

Aus dem Bernstein Center for Computational Neuroscience
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Multivariate „Searchlight“-Musterklassifizierung humaner fMRT-Signale
in multiplen kognitiven Modalitäten: Visuelle Aufmerksamkeit, Syntax und Emotion**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum medicarum (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät

Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Dipl. Biol. Christian Kalberlah

geboren in Düsseldorf am Rhein

Gutachter: 1. Prof. Dr. rer. nat. J.-D. Haynes
 2. Prof. Dr. M. Lotze
 3. Prof. Dr. J.-M. Hopf

Datum der Promotion: 23.06.2013

Inhaltsverzeichnis

1	<u>Zusammenfassung der Publikationspromotion</u>	1
1.1	Abstract	1
1.2	Einleitung	2
1.2.1	<i>Funktionelle Magnetresonanztomographie und Multivoxel-Muster-Analyse</i>	2
1.2.2	<i>Kortikale Repräsentation von örtlicher visueller Aufmerksamkeit</i>	3
1.2.3	<i>Hierarchie der Repräsentation von Syntax</i>	3
1.2.4	<i>Neuronale Repräsentation von Emotion</i>	4
1.3	Zielstellung	4
1.4	Methodik	5
1.4.1	<i>Studienteilnehmer</i>	5
1.4.2	<i>Magnetresonanztomographie</i>	5
1.4.3	<i>Searchlight-basierte Multivoxel-Muster-Analyse</i>	6
1.5	Ergebnisse	8
1.6	Diskussion	9
1.6.1	<i>Kodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit in Aktivierungsmustern</i>	9
1.6.2	<i>Funktionelle Dissoziation in der Kodierung von akustischen Merkmalen und Syntax</i>	9
1.6.3	<i>Neuronales Netzwerk zur Kategorisierung von Emotion</i>	10
1.6.4	<i>MVMA als sensitive Methode zur Analyse von Daten humaner fMRT</i>	10
1.7	Literatur	11
2	<u>Anteilerklärung zu den vorgelegten Publikationen</u>	16
3	<u>Der Dissertationsschrift zugrundeliegende wissenschaftliche Publikationen</u>	17
3.1	Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit	17
3.2	Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax	28
3.3	Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke	41
4	<u>Studiengänge, Berufstätigkeit und Erwerb akademischer Grade des Promovenden</u>	53
5	<u>Bisherige wissenschaftliche Tätigkeiten des Promovenden</u>	54
6	<u>Selbständigkeitserklärung des Promovenden</u>	57
7	<u>Danksagung</u>	58

1 Zusammenfassung der Publikationspromotion

1.1 Abstract

Im Gegensatz zu klassischen univariaten Verfahren zur Analyse von Daten der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) erlaubt das multivariate Verfahren der Multivoxel-Muster-Analyse (MVMA) die simultane Berücksichtigung der Informationen mehrerer Bildpunkte. Somit ist das Verfahren sensitiv gegenüber Information, die in Aktivierungsmustern ausgeprägt ist, selbst dann, wenn statistische Unterschiede innerhalb einzelner Bildpunkte nicht beobachtet werden können.

Unter Ausnutzung dieser Eigenschaft der MVMA werden im Rahmen dieser Dissertation aktuell diskutierte Fragestellungen der humanen neurokognitiven Forschung in verschiedenen kognitiven Modalitäten adressiert: (1) Wird in nicht-topographisch organisierten frontalen Arealen des menschlichen Gehirns Information zum Ort der Aufmerksamkeit im visuellen Feld kodiert? (2) Ist Information über die Syntax eines verbalen Stimulus bereits in frühen auditiven kortikalen oder erst in höherrangigen kognitiven Arealen kodiert? (3) Welche Gehirnareale kodieren auch außerhalb des auditorischen Kortex die emotionale Kategorie einer prosodischen Äußerung?

Zur Klärung dieser Fragen wurden drei unabhängige Studien an 3-Tesla-Magnetresonanztomographen durchgeführt und die Daten mit Hilfe der MVMA ausgewertet. Im einzelnen wurden folgende Ergebnisse beobachtet: (1) Zusätzlich zu bereits bekannten topographisch organisierten parietalen und frontalen Arealen war erstmals Information über den Ort der visuellen Aufmerksamkeit im rechten mittleren frontalen Gyrus sowie dem rechten ventrolateralen präfrontalen Kortex nachweisbar. Dies unterstützt bestehende Theorien bezüglich eines „Filter“-Signals, das an der Steuerung der visuellen Aufmerksamkeit beteiligt ist. (2) Frühe auditorische Areale kodieren zwar für saliente perzeptuelle Eigenschaften von akustischen Stimuli, Informationen bezüglich der Syntax verbaler Äußerungen sind aber erst in höher-kognitiven und linkslateralisierten Arealen enthalten. (3) Mit Hilfe der MVMA ist in einem aus operculofrontalen und temporalen Strukturen bestehenden Netzwerk und damit auch in Arealen außerhalb des auditorischen Kortex der Nachweis von Information über den Emotionsgehalt perzipierter prosodischer Ausdrücke gelungen. Diese Ergebnisse bestätigen und untermauern bisherige Erkenntnisse zur Beteiligung operculofrontaler Strukturen an emotionaler Kommunikation.

Insgesamt belegen die vorgestellten Studien, daß im menschlichen Gehirn Informationen bezüglich der untersuchten experimentellen Bedingungen in lokalen Aktivierungsmustern kodiert sind. Die vorgelegten Arbeiten weisen somit das Verfahren der MVMA in Ergänzung zu klassischen Ansätzen als sensitive Methode zur Auswertung des Informationsgehalts humaner fMRT-Signale multipler kognitiver Modalitäten aus.

1.2 Einleitung

1.2.1 Funktionelle Magnetresonanztomographie und Multivoxel-Muster-Analyse

Die Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT; Ogawa et al., 1990; Bandettini et al., 1992; Kwong et al., 1992; Menon et al., 1992) wurde in den frühen neunziger Jahren erstmals publiziert und seitdem überaus erfolgreich angewandt. Dabei werden auf neuronale Aktivierungen folgende hämodynamische Veränderungen genutzt, um die Organisation des menschlichen Gehirns und die Lokalisierung von Funktionen nicht-invasiv zu erforschen (Logothetis, 2008). Bei der Analyse der gewonnenen Daten kommen klassischerweise univariate Analyseverfahren zum Einsatz, die auf dem Vergleich von Aktivierungszuständen bei unterschiedlichen kontrollierten Versuchsbedingungen beruhen (Friston et al., 1994, 1995). Statistische Vergleiche benachbarter 3-dimensionaler Bildpunkte der fMRT-Aufnahmen (Voxel) werden in diesen univariaten Verfahren unabhängig voneinander durchgeführt. Aktivierungen einer Bedingung werden dabei üblicherweise über die Probandengruppe hinweg gemittelt, und die Varianz innerhalb der Gruppe geht als Rauschen in die Statistik ein. Somit können diese Verfahren Evidenz für die *Beteiligung* einzelner Gehirnareale an verschiedenen kognitiven Prozessen liefern.

