangularis links des Gyrus frontalis inferior. Zusätzlich zeigen sich innerhalb des Frontallappens noch hohe Konnektivitäten zu dem Gyrus frontalis superior links und zu dem Gyrus frontalis medialis rechts. Eine wichtige Rolle in dem Verschaltungsmuster spielt erneut der supplement-motorische Kortex links. Auch der Parietallappen zeigt mit den Zielregionen Gyrus parietalis inferior und superior links eine hohe funktionelle Konnektivität.

Dorsomedialer prefrontaler Kortex

Der Gyrus frontalis medialis und Gyrus frontalis superior zeigen die höchsten gruppenübergreifenden Konnektivitäten zu dem GFM beidseits während beider Konditionen. Beide gehören zu dem dorsomedial prefrontal cortex (DFPMC) und konnten in verschiedenen Arbeiten als Schaltstellen innerhalb des semantischen Systems lokalisiert werden. Der DMPFC formt ein diagonal orientiertes Band zwischen dem posteriormedialen Aspekt des Gyrus frontalis medialis, über den Gyrus frontalis superior (Binder et al., 2009). Eine hirnorganische Läsion in diesem Bereich verursacht eine motorische Aphasie (Freedman et al., 1984). Zusätzlich wird dieser Region eine spezifische Funktion für die flüssige Wiedergabe von semantischen Zusammenhängen zugerechnet (Binder et al., 2009). In Veröffentlichungen zu der semantischen Sprachverarbeitung konnten Sharp und Kollegen (Sharp et al., 2010) eine enge Einbindung des Gyrus frontalis medialis sowie des Gyrus frontalis superior nachweisen. Zusätzlich sind beide in die prelexikale Wortverarbeitung eingeschaltet (Davis and Gaskell, 2009b). Dem Gyrus frontalis medialis links kommt zudem eine wichtige Aufgabe für die Worterkennung und Sprachproduktion zu (Price, 2010). Diese Arbeit stellt die hohe funktionelle Konnektivität zwischen dem Gyrus frontalis medialis und dem jeweils ipsilateralen Gyrus frontalis superior heraus. In Ergänzung des linksdominanten DFPMC zeigt sich in dieser Arbeit eine bilateral stark ausgeprägte Konnektivität. So weisen der Gyrus frontalis medialis rechts und links gespiegelte Konnektivitäten auf. Es zeigt sich jeweils eine hohe Konnektivität zu dem jeweils ipsilateralen Gyrus frontalis superior und zu dem jeweils kontralateralen Gyrus frontalis medialis.

SMA und Broca Areal

Das SMA ist ebenfalls in eine Reihe von funktionellen Abläufen während der Sprachproduktion eingebunden. Es finden sich hohe Konnektivitäten zwischen rechten Gyrus frontalis medialis und bilateralen Anteile des SMA. Typischerweise zeigen sich gesteigerte bilaterale Aktivitäten in dem SMA während der Sprachproduktion (Brown et al., 2009). Friederici konnte eine durchgehende Aktivierung des SMA während der Sprachproduktion feststellen (Friederici et al., 2010). Studien zeigen, dass Läsionen in dieser Region zu einer Fülle von kognitiven Defiziten führen wie beispielsweise einer transkortikalen sensorischen Aphasie (Damasio and Damasio, 1979) oder einer Alexie und Agraphie (Cipolotti et al., 1991). Innerhalb dieser Arbeit zu der funktionellen Konnektivität zeigen sich starke Verbindungen zwischen dem Gyrus frontalis medialis zu dem SMA links.

Hohe funktionelle Konnektivitäten bestehen zwischen dem linken Gyrus frontalis medialis und der linken Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior, dem Sitz des Broca Areals. Es lassen sich hohe Konnektivitäten sowohl für die auditive als auch für die visuelle Kondition zwischen GFM links und der linken Pars triangularis abgrenzen. Die funktionelle Konnektivität zwischen den Regionen konnte ebenfalls durch andere Arbeiten herausgestellt werden (Binkofski et al., 2000; Crosson et al., 2001). Die hohen Konnektivitäten bestehen nur zwischen dem linken Gyrus frontalis medialis und dem linken Broca Areal.

Superior longitudinal fasciculus

Es ließen sich stake Verbindungen zwischen dem Gyrus frontalis medialis und dem Gyrus parietalis inferior darstellen, welcher Teile des Gyrus angularis bildet. Mehrere DTI Studien konstatierten eine anatomische Verbindung parallel zu dem Fasciculus arquatus (Catani et al., 2005). Dieses Faserbündel wird durch den lateralen *superior longitudinal fasciculus* (SLF) gebildet. Der anteriore Teil des lateralen SLF verbindet das Broca Areal mit Anteilen des Gyrus frontalis medialis. Intraoperative Neurostimulationsstudien konnten reproduktive Sprachausfälle, ausgelöst durch eine Stimulation dieser Faserbahn erzeugen (Duffau et al., 2003). Funktionell kann der Gyrus frontalis inferior mit dem Sprachgedächtnis in Zusammenhang gebracht werden (Binder et al., 2009). Zusätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen der Findung von Wörtern der somatosensorischen Kategorie und einer Aktivität des Gyrus parietalis inferior (Hwang et al., 2009).

Der links ventrale okzipitotemporale Kortex

FMRT Studien beschreiben ein großes Areal, welches lateral zu dem Gyrus fusiformis und medial zu dem Gyrus temporalis inferior liegt. Diese Region ist in Prozesse der Wortselektion während des Lesens eingebunden (Olulade et al., 2013). Sie ist essentiell mit in die visuelle Wortverarbeitung eingebunden. Die anatomische Organisation innerhalb dieser Region ist in Faserbahnen aufgeteilt, welche den okzipitalen Kortex mit anterioren und medialen Anteilen des Temporallappens verbinden (Yeatman et al., 2013). Zudem spielen der inferiore fronto-okzipitale Faszikulus sowie der vertikale okzipitale Faszikulus in der anatomischen Organisation des Lesens eine bedeutende Rolle (Yeatman et al., 2013). Die Arbeitsgruppe um Simons beschreibt eine zeitliche Sequenzierung des linken Gyrus fusiformis. Hier zeigen sich für die Temporalregionen frühe Aktivitäten während des Lesens (Simos et al., 2013). Unterschiedliche Lernfortschritte des Lesens aktivieren unterschiedliche Areale und Faserbahnen innerhalb des okzipitotemporalen Kortex (Price and Devlin, 2011; Pugh et al., 2013). In dieser Arbeit findet sich weder für die visuelle noch für die auditive Kondition eine erhöhte funktionelle Konnektivität zwischen dem linken GFM und den Knotenpunkten des links ventralen okzipitotemporalen Kortex.

Linksdominante Konnektivität

Die Literaturergebnisse bestätigen die funktionelle Bedeutung der oben genannten Zielregionen für bestimmte Sprachaufgaben. Die Ergebnisse der funktionellen Konnektivität in dieser Arbeit stimmen somit in Hinblick auf die funktionelle Bedeutung der betrachteten Zielregionen überein. Die Daten bestätigen die Einbettung des DFPMC als funktionelles Zentrum der semantischen Sprachverarbeitung. In Ergänzung zu dem links dominanten Modell Binders lassen die aktuellen Daten auf eine linksdominate Konnektivität zwischen GFM links und dem Broca Areal sowie dem linken SMA schließen (Binder et al., 2009). Es zeigen sich starke Verbindungen zum jeweils ipsilateralen Gyrus frontalis superior und zum jeweils kontralateralen Gyrus frontalis medialis während beider Konditionen.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Komprimierung der Daten ermöglicht einen deskriptiven Ansatz zur Bestimmung starker Konnektivitäten innerhalb eines funktionellen Netzwerks. Nachfolgende Arbeiten könnten durch eine geringere Einschränkung des Datenvolumens Rückschlüsse über die gesamte Distribution dieses Netzwerks ziehen. Folgearbeiten sollten zudem diese voxelbasierte Arbeit nutzen, um mögliche kortikale Ensembles entlang des Gyrus frontalis medialis mit einer hohen funktionellen Konnektivität näher zu definieren.

4.4 Vergleich der Interkonnektivität des GFM mit Literaturergebnissen zur funktionellen Konnektivität der Sprachverarbeitung

Unterschiedliche methodische Ansätze auf dem Feld der Konnektivitätsforschung beschreiben ein Netzwerk, das Anteile des Frontal-, Temporal- und Parietallappens umfasst.