Im Gegensatz zu dieser klassischen Verfahrensweise ist der in dieser Arbeit verwendete und erst in jüngerer Vergangenheit entwickelte multivariate Ansatz der Multivoxel-Muster-Analyse (MVMA) auf den *Informationsgehalt* der Aktivierungszustände unterschiedlicher experimenteller Bedingungen ausgerichtet (Haxby et al., 2001; Cox und Savoy, 2003; Mitchell et al., 2003; Kamitani und Tong, 2005; Haynes und Rees, 2006; Kriegeskorte et al., 2006; Norman et al., 2006; O'Toole et al., 2007; Kay et al., 2008). Beobachtete individuelle Aktivierungsmuster dienen der Optimierung mathematischer Klassifikatoren, deren Generalisierbarkeit anschließend anhand äquivalenter aber unabhängiger Daten getestet wird. Kreuzvalidierung ermöglicht die Berechnung einer mittleren Prädiktionsgenauigkeit, die als Maß dafür angesehen werden kann, wieviel Information ein Aktivierungsmuster bezüglich der experimentellen Bedingungen trägt. In Kombination mit der sogenannten „Searchlight“-Methode (Kriegeskorte et al., 2006; Haynes et al., 2007) ist eine lokale Untersuchung auf den Informationsgehalt örtlich begrenzter Aktivierungsmuster im Gehirn möglich: Zu jedem im Gehirn befindlichen Bildpunkt werden zugehörige Aktivierungsmuster innerhalb eines definierten Radius zum Bildpunkt extrahiert und entsprechend ausgewertet. Dieses Verfahren ermöglicht somit die Errechnung der Prädiktionsgenauigkeit an einem bestimmten Ort, basierend auf der Bündelung von Information in der engsten Umgebung dieses Ortes. Dies entspricht der allgemein akzeptierten Theorie, daß sich das menschliche Gehirn in direkter Konsequenz einer lokalen Verarbeitung ähnlicher Information in funktionelle Areale unterteilt, die sich jeweils durch charakteristische Informationseingänge, -ausgänge sowie Verarbeitungsschritte auszeichnen („Prinzip der funktionellen Lokalisation“; z. B. Passingham et al., 2002). Begründet durch den multivariaten

Ansatz und der damit verbundenen räumlichen Informationsintegration über mehrere Bildpunkte hinweg liegt der Hauptvorteil dieser Methode in der Möglichkeit, Informationen bezüglich kognitiver Zustände nachweisen zu können, auch wenn Aktivierungsunterschiede univariat nicht nachhaltbar sind. Die MVMA ist somit ein informationsbasierter Ansatz zur Untersuchung neuronaler Repräsentationen, in dem örtlich benachbarte Information gebündelt wird. Die Sensitivität dieses Verfahrens wurde im Rahmen dieser Dissertation in mehreren Feldern der aktuellen neurokognitiven Forschung genutzt, um einen tieferen Einblick in die Funktionsweise des menschlichen Gehirns zu erlangen als es bisher mit klassischen univariaten Analyseverfahren möglich war. Dabei stand die Frage im Vordergrund, ob die Anwendung der MVMA auch über multiple kognitive Modalitäten hinweg einen Zugewinn an Sensitivität ermöglicht. Dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit drei kognitive Modalitäten, in die im folgenden eingeführt wird, exemplarisch ausgewählt und adressiert.

1.2.2 Kortikale Repräsentation von örtlicher visueller Aufmerksamkeit

Bisherige Studien deuten darauf hin, daß Steuersignale für die willentliche Ausrichtung visueller örtlicher Aufmerksamkeit in topographischen, sogenannten „attentionotopen“ Karten repräsentiert sind (Hagler und Sereno, 2006; Saygin und Sereno, 2008). Dabei ist eine Abnahme der Topographie von frühen zu späten visuellen Arealen zu erkennen. Unklar war allerdings bislang, ob die Eigenschaft einer topographischen Abbildung notwendiges Kriterium für die Kodierung visueller örtlicher Aufmerksamkeit darstellt. Daher könnten univariate Analyseverfahren möglicherweise nicht sensitiv genug gegenüber Arealen sein, die die Aufmerksamkeitsverteilung in hochdimensionaler Weise repräsentieren. In der vorliegenden Studie von Kalberlah und Kollegen (2011; im folgenden: Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“) wurden lokale Aktivierungsmuster bei willentlicher Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit dahingehend untersucht, ob sie Information bezüglich des Ortes der Aufmerksamkeit enthalten. Dabei wurde mit der MVMA ein informationsbasierter multivariater Ansatz verwendet, der über topographische Repräsentationen hinaus sensitiv ist.

1.2.3 Hierarchie der Repräsentation von Syntax

Bei der kortikalen Verarbeitung der Syntax verbaler Äußerungen deuten kontroverse Studien aus der jüngsten Vergangenheit auf eine Beteiligung von einerseits frühen sensorischen Arealen, dem (primär auditorischen Kortex (Dikker et al., 2009, 2010; Herrmann et al., 2009), andererseits ausschließlich höher-kognitiven Strukturen (Knösche et al., 1999; Friederici et al., 2000, 2003, 2010; Brauer und Friederici, 2007) hin. Eine abschließende Untersuchung des Informationsgehalts lokaler Aktivierungsmuster und Klärung der Anteile an der syntaktischen Verarbeitung konnten bisher nicht erreicht werden. In der vorliegenden Studie von Herrmann und Kollegen (2012; im folgenden: Studie

„Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax“) wurden daher mit Hilfe der MVMA die relevanten neuronalen Strukturen einerseits auf Informationen zu grundlegenden akustischen und andererseits syntaktischen Eigenschaften verbaler Äußerungen hin untersucht.

1.2.4 Neuronale Repräsentation von Emotion

Vokale Kommunikation (Lautsprache) ist ein fundamentaler Bestandteil zwischenmenschlicher Interaktion und ermöglicht den Austausch von Informationen. Dieser Austausch kann verbal oder non-verbal über prosodische Merkmale erfolgen. Bisherige Studien (Grandjean et al., 2005; Kotz et al., 2006; Schirmer und Kotz, 2006; Wildgruber et al., 2006; Beaucousin et al., 2007) konnten für ein frontotemporostriales neuronales Netzwerk erhöhte Aktivierungen für die Perzeption von emotionalen gegenüber neutralen prosodischen Stimuli zeigen. Ungeklärt blieb bislang, wie einzelne Emotionen verarbeitet und in Arealen dieses Netzwerks kodiert sind. Zwar untersuchte eine Studie mit Hilfe der multivariaten Mustererkennung die Information, die in Aktivitätsmustern über verschiedene Emotionen kodiert ist, beschränkte sich dabei aber auf den auditorischen Kortex (Ethofer et al., 2009). In der vorliegenden Studie von Kotz und Kollegen (2012; im folgenden: Studie „Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke“) wurden daher über den auditorischen Kortex hinaus die bekannten neuronalen Netzwerke auf lokale Aktivierungsmuster geprüft, die Informationen über den emotionalen Gehalt prosodischer Äußerungen tragen.