In Resting-State Arbeiten zur funktionellen Konnektivität der Sprachverarbeitung zeigt sich ein Netzwerk, bestehend aus einem anteroposterioren Konnektivitätsgradienten. Hierbei ließ sich eine Interkonnektivität der Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior zu anterioren Teilen des SMA und des Gyrus frontalis superior abgrenzen. Die Pars opercularis konnektiert zu dem Gyrus frontalis medialis, dem SMA und dem Gyrus frontalis superior. Eine zusätzliche Verbindung besteht zwischen Broca und dem Gyrus parietalis inferior (Margulies and Petrides, 2013). Als neue Erkenntnis zeigt sich in dieser task basierten fMRT Studie eine linksdominant hohe Konnektivität des linken Gyrus frontalis medialis zu dem linken SMA, der linken Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior und dem Gyrus parietalis inferior links in der visuellen und auditiven Kondition. In dieser Studie zeigt sich im Unterschied zu Margulies eine hohe funktionelle Konnektivität des linken GFM nicht nur zu dem Broca Areal sondern auch zu weiteren Netzwerkpunkten des anteroposterioren Gradienten. Diese Arbeit zeigt sowohl für die visuelle als auch die auditive Kondition hohe Konnektivitäten des GFM links zu der linken Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior. Zusätzlich konnektiert der GFM beidseits zu dem SMA links und dem ipsilateralen Gyrus frontalis superior während beider Konditionen. Es zeigt sich eine erhöhte Interkonnektivität zwischen GFM und dem ipsilateralen Gyrus parietalis inferior in der auditiven Kondition und zwischen dem linken GFM und dem linken Gyrus parietalis inferior während des visuellen Versuchsablaufs. Somit kann auch in dieser Arbeit ein anteroposteriorer Konnektivitätsgradient beobachtet werden. Entgegen anderer Arbeiten erscheint insbesondere die linkshemisphärische Interkonnektivität den zu Temporalregionen weniger ausgeprägt zu sein. Es zeigt sich entgegen der Arbeit von Margulies 2013 eine erhöhte Konnektivität zu dem Precuneus. Der Precuneus wies in Arbeiten zu der funktionellen Anatomie des Sprachverständnisses eine erhöhte Aktivität während des Satzverständnisses auf (Price, 2010). Zusätzlich wird die Precuneusregion

sowohl in task basierten Arbeiten der Sprachverarbeitung als auch in Resting-State Arbeiten zu dem *task-negative network* oder *default network* gezählt. Hierbei lässt sich eine verringerte Aktivität in Stimulus basierten Arbeiten und eine Antikorrelation in Resting-State Arbeiten erkennen (Fox et al., 2005; Shulman et al., 1997). In dieser Arbeit finden sich hingegen probandenübergreifend erhöhte Konnektivitäten zu dem Precuneus während der auditiven und visuellen Kondition. Somit spricht dies für eine Einbindung in das entdeckte funktionelle Netzwerk.

Autoradiografiemethoden an Makaken beschreiben einen ventralen temporo-frontalen Strom von Faserbahnen, welcher das Broca Areal mit dem GFM, dem Gyrus parietalis inferior und dem Gyrus precentralis verbindet. Eine Einbindung des Precuneus findet sich jedoch nicht. Des Weiteren beschreiben DTI Studien den lateralen SLF, eine Verbindung zwischen dem Broca Areal und dem Gyrus frontalis inferior (Catani et al., 2005). Als Ergebnis dieser Arbeit zeigen sich sowohl starke funktionelle Konnektivitäten zu Knotenpunkten des anteroposterioren Gradienten als auch zu Knotenpunkten des lateralen SLF.

5 Schlussfolgerung

Diese Arbeit belegt die Einbindung des Gyrus frontalis medialis in ein funktionelles Netzwerk während der Modulation von akustischen und visuellen Reizen. Es konnte ein Netzwerk bestehend aus den stärksten funktionellen Konnektivitäten zum Gyrus frontalis medialis aufgezeigt werden.

Als neue Erkenntnis zeigt sich in dieser task basierten fMRT Studie eine linksdominant hohe Konnektivität des linken Gyrus frontalis medialis zu dem linken SMA, der linken Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior und dem Gyrus parietalis inferior links in der visuellen und auditiven Kondition. Bisherige Arbeiten binden den linken Gyrus frontalis medialis mit in ein linksdominantes Netzwerk ein (Margulies and Petrides, 2013). Dieses Netzwerk beschreibt einen anteroposterioren Konnektivitätsgradienten. Der Gradient beinhaltet funktionelle Konnektivitäten zwischen dem Broca Areal und dem GFM und Gyrus frontalis superior. Zusätzlich besteht eine funktionelle Konnektivität zwischen Broca und dem linken SMA und dem linken Gyrus parietalis inferior. In dieser Studie zeigt sich jedoch eine hohe funktionelle Konnektivität des linken GFM nicht nur zu dem Broca Areal, sondern auch zu den restlichen Knotenpunkten des anteroposterioren Gradienten. In dieser task basierten Studie wurde die visuelle und auditive Wortverarbeitung in getrennt voneinander durchgeführten Versuchsabläufen geprüft. Die Ergebnisse beschreiben eine für den visuellen und auditiven Versuchsablauf erhöhte Konnektivität des linken GFM entlang des anteroposterioren Gradienten. Neu belegen die Ergebnisse dieser Arbeit ein Netzwerk aus hohen funktionellen Konnektivitäten innerhalb der Frontalregionen. So kann sowohl für die visuelle als auch für die auditive Kondition ein frontales Netzwerk zwischen dem GFM einer Hemisphäre und dem jeweils ipsilateralen Gyrus frontalis superior und dem kontralateralen Gyrus frontalis medialis bestimmt werden. Entgegen Resting-State Arbeiten der funktionellen Konnektivität der Sprachverarbeitung zeigt sich in dieser Arbeit eine erhöhte Konnektivität des rechten GFM zu dem Precuneus beidseits und des linken GFM zu dem linken Precuneus während beider Konditionen (Margulies and Petrides, 2013). Arbeiten zur funktionellen Anatomie sprechen der Precuneusregion eine Bedeutung während des Satzverständnisses zu (Price, 2010). In bisherigen Arbeiten zu der funktionellen Konnektivität der Wortverarbeitung konnte eine funktionelle Konnektivität zu temporalen Regionen festgestellt werden (Yeatman et al., 2013). In dieser Arbeit zeigt Interkonnektivität zwischen GFM sich eine weniger ausgeprägte und den Temporalregionen.

Anders als bisherige methodische Ansätze zur Bestimmung der funktionellen Konnektivität wurde in dieser Studie eine Voxel basierte Bestimmung der Konnektivitätsstärke des Netzwerkes entlang des GFM einer Hemisphäre und einer Kondition angewandt. Hierbei wurde zu jedem Voxel über ein engmaschiges Raster jeweiligen GFM die Konnektivitätsstärke zu 76 entlang des Zielregionen konditionsspezifisch berechnet. Zur Netzwerkbestimmung wurden in der Einzelanalyse und der Gruppenanalyse nur Voxel mit einer Konnektivitätsstärke von ≥ 0.6 betrachtet. Die erstellten Kreuzkorrelogramme bilden zudem voxelbasiert den Korrelationsstärkenverlauf des gesamten GFM einer jeden Hemisphäre ab. Aufgrund der angewandten Analyse geht die hierbei zugrundeliegende Talairach Koordinate eines Voxels verloren. Folgearbeiten könnten durch die Reproduktion der Voxelkoordinate Rückschlüsse über die Verteilung der stark konnektierenden Voxel entlang des GFM treffen. Die Bestimmung der Konnektivitätsstärke ermöglicht die weitere Klassifikation der Netzwerke. Ausgehend von den erzielten Daten können durch die Modulation der definierten Korrelationsstärke auch Netzwerke mit einer noch stärkeren oder auch nur sehr schwachen Konnektivität zu dem Gyrus frontalis medialis entdeckt werden.

Traktografiestudien und Autoradiografiestudien unterstützen das Ergebnis hoher funktioneller Konnektivitäten zwischen GFM und dem Broca Areal sowie GFM und dem SMA (Ford et al., 2010). Das in dieser Arbeit beschriebene Konnektivitätsmuster der frontalen Regionen mit jeweils ipsilateral hohen Konnektivitäten zwischen GFM und Gyrus frontalis medialis stimmen mit DTI Studien überein. Diese beschreiben den Gyrus frontalis superior und das Broca Areal als Knotenpunkte des lateralen SFL (Catani et al., 2005). Daher kann ausgehend von dieser Arbeit eine vielschichtigere Distribution der effektiven Konnektivität innerhalb dieses frontalen Netzwerkes angenommen werden.