1.3 Zielstellung

Die vorliegende Arbeit verfolgt ein näheres Verständnis der neuronalen Basis kognitiver Prozesse beim Menschen. Unter Verwendung der MVMA zur Analyse von Daten aus unabhängigen fMRT-Experimenten, die exemplarisch drei Fragestellungen der aktuellen neurowissenschaftlichen Forschung in der visuellen sowie der auditiven Domäne adressieren, wird dabei betrachtet, ob über multiple kognitive Modalitäten hinweg ein Zugewinn an Sensitivität gegenüber univariaten Analysen erreicht werden kann. Auf der Grundlage der beobachteten Gehirnaktivität werden dazu Aussagen über den Informationsgehalt lokaler Aktivierungsmuster getroffen.

Zum einen wird durch die Verwendung des multivariaten Ansatzes in der Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“ ein näheres Verständnis über die kortikale Kodierung der Aufmerksamkeitsausrichtung auf bestimmte Orte im visuellen Feld angestrebt. Die Studie soll einen entscheidenden Beitrag leisten, Areale in sensiblerer Weise zu identifizieren, die an der Ausrichtung der Aufmerksamkeit maßgeblich beteiligt sind, und so das Gesamtbild über die Steuerung der visuellen örtlichen Aufmerksamkeit erweitern.

In der Studie „Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax“ wird die initiale kortikale Prozessierung der Syntax verbaler Äußerungen betrachtet. Durch die Untersuchung lokaler Aktivierungsmuster auf Information bezüglich einerseits grundlegender akustischer und andererseits syntaktischer Eigenschaften verbaler Äußerungen soll der Anteil früher sensorischer sowie höher-kognitiver Strukturen an der syntaktischen Verarbeitung geklärt werden.

In der Studie „Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke“ soll über den auditorischen Kortex hinaus die kortikale Kodierung von Emotion prosodischer vokaler Äußerungen untersucht werden. Der in dieser Studie verfolgte Ansatz ermöglicht mit der sogenannten „Searchlight“-Methode (Kriegeskorte et al., 2006) die Identifikation lokaler informativer Aktivitätsmuster ohne räumliche Beschränkungen oder Vorannahmen über das gesamte Gehirn hinweg. Gehirnareale werden nicht nur im Hinblick auf ihre Beteiligung an der Perzeption und Verarbeitung von Emotionen sondern bezüglich ihres Informationsgehalts über spezifische Emotionen untersucht. Die Erkenntnisse dieser Studie differenzieren somit das Verständnis über die Verarbeitung emotionaler kommunikativer Stimuli im menschlichen Gehirn.

1.4 Methodik

1.4.1 Studienteilnehmer

An den vorliegenden Studien nahmen insgesamt 69 Personen im Alter von 21 bis 33 Jahren teil (Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“: 24, davon 13 Frauen; Studie „Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax“: 25, davon 12 Frauen; Studie „Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke“: 20, davon 10 Frauen). Die Teilnehmer waren Muttersprachler des Deutschen, Rechtshänder und hatten normales oder auf Normalniveau korrigiertes Seh- sowie normales Hörvermögen. Die Studien waren von der zuständigen Ethikkommission bewilligt. Alle Studienteilnehmer erteilten vor Studienbeginn schriftlich ihr Einverständnis zu dem jeweiligen Experiment.

1.4.2 Magnetresonanztomographie

Alle bildgebenden Verfahren wurden an 3-Tesla-Magnetresonanztomographen durchgeführt (Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“ sowie Studie „Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax“: Siemens TRIO Scanner, Erlangen, Deutschland; Studie „Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke“: Medspec 30/100/Bruker, Ettlingen, Deutschland). Dabei kamen standardmäßig genutzte T1-gewichtete MPRAGE (magnetization prepared rapid gradient echo) sowie T2*-gewichtete EPI (echo planar imaging) Sequenzen zur anatomischen beziehungsweise funktionellen Bildgebung des Gehirns zur Anwendung. Die funktionellen Aufnahmen hatten eine

effektive isotrope Auflösung von 3 mm und Repetitionszeiten (TR) zwischen 2 und 3 s (Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“: 42 Schichten, 64x64-Matrix mit 3x3 mm² Auflösung, 2 mm Schichtdicke mit 50 % Abstand, TE 30 ms, TR 2,8 s; Studie „Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax“: 30 Schichten, 64x64-Matrix mit 3x3 mm² Auflösung, 2 mm Schichtdicke mit 50 % Abstand, TE 30 ms, TR 2 s; Studie „Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke“: 18 Schichten, 64x64-Matrix mit 3x3 mm² Auflösung, 2 mm Schichtdicke mit 50 % Abstand, TE 30 ms, TR 2 s).

1.4.3 Searchlight-basierte Multivoxel-Muster-Analyse

Zur Kartierung des Informationsgehalts lokaler kortikaler Aktivierungsmuster wurde das multivariate Verfahren der MVMA (Haynes und Rees 2006) in Kombination mit der „Searchlight“-Technik (Kriegeskorte et al., 2006; Haynes et al., 2007) angewandt. Für dieses Verfahren wird zunächst für jeden einzelnen Bildpunkt einer funktionellen Messung ein Extraktionsbereich („Searchlight“) als Kugel mit Radius r um den betrachteten Bildpunkt v_0 definiert, der die Untermenge aller n Bildpunkte v_x enthält, die vom Mittelpunkt v_0 den Abstand d mit $d < r$ aufweisen (Abbildung 1a). Für diese Bildpunktuntermenge werden die zugehörigen Aktivitätswerte bezüglich jeder Experimentalbedingung (z. B. Ort der Aufmerksamkeit oder Emotion der prosodischen Stimuli) als 1-dimensionaler Vektor der Länge n (n : Anzahl der Bildpunkte im Extraktionsbereich) extrahiert (Abbildung 1b). Diese aus mehreren unabhängigen Messungen ermittelten und als Datenpunkte in einem n -dimensionalen Raum interpretierbaren Vektoren dienen zusammen mit ihrer jeweiligen Klassenzugehörigkeit (Experimentalbedingung) dem Training von Support-Vector-Machines (SVM; Abbildung 1c). SVM sind mathematische Klassifikatoren, die Mengen von Datenpunkten in einem n -dimensionalen Raum so in Klassen unterteilen, daß um die Klassengrenzen herum ein möglichst großer Bereich von Datenpunkten frei bleibt („Large Margin Classifiers“; Pereira et al., 2009). In dem erweiterten Ansatz des „Soft Margin Classifiers“ sind zudem Fehlklassifikationen erlaubt, die allerdings im Optimierungsverfahren bestraft werden (Cortes und Vapnik, 1995). Die trainierte SVM wird anschließend durch Klassifikation weiterer unabhängiger, also in separierten Messungen erhaltenen und nicht zum Training verwendeter Daten auf die Klassifikationsgüte hin getestet (Abbildung 1d). Erhält ein einzelner Datenpunkt durch die trainierte SVM die korrekte Klassenzuweisung, wird die Güte für diese Klassifikation mit 1, sonst mit 0 bewertet. Wiederholte Testungen jeweils unabhängiger Daten durch Kreuzvalidierung erlauben die Berechnung einer mittleren Klassifikationsgüte, die widerspiegelt, wieviel Information das lokale Aktivierungsmuster bezüglich der Experimentalbedingungen trägt. Für die weitere statistische Analyse wird dieser Wert dem Mittelpunkt des Extraktionsbereichs v_0 zugeordnet. Nach Wiederholung dieses Verfahrens für jeden dem Gehirn zugehörigen Bildpunkt der funktionellen Messung erhält man somit Karten des Gehirns, die den Informationsgehalt örtlicher Aktivierungsmuster widerspiegeln. Diese

probandenspezifischen Karten können durch statistische Testung gegen Zufallsniveau (Güte bei zufälliger Klassifikation der Testdaten) ausgewertet werden und somit Aufschluß über informative Gehirnareale geben.