Die verwendete Methode stellt neu heraus, dass Ausgangsvoxel während einer Kondition zu mehreren Zielregionen konnektieren. Ein großer Teil der betrachteten Ausgangsvoxel weist während eines Versuchsablaufs hohe Konnektivitätsstärken zu gleichzeitig multiplen Zielregionen auf. Diese Beobachtung zeigte sich sowohl während der auditiven, als auch während der visuellen Kondition.

6 Literaturverzeichnis

Ali, N., Green, D.W., Kherif, F., Devlin, J.T., and Price, C.J. (2010). The role of the left head of caudate in suppressing irrelevant words. J Cogn Neurosci *22*, 2369-2386.

Baschek, V., and Battmer, R.D. (1977). [A new method of testing directional hearing (author's transl)]. HNO 25, 318-321.

Beckmann, C.F., DeLuca, M., Devlin, J.T., and Smith, S.M. (2005). Investigations into resting-state connectivity using independent component analysis. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci *360*, 1001-1013.

Beer, A.L., Plank, T., Meyer, G., and Greenlee, M.W. (2013). Combined diffusionweighted and functional magnetic resonance imaging reveals a temporal-occipital network involved in auditory-visual object processing. Front Integr Neurosci *7*, *5*.

Belin, P., and Zatorre, R.J. (2000). 'What', 'where' and 'how' in auditory cortex. Nat Neurosci 3, 965-966.

Beu, M., Baudrexel, S., Hautzel, H., Antke, C., and Mueller, H.W. (2009). Neural traffic as voxel-based measure of cerebral functional connectivity in fMRI. J Neurosci Methods *176*, 263-269.

Bilenko, N.Y., Grindrod, C.M., Myers, E.B., and Blumstein, S.E. (2009). Neural correlates of semantic competition during processing of ambiguous words. J Cogn Neurosci *21*, 960-975.

Binder, J.R., Desai, R.H., Graves, W.W., and Conant, L.L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. Cereb Cortex *19*, 2767-2796.

Binkofski, F., Amunts, K., Stephan, K.M., Posse, S., Schormann, T., Freund, H.J., Zilles, K., and Seitz, R.J. (2000). Broca's region subserves imagery of motion: a combined cytoarchitectonic and fMRI study. Hum Brain Mapp *11*, 273-285.

Birn, R.M., Kenworthy, L., Case, L., Caravella, R., Jones, T.B., Bandettini, P.A., and Martin, A. (2010). Neural systems supporting lexical search guided by letter and semantic

category cues: a self-paced overt response fMRI study of verbal fluency. Neuroimage 49, 1099-1107.

Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. Annu Rev Neurosci *25*, 151-188.

Britton, B., Blumstein, S.E., Myers, E.B., and Grindrod, C. (2009). The role of spectral and durational properties on hemispheric asymmetries in vowel perception. Neuropsychologia *47*, 1096-1106.

Brown, S., Laird, A.R., Pfordresher, P.Q., Thelen, S.M., Turkeltaub, P., and Liotti, M. (2009). The somatotopy of speech: phonation and articulation in the human motor cortex. Brain Cogn *70*, 31-41.

Catani, M., Jones, D.K., and ffytche, D.H. (2005). Perisylvian language networks of the human brain. Ann Neurol 57, 8-16.

Chang, S.E., M.K. Kenney, T.M. Loucks, *et al.* (2009). Common neural substrates support speech and nonspeech vocal tract gestures. (*Neuroimage* **47:** 314–325).

Cipolotti, L., Butterworth, B., and Denes, G. (1991). A specific deficit for numbers in a case of dense acalculia. Brain *114 (Pt 6)*, 2619-2637.

Crosson, B., Sadek, J.R., Maron, L., Gökçay, D., Mohr, C.M., Auerbach, E.J., Freeman, A.J., Leonard, C.M., and Briggs, R.W. (2001). Relative shift in activity from medial to lateral frontal cortex during internally versus externally guided word generation. J Cogn Neurosci *13*, 272-283.

Dale, A.M., and Buckner, R.L. (1997). Selective averaging of rapidly presented individual trials using fMRI. Hum Brain Mapp *5*, 329-340.

Damasio, H., and Damasio, A. (1979). "Paradoxic" ear extinction in dichotic listening: possible anatomic significance. Neurology *29*, 644-653.

Damoiseaux, J.S., Rombouts, S.A., Barkhof, F., Scheltens, P., Stam, C.J., Smith, S.M., and Beckmann, C.F. (2006). Consistent resting-state networks across healthy subjects. Proc Natl Acad Sci U S A *103*, 13848-13853.

Davis, M.H., and Gaskell, M.G. (2009a). A complementary systems account of word

learning: neural and behavioural evidence. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci *364*, 3773-3800.

Davis, M.H., and Gaskell, M.G. (2009b). A complementary systems account of word learning: neural and behavioural evidence. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci *364*, 3773-3800.

de Zubicaray, G.I., and McMahon, K.L. (2009). Auditory context effects in picture naming investigated with event-related fMRI. Cogn Affect Behav Neurosci *9*, 260-269.

Duffau, H. (2008). The anatomo-functional connectivity of language revisited. New insights provided by electrostimulation and tractography. Neuropsychologia *46*, 927-934.

Duffau, H., Gatignol, P., Denvil, D., Lopes, M., and Capelle, L. (2003). The articulatory loop: study of the subcortical connectivity by electrostimulation. Neuroreport *14*, 2005-2008.

Fiez, J.A., and Petersen, S.E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. Proc Natl Acad Sci U S A 95, 914-921.

Ford, A., McGregor, K.M., Case, K., Crosson, B., and White, K.D. (2010). Structural connectivity of Broca's area and medial frontal cortex. Neuroimage *52*, 1230-1237.

Fox, M.D., Snyder, A.Z., Vincent, J.L., Corbetta, M., Van Essen, D.C., and Raichle, M.E. (2005). The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. Proc Natl Acad Sci U S A *102*, 9673-9678.

Freedman, M., Alexander, M.P., and Naeser, M.A. (1984). Anatomic basis of transcortical motor aphasia. Neurology *34*, 409-417.

Frey, S., Campbell, J.S., Pike, G.B., and Petrides, M. (2008). Dissociating the human language pathways with high angular resolution diffusion fiber tractography. J Neurosci *28*, 11435-11444.

Fridriksson, J., Moser, D., Ryalls, J., Bonilha, L., Rorden, C., and Baylis, G. (2009). Modulation of frontal lobe speech areas associated with the production and perception of speech movements. J Speech Lang Hear Res *52*, 812-819.

Friederici, A.D., Kotz, S.A., Scott, S.K., and Obleser, J. (2010). Disentangling syntax and intelligibility in auditory language comprehension. Hum Brain Mapp *31*, 448-457.
Friederici, A.D., Makuuchi, M., and Bahlmann, J. (2009). The role of the posterior superior temporal cortex in sentence comprehension. Neuroreport *20*, 563-568.

Friston, K.J. (1995). Functional and effective connectivity in neuroimaging: a synthesis. (Hum. Brain Mapp. 2), pp. 56-78.

Friston, K.J., Buechel, C., Fink, G.R., Morris, J., Rolls, E., and Dolan, R.J. (1997). Psychophysiological and modulatory interactions in neuroimaging. Neuroimage *6*, 218-229.

Friston, K.J., Frith, C.D., Liddle, P.F., and Frackowiak, R.S. (1993). Functional connectivity: the principal-component analysis of large (PET) data sets. J Cereb Blood Flow Metab *13*, 5-14.

Heim, S., Eickhoff, S.B., and Amunts, K. (2009). Different roles of cytoarchitectonic BA 44 and BA 45 in phonological and semantic verbal fluency as revealed by dynamic causal modelling. Neuroimage *48*, 616-624.

Hocking, J., McMahon, K.L., and de Zubicaray, G.I. (2009). Semantic context and visual feature effects in object naming: an fMRI study using arterial spin labeling. J Cogn Neurosci *21*, 1571-1583.

Hwang, K., Palmer, E.D., Basho, S., Zadra, J.R., and Müller, R.A. (2009). Categoryspecific activations during word generation reflect experiential sensorimotor modalities. Neuroimage *48*, 717-725.

Jeon, H.A., Lee, K.M., Kim, Y.B., and Cho, Z.H. (2009). Neural substrates of semantic relationships: common and distinct left-frontal activities for generation of synonyms vs. antonyms. Neuroimage *48*, 449-457.