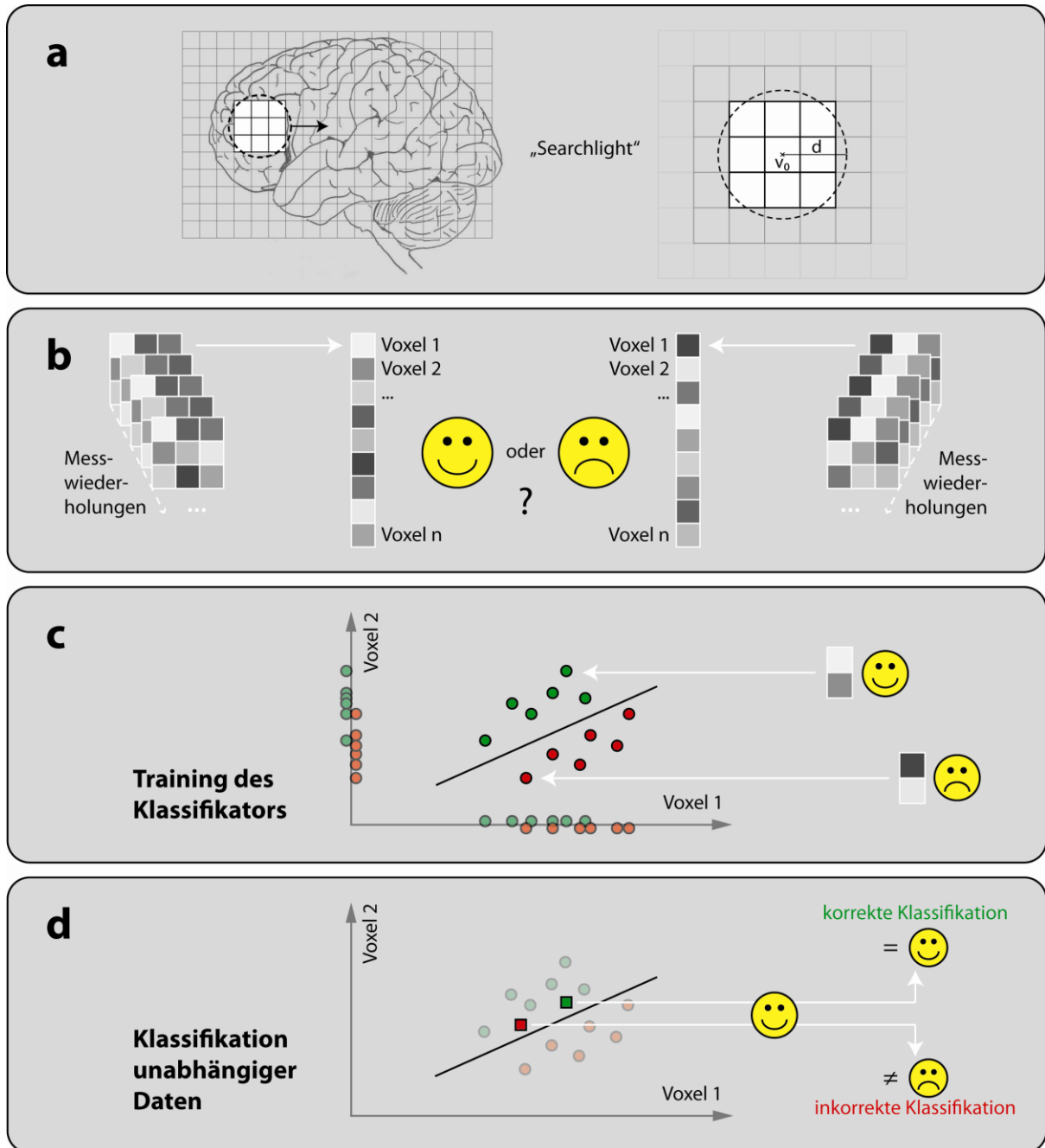


Abbildung 1: Multivoxel-Muster-Analyse (MVMA). (a) Illustration eines „Searchlight“ definiert durch den Abstand d um einen Voxel v_0 . (b) Transformation der Messwerte in 1-dimensionale Vektoren der Länge n (n : Anzahl der Bildpunkte im „Searchlight“). (c) Training des linearen Klassifikators als vereinfachte Darstellung im 2-dimensionalen statt n -dimensionalen Raum. (d) Klassifikation unabhängiger Daten und Erfolgsbewertung durch Vergleich mit tatsächlicher Klassenzugehörigkeit.

Zusätzlich zur MVMA kamen in der Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“ die Techniken der Segmentierung und des kortikalen „Flattenings“ („virtuelle Einebnung“ des Kortex) zum Einsatz, um Sensitivität und Ortsspezifität des Verfahrens zu optimieren (Dale et al., 1999; Fischl et al., 1999a, b; Chen et al., 2010).

1.5 Ergebnisse

Mit Hilfe der MVMA konnten zu den wissenschaftlichen Fragestellungen dieser Arbeit folgende Ergebnisse erzielt werden:

Die Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“ reproduziert zunächst bereits vorliegende Ergebnisse zu einem bilateral organisierten, topographisch strukturierten parietofrontalen Netzwerk, das Strukturen wie die intraparietalen Sulci, die frontalen Augenfelder sowie die dorsolateralen präfrontalen Kortices umfaßt. Darüber hinaus lassen sich zwei weitere Areale, der rechte mittlere frontale Gyrus (MFG) sowie der rechte ventrolaterale präfrontale Kortex (VLPFK), nachweisen, die Informationen über den Ort der visuellen Aufmerksamkeit enthalten. Die informativen Areale wurden zudem bezüglich der präferierten Richtung der Aufmerksamkeitsausrichtung im visuellen Feld untersucht. Von den sensorischen hin zu den hierarchisch höher liegenden Arealen ist dabei einerseits ein Verlust der topographischen Kodierung, also einer wohlgeordneten Repräsentation des visuellen Feldes, ersichtlich. Andererseits werden zusätzlich zu den kontralateralen Repräsentationen in den sensorischen Arealen zunehmend ipsilaterale Anteile des Gesichtsfeldes in hierarchisch höher liegenden Strukturen kodiert.

In der Studie „Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax“ konnte in einem neuronalen Netzwerk, bestehend aus dem linken inferioren frontalen Gyrus (IFG), dem linken anterioren superioren temporalen Gyrus (STG), dem linken superioren temporalen Sulcus (STS) und dem rechten STS/STG, syntaktische Information nachgewiesen werden. Dabei stellten sich die linksseitigen Regionen im IFG, anterioren STG und STS als spezifischer für die Syntax als die rechtsseitigen Regionen dar. Auditorisch-sensorische Areale im temporalen Kortex waren ausschließlich für saliente perzeptuelle Unterschiede der Stimuli sensitiv.

Der emotionale Gehalt vokaler prosodischer Äußerungen konnte in der Studie „Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke“ in einem Netzwerk, bestehend aus rechtsseitigen operculofrontalen und temporalen sowie linksseitigen zerebellaren und temporalen Strukturen, nachgewiesen werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, daß die verschiedenen Emotionen in diesem gemeinsamen Netzwerk durch unterschiedliche Aktivierungsmuster enkodiert sind. In rechten inferioren frontalen Regionen hingegen konnten zudem Spezialisierungen für die Kodierung einzelner spezifischer Emotionen festgestellt werden.

1.6 Diskussion

In mehreren exemplarisch ausgewählten Feldern der aktuellen neurokognitiven Forschung wurde im Rahmen dieser Arbeit geprüft, ob unter Ausnutzung des sensitiven Verfahrens der MVMA zur Auswertung humaner fMRT-Daten tiefere Einblicke in die Funktionsweise des menschlichen Gehirns erlangt werden können als es bisher mit klassischen Analyseverfahren möglich war.

1.6.1 *Kodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit in Aktivierungsmustern*

In der Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“ konnte erfolgreich Information über den Ort der Aufmerksamkeit im visuellen Feld in weiten Bereichen der okzipitalen, parietalen und frontalen Lobi detektiert werden. Die bekannte topographische Struktur der Informationsabbildungen in den okzipitalen und parietalen Lobi konnte dabei bestätigt werden (Serenio et al., 1995, 2001; Silver et al., 2005; Hagler und Serenio, 2006; Jack et al., 2007; Saygin und Serenio, 2008). Darüber hinaus konnte erstmals Information in zwei frontalen Arealen, dem rechten MFG und dem rechten VLPFK, detektiert werden, die bisher nicht mit der willentlichen Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit in Verbindung gebracht wurden (Corbetta und Shulman, 2002; Corbetta et al., 2008). Analysen zur Sensitivität für verschiedene Orte der Aufmerksamkeitsausrichtung zeigen keine geordnete topographische Kodierung in diesen Regionen. Diese Ergebnisse lassen vermuten, daß hier die Informationen möglicherweise in lokalen Aktivierungsmustern repräsentiert und somit nur unter gemeinsamer Berücksichtigung mehrere Bildpunkte der funktionellen Aufnahmen beobachtbar sind. Zudem sind diese unilateralen frontalen im Gegensatz zu frühen sensorischen Arealen nicht nur für Ausrichtungen auf das kontralaterale sondern auf das gesamte Gesichtsfeld sensitiv. Unter Berücksichtigung der aktuellen Literatur läßt sich die Hypothese aufstellen, daß es sich bei der örtlichen Information, die im rechten MFG sowie im rechten VLPFC identifiziert werden konnte, um ein sogenanntes „Filter“-Signal handelt, das die Abwendung vom aktuell attendierten und aufgabenrelevanten Ort zu unterdrücken vermag (Corbetta et al., 2008). Diese Hypothese beschreibt erstmals die Zusammenführung der Ortsinformationen der willentlichen und der reizgetriebenen Aufmerksamkeit in diesen beiden frontalen Arealen.

1.6.2 *Funktionelle Dissoziation in der Kodierung von akustischen Merkmalen und Syntax*

In der Studie „Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax“ konnte mit Hilfe der MVMA eine mit klassischen Analyseverfahren bisher nicht klar ersichtliche Spezifizierung höher-kognitiver Areale auf die Kodierung von syntaktischen Eigenschaften von verbalen Stimuli nachgewiesen werden. Informationen über akustische Eigenschaften in frühen auditorischen Arealen sowie Informationen über syntaktische Eigenschaften in höher-kognitiven Arealen konnten also funktional dissoziiert identifiziert werden. Dabei bestätigen die Ergebnisse bisherige Erkenntnisse zur

asymmetrischen Verarbeitung von Grammatik (Friederici, 2002; Friederici und Kotz, 2003). Diese Linkslateralität der kodierten syntaktischen Information konnte mit Hilfe der MVMA, jedoch nicht anhand klassischer Analyseverfahren, spezifiziert werden. Damit unterstreicht diese Studie die Sensitivität der MVMA und die Bedeutung dieser multivariaten Methodik für die kognitiven Neurowissenschaften.

1.6.3 Neuronales Netzwerk zur Kategorisierung von Emotion

In der Studie „Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke“ konnten erstmals auch außerhalb des temporalen Kortex Areale identifiziert werden, die Information über den emotionalen Gehalt vokaler prosodischer Äußerungen kodieren. Die Ergebnisse zeigen, daß die emotionale Kategorisierung prosodischer Ausdrücke auf einem breiten Netzwerk von neuronalen Arealen beruht, das auch zur Entschlüsselung komplexer emotionaler Stimuli beiträgt. So sind die einzelnen beteiligten Komponenten bereits im Zusammenhang mit der Kodierung von suprasegmentalen („lautübergreifenden“) Eigenschaften wie z. B. Prosodie und Intonation bekannt (rechter STS und STG; Grandjean et al., 2005; Kotz et al., 2006; Schirmer und Kotz, 2006; Wildgruber et al., 2006) und auch an emotionaler Kommunikation (inferiores Operculum ; siehe z. B. Wicker et al., 2003) oder der Silbensequenzierung beteiligt (linksseitige temporale Regionen; z. B. Lieenthal et al., 2005; Desai et al., 2008). Damit untermauern die erhaltenen Ergebnisse bisherige Theorien zur Verarbeitung vokaler emotionaler Ausdrücke und erweitern das bisherige Wissensspektrum im Forschungsfeld der sozialen Kommunikation durch erstmalige Identifikation eines neuronalen Netzwerkes, das Informationen über spezifische Emotionen trägt und über den temporalen Kortex hinausgeht.

1.6.4 MVMA als sensitive Methode zur Analyse von Daten humaner fMRT

Die drei exemplarisch ausgewählten und unabhängig durchgeführten Studien zeigen, daß die MVMA als Ergänzung zu klassischen Analyseverfahren für Daten der humanen fMRT in den unterschiedlichsten neurokognitiven Forschungszweigen einen wichtigen Beitrag durch erhöhte Sensitivität leisten kann. Jede der drei vorgestellten Studien beantwortet bisher ungeklärte wissenschaftliche Fragestellungen und trägt damit zur neurokognitiven Grundlagenforschung der jeweiligen Disziplin bei. Die gewonnenen Erkenntnisse sind auch von Bedeutung für den klinischen Kontext, da sie potentiell zur Klärung von Zusammenhängen zwischen Läsionen in den beschriebenen Gehirnarealen und begleitenden Kommunikations- oder Aufmerksamkeitsdefiziten beitragen. Die Methode der MVMA kann darüber hinaus in longitudinalen Studien zu Vorgängen der neuronalen Plastizität neue Erkenntnisse ermöglichen, indem Veränderungen der kodierten Information örtlich und zeitlich beobachtet werden. Außerdem ist die Begleitung der Rehabilitation durch die Methode

der MVMA vorstellbar, indem Rehabilitationsmaßnahmen auf ihren Nutzen hin verglichen und verbessert werden.