Jobard, G., Crivello, F., and Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Evaluation of the dual route theory of reading: a metanalysis of 35 neuroimaging studies. Neuroimage *20*, 693-712.

Junqueira, L.C., and Caneiro, J. (2000). Histologie, 5 edn (Berlin, Heidelberg: Springer).

Kircher, T., K. Sass, O. Sachs & amp; S. Krach. 2009. (2009). Priming words with pictures: neural correlates of semantic associations in a cross-modal priming task using fMRI. (*Hum. Brain Mapp.* **30:** 4116–4128.).

Kouider, S., de Gardelle, V., Dehaene, S., Dupoux, E., and Pallier, C. (2010). Cerebral

bases of subliminal speech priming. Neuroimage 49, 922-929.

Leff, A.P., Schofield, T.M., Crinion, J.T., Seghier, M.L., Grogan, A., Green, D.W., and Price, C.J. (2009). The left superior temporal gyrus is a shared substrate for auditory short-term memory and speech comprehension: evidence from 210 patients with stroke. Brain *132*, 3401-3410.

Makris, N., Kennedy, D.N., McInerney, S., Sorensen, A.G., Wang, R., Caviness, V.S., and Pandya, D.N. (2005). Segmentation of subcomponents within the superior longitudinal fascicle in humans: a quantitative, in vivo, DT-MRI study. Cereb Cortex *15*, 854-869.

Margulies, D.S., and Petrides, M. (2013). Distinct parietal and temporal connectivity profiles of ventrolateral frontal areas involved in language production. J Neurosci *33*, 16846-16852.

Martin, R.E., MacIntosh, B.J., Smith, R.C., Barr, A.M., Stevens, T.K., Gati, J.S., and Menon, R.S. (2004). Cerebral areas processing swallowing and tongue movement are overlapping but distinct: a functional magnetic resonance imaging study. J Neurophysiol *92*, 2428-2443.

Mashal, N., Faust, M., Hendler, T., and Jung-Beeman, M. (2009). An fMRI study of processing novel metaphoric sentences. Laterality *14*, 30-54.

Meyer-Baese, A., Wismueller, A., and Lange, O. (2004). Comparison of two exploratory data analysis methods for fMRI: unsupervised clustering versus independent component analysis. IEEE Trans Inf Technol Biomed *8*, 387-398.

Mori, S., and van Zijl, P.C. (2002). Fiber tracking: principles and strategies - a technical review. NMR Biomed 15, 468-480.

Naidich, T.P., Duvernoy, H.M., and Delman, B. (2009). Duvernoy's Atlas of the Human Brain Stem and Cerebellum; High-Field MRI: Surface Anatomy, Internal Structure, Vascularization and 3D Sectional Anatomy (Vienna: Springer).

Nosarti, C., Mechelli, A., Green, D.W., and Price, C.J. (2010). The impact of second language learning on semantic and nonsemantic first language reading. Cereb Cortex *20*, 315-327.

Obleser, J., and Kotz, S.A. (2010). Expectancy constraints in degraded speech modulate

the language comprehension network. Cereb Cortex 20, 633-640.

Olulade, O.A., Flowers, D.L., Napoliello, E.M., and Eden, G.F. (2013). Developmental differences for word processing in the ventral stream. Brain Lang *125*, 134-145.

Petrides, M., and Pandya, D.N. (2002). Comparative cytoarchitectonic analysis of the human and the macaque ventrolateral prefrontal cortex and corticocortical connection patterns in the monkey. Eur J Neurosci *16*, 291-310.

Petrides, M., and Pandya, D.N. (2009). Distinct parietal and temporal pathways to the homologues of Broca's area in the monkey. PLoS Biol 7, e1000170.

Price, C.J. (2010). The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. Ann N Y Acad Sci *1191*, 62-88.

Price, C.J., and Devlin, J.T. (2011). The interactive account of ventral occipitotemporal contributions to reading. Trends Cogn Sci *15*, 246-253.

Protzner, A.B., and McIntosh, A.R. (2006). Testing effective connectivity changes with structural equation modeling: what does a bad model tell us? Hum Brain Mapp *27*, 935-947.