Trotz der zahlreichen Erfolge, die die Methodik der MVMA in ihrer kurzen Geschichte bereits verbuchen kann, gilt es in Zukunft aber, die Verbindung vom informativen Muster der fMRT-Aktivierung zu der zugrundeliegenden neuronalen Repräsentation eines kognitiven Zustands herzustellen. Zwar sprechen die Erkenntnisse der vorgelegten Studien für eine erhöhte Sensitivität der MVMA gegenüber Repräsentationen, die arealweit und nicht klar topographisch strukturiert sind (z. B. Studie „Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit“). Allerdings muß dabei berücksichtigt werden, daß das fMRT-Signal nur ein indirektes Maß für die zugrundeliegende neuronale Aktivierung darstellt (Logothetis, 2008). Daher wird in den kommenden Jahren für das gesamte Feld der Kognitions- und Neurowissenschaften die Erforschung der physiologischen Grundlagen des fMRT-Signals von herausragendem Interesse sein. Insgesamt eröffnet die MVMA neue Möglichkeiten mit bisher nicht erreichter Sensitivität für die inhaltsbasierte Erforschung humaner Gehirnfunktionen.

1.7 Literatur

Bandettini PA, Wong EC, Hinks RS, Tiukofsky RS, Hyde JS (1992). Time course EPI of human brain function during task activation. *Magn Reson Med* 25(2), 390-397.

Beaucousin V, Lacheret A, Turbelin MR, Morel M, Mazoyer B, Tzourio-Mazoyer N (2007). FMRI study of emotional speech comprehension. *Cereb Cortex* 17, 339-352.

Brauer J, Friederici AD (2007). Functional neural networks of semantic and syntactic processes in the developing brain. *J Cogn Neurosci* 19, 1609-1623.

Chen Y, Namburi P, Elliott LT, Heinzle J, Soon CS, Chee MW, Haynes JD (2010). Cortical surface-based searchlight decoding. *Neuroimage* 56(2), 582-92.

Corbetta M, Patel G, Shulman GL (2008). The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind. *Neuron* 58, 306-324.

Corbetta M, Shulman GL (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat Rev Neurosci* 3, 201-215.

Cortes C, Vapnik VN (1995). Support-Vector Networks. *Mach Learn* 20, 273-297.

Cox DD, Savoy RL (2003). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) "brain reading": detecting and classifying distributed patterns of fMRI activity in human visual cortex. *Neuroimage* 19, 261-270.

- Dale AM, Fischl B, Sereno MI (1999). Cortical surface-based analysis, I. Segmentation and surface reconstruction. *Neuroimage* 9, 179-194.
- Desai R, Liebenthal E, Waldron E, Binder JF (2008). Left posterior temporal regions are sensitive to auditory categorization. *J Cogn Neurosci* 20, 1174-1188.
- Dikker S, Rabagliati H, Pykkänen L (2009). Sensitivity to syntax in visual cortex. *Cognition* 110, 293-321.
- Dikker S, Rabagliati H, Farmer TA, Pykkänen L (2010). Early occipital sensitivity to syntactic category is based on form typicality. *Psychol Sci* 21, 629-634.
- Ethofer T, Van De Ville D, Scherer K, Vuilleumier P (2009). Decoding of emotional information in voice-sensitive cortices. *Curr Biol* 19, 1028-1033.
- Fischl B, Sereno MI, Dale AM (1999a). Cortical surface-based analysis, II. Inflation, flattening, and a surface-based coordinated system. *Neuroimage* 9, 195-207.
- Fischl B, Sereno MI, Tootell RB, Dale AM (1999b). High-resolution intersubject averaging and a coordinate system for the cortical surface. *Hum Brain Mapp* 8, 272-284.
- Friederici AD (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cogn Sci* 6, 78-84.
- Friederici AD, Kotz SA (2003). The brain basis of syntactic processes: Functional imaging and lesion studies. *NeuroImage* 20, 8-17.
- Friederici AD, Wang Y, Herrmann CS, Maess B, Oertel U (2000). Localization of early syntactic processes in frontal and temporal cortical areas: A magnetoencephalographic study. *Hum Brain Mapp* 11, 1-11.
- Friederici AD, Rüschemeyer SA, Hahne A, Fiebach CJ (2003). The role of left inferior frontal and superior temporal cortex in sentence comprehension: Localizing syntactic and semantic processes. *Cereb Cortex* 13, 170-177.
- Friederici AD, Kotz SA, Scott SK, Obleser J (2010). Disentangling syntax and intelligibility in auditory language comprehension. *Hum Brain Mapp* 31, 448-457.
- Friston KJ, Jezzard PJ, Turner R (1994). Analysis of functional MRI time-series. *Hum Brain Mapp* 1, 153-171.
- Friston KJ, Holmes AP, Worsley KJ, Poline J-P, Frith CD, Frackowiak RSJ (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Hum Brain Mapp* 2, 189-210.

- Grandjean D, Sander D, Pourtois G, Schwartz S, Seghier ML, Scherer KR, Vuilleumier P (2005). The voices of wrath: Brain responses to angry prosody in meaningless speech. *Nat Neurosci* 8, 145-146.
- Hagler Jr DJ, Sereno MI (2006). Spatial maps in frontal and parietal cortex. *Neuroimage* 29, 567-577.
- Haxby JV, Gobbini MI, Furey ML, Ishai A, Schouten JL, Pietrini P (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science* 293(5539), 2425-30.
- Haynes JD, Rees G (2006). Decoding mental states from brain activity in human. *Nat Rev Neurosci* 7, 523-534.
- Haynes JD, Sakai K, Rees G, Gilbert S, Frith C, Passingham RE (2007). Reading hidden intentions in the human brain. *Curr Biol* 17(4), 323-328.
- Herrmann B, Maess B, Hasting AS, Friederici AD (2009). Localization of the syntactic mismatch negativity in the temporal cortex: An MEG study. *NeuroImage* 48, 590600.
- Herrmann B, Obleser J, Kalberlah C, Haynes JD, Friederici AD (2012). Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging. *Hum Brain Mapp* 33(3), 584-95.
- Jack AI, Patel GH, Astafiev SV, Snyder AZ, Akbudak E, Shulman GL, Corbetta M (2007). Changing human visual field organization from early visual to extra-occipital cortex. *PLoS One* 2, e452.
- Kalberlah C, Chen Y, Heinzle J, Haynes JD (2011). Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex. *Int J Imag Syst Technol* 21(2), 201-210.
- Kamitani Y, Tong F (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. *Nat Neurosci* 8(5), 679-685.
- Kay KN, Naselaris T, Prenger RJ, Gallant JL (2008). Identifying natural images from human brain activity. *Nature* 452(7185), 352-355.
- Knösche TR, Maess B, Friederici AD (1999). Processing of syntactic information monitored by brain surface current density mapping based on MEG. *Brain Topogr* 12, 75-87.
- Kotz SA, Meyer M, Paulmann S (2006). Lateralization of emotional prosody in the brain: An overview and synopsis on the impact of study design. *Prog Brain Res* 156, 285-294.
- Kotz SA, Kalberlah C, Bahlmann J, Friederici AD, Haynes JD (2012). Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain. *Hum Brain Mapp*, in print, doi: 10.1002/hbm.22041.

Kriegeskorte N, Goebel R, Bandettini P (2006). Information-based functional brain mapping. *Proc Natl Acad Sci USA* 103(10), 3863-3868.

Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, Goldberg IE, Weisskoff RM, Poncelet BP, Kennedy DN, Hoppel BE, Cohen MS, Turner R, et al. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc Natl Acad Sci USA* 89(12), 5675-5679.

Liebenthal E, Binder JR, Spitzer SM, Possing ET, Medler DA (2005). Neural substrates of phonemic perception. *Cereb Cortex* 15, 1621–1631.

Logothetis NK (2008). What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature* 453(7197), 869-878.

Menon RS, Ogawa S, Kim SG, Ellermann JM, Merkle H, Tank DW, Ugurbil K (1992). Functional brain mapping using magnetic resonance imaging, Signal changes accompanying visual stimulation. *Invest Radiol* 27 Suppl 2, S47-53.

Mitchell TM, Hutchinson R, Just MA, Niculescu RS, Pereira F, Wang X (2003). Classifying instantaneous cognitive states from FMRI data. *AMIA Annu Symp Proc* 2003, 465-469.

Norman KA, Polyn SM, Detre GJ, Haxby JV (2006). Beyond mind-reading: multi-voxel pattern analysis of fMRI data. *Trends Cogn Sci* 10, 424-430.

Ogawa S, Lee TM, Kay AR, Tank DW (1990). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci USA* 87(24), 9868-9872.

O'Toole AJ, Jiang F, Abdi H, Pénard N, Dunlop JP, Parent MA (2007). Theoretical, statistical, and practical perspectives on pattern-based classification approaches to the analysis of functional neuroimaging data. *J Cogn Neurosci* 19(11), 1735-52.

Passingham RE, Stephan KE, Kötter R (2002). The anatomical basis of functional localization in the cortex. *Nat Rev Neurosci* 3(8), 606-616.

Pereira F, Mitchell T, Botvinick M (2009). Machine learning classifiers and fMRI: a tutorial overview. *Neuroimage* 45, S199-S209.

Saygin AP, Sereno MI (2008). Retinotopy and attention in human occipital, temporal, parietal, and frontal cortex. *Cereb Cortex* 18, 2158-2168.

Schirmer A, Kotz SA (2006). Beyond the right hemisphere: Brain mechanisms mediating vocal emotional processing. *Trends Cogn Sci* 10, 24-30.

Sereno MI, Dale AM, Reppas JB, Kwong KK, Belliveau JW, Brady TJ, Rosen BR, Tootell RB (1995). Borders of multiple human visual areas in humans revealed by functional magnetic resonance imaging, *Science* 268, 889-893.

Sereno MI, Pitzalis S, Martinez A (2001). Mapping of contralateral space in retinotopic coordinates by a parietal cortical area in humans. *Science* 294, 1350-1354.

Silver MA, Ress D, Heeger DJ (2005). Topographic maps of visual spatial attention in human parietal cortex. *J Neurophysiol* 94, 1358-1371.

Wicker B, Keysers C, Plailly J, Royet JP, Gallese V, Rizzolatti G (2003). Both of us disgusted in my insula: The common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron* 40, 655-664.

Wildgruber D, Ackermann H, Kreifelts B, Ethofer T (2006). Cerebral processing of linguistic and emotional prosody: fMRI studies. *Prog Brain Res* 156, 249-268.

2 Anteilerklärung zu den vorgelegten Publikationen

Der Promovend, Christian Kalberlah, hatte folgenden Anteil an den vorgelegten Publikationen:

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

Anteil des Promovenden: 90 %

Beiträge im einzelnen: Planung des Experiments (90 %), Realisierung und Durchführung des Experiments (90 %), Datenanalyse (90 %), Verfassen des Manuskripts (90 %), Bearbeitung und Korrekturen im Reviewverfahren (90 %)

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print, doi: 10.1002/hbm.22041.

Anteil des Promovenden: 35 %

Beiträge im einzelnen: Planung des Experiments (20 %), Datenanalyse (50 %), Verfassen des Manuskripts (20 %), Bearbeitung und Korrekturen im Review-Verfahren (50 %)

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

Anteil des Promovenden: 15 %

Beiträge im einzelnen: Planung des Experiments (20 %), Datenanalyse (10 %), Verfassen des Manuskripts (10 %), Bearbeitung und Korrekturen im Review-Verfahren (20 %)

Leipzig, den _____

(Christian Kalberlah)

Berlin, den _____

(John-Dylan Haynes)

3 Der Dissertationsschrift zugrundeliegende wissenschaftliche Publikationen

3.1 Dekodierung örtlicher visueller Aufmerksamkeit

Christian Kalberlah ^{1, 2}, Yi Chen ^{1, 2}, Jakob Heinzle ², John-Dylan Haynes ^{1, 2, 3} (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

- 1 Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Forschungsgruppe „Attention and Awareness“, Leipzig, Deutschland
- 2 Bernstein Center for Computational Neuroscience, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland
- 3 Graduate School of Mind and Brain, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland

Impact Factor des Journals:

0,779

(Stand Sept. 2012; Quelle: <http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291098-1098>)

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Christian Kalberlah, Yi Chen, Jakob Heinzle, John-Dylan Haynes (2011). **Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex.** *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

hier nicht aufgeführt.

3.2 Dekodierung von auditorischer Perzeption und Syntax

Björn Herrmann ^{1, 2}, Jonas Obleser ², Christian Kalberlah ^{3, 4}, John-Dylan Haynes ^{3, 4, 5}, Angela D. Friederici ^{2, 5} (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

- 1 Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, MEG Forschungsgruppe, Bennewitz, Deutschland
- 2 Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Abteilung für Neuropsychologie, Leipzig, Deutschland
- 3 Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Forschungsgruppe „Attention and Awareness“, Leipzig, Deutschland
- 4 Bernstein Center for Computational Neuroscience, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland
- 5 Graduate School of Mind and Brain, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland

Impact Factor des Journals

5,88

(Stand Sept. 2012; Quelle: <http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291097-0193>)

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Björn Herrmann, Jonas Obleser, Christian Kalberlah, John-Dylan Haynes, Angela D. Friederici (2012). **Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging.** *Human Brain Mapping* 33(3), 584-95. doi: 10.1002/hbm.21235.

hier nicht aufgeführt.

3.3. Prädiktion vokaler emotionaler Ausdrücke

Sonja A. Kotz^{1,*}, Christian Kalberlah^{2,3,*}, Jörg Bahlmann^{4,5,*}, Angela D. Friederici^{4,6}, John-Dylan Haynes^{2,3,6} (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

* Die Autoren trugen zu gleichen Teilen zur Studie bei.