Pugh, K.R., Landi, N., Preston, J.L., Mencl, W.E., Austin, A.C., Sibley, D., Fulbright, R.K., Seidenberg, M.S., Grigorenko, E.L., Constable, R.T., *et al.* (2013). The relationship between phonological and auditory processing and brain organization in beginning readers. Brain Lang *125*, 173-183.

Rauschecker, J.P., and Scott, S.K. (2009). Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. Nat Neurosci *12*, 718-724.

Rogalsky, C., and Hickok, G. (2009). Selective attention to semantic and syntactic features modulates sentence processing networks in anterior temporal cortex. Cereb Cortex *19*, 786-796.

Rosazza, C., Minati, L., Ghielmetti, F., Mandelli, M.L., and Bruzzone, M.G. (2012). Functional connectivity during resting-state functional MR imaging: study of the correspondence between independent component analysis and region-of-interest-based methods. AJNR Am J Neuroradiol *33*, 180-187.

Schafer, R.J., and Constable, T. (2009). Modulation of functional connectivity with the

syntactic and semantic demands of a Noun Phrase Formation Task: a possible role for the Default Network. Neuroimage *46*, 882-890.

Sharp, D.J., Awad, M., Warren, J.E., Wise, R.J., Vigliocco, G., and Scott, S.K. (2010). The neural response to changing semantic and perceptual complexity during language processing. Hum Brain Mapp *31*, 365-377.

Shulman, G.L., Fiez, J.A., Corbetta, M., Buckner, R.L., Miezin, F.M., Raichle, M.E., and Petersen, S.E. (1997). Common Blood Flow Changes across Visual Tasks: II. Decreases in Cerebral Cortex. J Cogn Neurosci *9*, 648-663.

Simos, P.G., Rezaie, R., Fletcher, J.M., and Papanicolaou, A.C. (2013). Time-constrained functional connectivity analysis of cortical networks underlying phonological decoding in typically developing school-aged children: a magnetoencephalography study. Brain Lang *125*, 156-164.

Trepel, M. (2004). Neuroanatomie, Struktur und Funktion. (München: Urban & Fischer).

Tyler, L.K., Shafto, M.A., Randall, B., Wright, P., Marslen-Wilson, W.D., and Stamatakis, E.A. (2010). Preserving syntactic processing across the adult life span: the modulation of the frontotemporal language system in the context of age-related atrophy. Cereb Cortex *20*, 352-364.

Visser, M., Jefferies, E., and Lambon Ralph, M.A. (2010). Semantic processing in the anterior temporal lobes: a meta-analysis of the functional neuroimaging literature. J Cogn Neurosci *22*, 1083-1094.

Vogel, A.C., Church, J.A., Power, J.D., Miezin, F.M., Petersen, S.E., and Schlaggar, B.L. (2013). Functional network architecture of reading-related regions across development. Brain Lang *125*, 231-243.

Weishaupt, D. (2006). Wie funktioniert MRT?, 5 edn (Berlin: Springer).

Whitney, C., Weis, S., Krings, T., Huber, W., Grossman, M., and Kircher, T. (2009). Taskdependent modulations of prefrontal and hippocampal activity during intrinsic word production. J Cogn Neurosci *21*, 697-712.

Willems, R.M., Ozyürek, A., and Hagoort, P. (2009). Differential roles for left inferior frontal and superior temporal cortex in multimodal integration of action and language.

Neuroimage 47, 1992-2004.

Ye, Z., and Zhou, X. (2009). Conflict control during sentence comprehension: fMRI evidence. Neuroimage *48*, 280-290.

Yeatman, J.D., Rauschecker, A.M., and Wandell, B.A. (2013). Anatomy of the visual word form area: adjacent cortical circuits and long-range white matter connections. Brain Lang *125*, 146-155.

Zheng, Z.Z., K.G. Munhall & amp; I.S. Johnsrude. (2009). Functional overlap between regions involved in speech perception and in monitoring one's own voice during speech production. (*J. Cogn. Neurosci.* doi: 10.1162/jocn.2009.21324.).

Zilles, K., and Rehkämper, G. (1998). Funktionelle Neuroanatomie, 3 edn (Berlin: Springer).

http://www.bloodshed.net/c/index.html_(zuletzt abgerufen am 10.10.2013)

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides statt, dass die Dissertation selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erstellt worden ist und die hier vorgelegte Dissertation nicht von einer anderen Medizinischen Fakultät abgelehnt worden ist.

23.04.2014, Joel Aissa