- 1 Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Minerva-Forschungsgruppe „Neurocognition of Rhythm in Communication“, Leipzig, Deutschland
- 2 Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Forschungsgruppe „Attention and Awareness“, Leipzig, Deutschland
- 3 Bernstein Center for Computational Neuroscience, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland
- 4 Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Abteilung für Neuropsychologie, Leipzig, Deutschland
- 5 Helen Wills Neuroscience Institute, University of California, Berkeley, Kalifornien
- 6 Graduate School of Mind and Brain, Humboldt-Universität, Berlin, Deutschland

Impact Factor des Journals

5,88

(Stand Sept. 2012; Quelle: <http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291097-0193>)

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

Um Veröffentlichungsrechte nicht zu verletzen, wird die Publikation

Sonja A. Kotz, Christian Kalberlah, Jörg Bahlmann, Angela D. Friederici, John-Dylan Haynes (2012). **Predicting Vocal Emotion Expressions from the Human Brain.** *Human Brain Mapping*, in print. doi: 10.1002/hbm.22041.

hier nicht aufgeführt.

4 Studiengänge, Berufstätigkeit und Erwerb akademischer Grade des Promovenden

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

5 Bisherige wissenschaftliche Tätigkeiten des Promovenden

Publikationen

Im Review

Kalberlah C, Villringer A, Pleger B (im Review). Serial processing of tactile vibratory stimuli in the human somatosensory cortex.

2012

Heinzle J, Anders S, Bode S, Bogler C, Chen Y, Cichy RM, Hackmack K, Kahnt T, Kalberlah C, Reverberi C, Soon CS, Tusche A, Weybandt M, Haynes JD (2012). Multivariate decoding of MRI data: Towards a content-based cognitive neuroscience. *e-Neuroforum* 3(1), 1-16. doi: 10.1007/s13295-012-0026-9.

Herrmann B, Maess B, Kalberlah C, Haynes JD, Friederici AD (2012). Auditory perception and syntactic cognition: Brain activity-based decoding within and across subjects. *European Journal of Neuroscience*, digitale Publikation vor Drucklegung. doi: 10.1111/j.1460-9568.2012.08053.x.

Herrmann B, Obleser J, Kalberlah C, Haynes JD, Friederici AD (2012). Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging. *Human Brain Mapping* 33(3), 584-595. doi: 10.1002/hbm.21235.

Kotz SA, Kalberlah C, Bahlmann J, Friederici AD, Haynes JD (2012). Predicting vocal emotion expressions from the human brain. *Human Brain Mapping*, digitale Publikation vor Drucklegung. doi: 10.1002/hbm.22041.

2011

Kalberlah C, Chen Y, Heinzle J, Haynes JD (2011). Beyond topographic representation: Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex. *International Journal of Imaging Systems and Technology* 21(2), 201-210. doi: 10.1002/ima.20278.

2009

Kalberlah C, Distler C, Hoffmann KP (2009). Sensitivity to relative disparity in early visual cortex of pigmented and albino ferrets. *Experimental Brain Research* 192, 379-389. doi: 10.1007/s00221-008-1545-z.

2006

Kalberlah C (2006). Neurobiologische Grundlagen der Tiefenwahrnehmung beim Frettchen (*Mustela putorius furo*). Thesis, Fakultät für Biologie der Ruhr-Universität Bochum.

Vorträge

2008

Kalberlah C, Haynes JD (2008). Dekodierung von Kontrollsignalen für visuell-räumliche Aufmerksamkeit aus dem ventralen präfrontalen Kortex. 50. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP), Marburg, Deutschland.

Kalberlah C, Haynes JD (2008). Multivariate pattern classification reveals control regions for visual spatial attention in prefrontal cortex. Neuroscience 2008, Washington D.C., USA.

Poster

2012

Kalberlah C, Villringer A, Pleger B (2012). Serial Processing of Tactile Vibratory Stimulus Location and Frequency in Human Somatosensory Cortex. 18th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Beijing, China.

2011

Herrmann B, Obleser J, Kalberlah C, Haynes JD, Friederici AD (2011). Decoding perception and grammar: An auditory fMRI study. Cognitive Neuroscience Society Meeting, San Francisco, Kalifornien, USA.

Kalberlah C, Chen Y, Heinzle J, Haynes JD (2011). Decoding visuospatial attention from local activity patterns in the human frontal cortex. 17th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Quebec Stadt, Kanada.

Thiel SD, Nierhaus T, Preusser S, Kalberlah C, Neumann J, Nikulin V, van der Meer E, Villringer A, Pleger B (2011). The neurophysiology of spatial somatosensory decision making in humans. 17th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Quebec Stadt, Kanada.

2010

Kalberlah C, Chen Y, Haynes JD (2010). Attentional topographic maps revealed in cortical population vectors during randomized covert shifts of visual attention. Neuroscience 2010, San Diego, Kalifornien, USA.

2008

Kalberlah C, Haynes JD (2008). Decoding control signals for visual spatial attention from ventral prefrontal cortex. International Congress of Psychology, Berlin, Deutschland.

2007

Kalberlah C, Haynes JD (2007). Pattern classification reveals control regions for visual attention in prefrontal cortex. 13th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Chicago, Illinois, USA.

Kalberlah C, Haynes JD (2007). Pattern classification reveals control signals for visual attention in parietal and prefrontal cortex. 3rd Bernstein Symposium for Computational Neuroscience, Göttingen, Deutschland.

6 Selbständigkeitserklärung des Promovenden

Ich, Christian Kalberlah, erkläre, daß ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema *Multivariate „Searchlight“-Musterklassifizierung humaner fMRT-Signale in multiplen kognitiven Modalitäten: Emotion, Syntax und visuelle Aufmerksamkeit* selbst und ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfaßt habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt.

Leipzig, den _____

(Christian Kalberlah)

7 Danksagung

Für die Möglichkeit der Promotion über das vorgelegte Thema danke ich meinem Doktorvater Prof. John-Dylan Haynes. Ich blicke auf eine spannende und prägende Zeit in und mit seiner Arbeitsgruppe „Attention and Awareness“ am MPI in Leipzig zurück, für die ich der gesamten Gruppe dankbar bin.

Dieses Forschungsvorhaben wäre nicht ohne die vielen Menschen möglich gewesen, die die nötige Infrastruktur geschaffen haben – angefangen bei technischer Beratung und Betreuung, über bereichernde kollegiale und wissenschaftliche Kontakte bis hin zu vielseitiger Unterstützung vom Berliner BCCN. Auch ohne namentliche Nennung sei den sich gewißlich wiedererkennenden Personen hiermit herzlich Dank gesagt.

In den letzten Jahren ist nicht nur diese Dissertation sondern auch meine mich immer unterstützende und stärkende Familie gewachsen. Ganz besondere Dankbarkeit empfinde ich für meine Frau und meine Söhne, denen ich diese Schrift widme.

Christian Kalberlah

Leipzig, den 22. Oktober 2012