

Aus dem Bereich Neuroradiologie

Direktor: Prof. Dr. med. Wolfgang Reith

Fakultät 2: Klinische Medizin

der Universität des Saarlandes, Homburg / Saar

**Nachweis von Unterschieden in der neuronalen Aktivierung des Gehirns durch Artikulation
unterschiedlicher Silbenfolgen**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

der Medizinischen Fakultät

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2019

vorgelegt von: Benedikt Riedl

Geboren am 13.12.1988 in Regensburg

Allgemeine Voranmerkung:

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in der nachfolgenden Dissertation die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Nomen und Pronomen verwendet. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern ist im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen.

Inhaltsverzeichnis:

1.	Zusammenfassung	5
1.1	Zusammenfassung in deutscher Sprache	5
1.2	Abstract.....	6
2.	Einleitung	8
2.1	Bedeutung von Sprache für das menschliche Zusammenleben:	8
2.2	Die Artikulation	9
2.3	Entstehung des neuronalen Modells der Sprachproduktion	10
2.4	Theoretische Einführung in die Arbeit - Phonologische Grundlagen.....	11
2.5	Fragestellung der Arbeit	14
3.	Methoden/Materialien – Versuchsaufbau/Studiendesign	15
3.1	Probanden	15
3.2	Studiendesign	15
3.2.1	Präsentation der Silbenfolgen im Experiment - Entwicklung und Ablauf.....	16
3.2.2	Messungen mittels fMRI: Technische Grundlagen und Ablauf	19
3.2.3	Auswertung der fMRI-Daten	21
3.3	Erläuterung der Ergebnisdarstellung	24
4.	Darstellung der Ergebnisse	27
4.1	Ergebnisse der Gegenüberstellung Exekution vs. Baseline.....	27
4.1.1	Ergebnisse der Gegenüberstellung der Exekutionen aller Silbenfolgen vs. Baseline	27
4.1.2	Ergebnisse der Gegenüberstellung der Silbenfolgen im Einzelnen vs. Baseline.....	32
4.1.2.1	Ergebnisse der Gegenüberstellung /'dadada/ vs. Baseline	32
4.1.2.2	Ergebnisse der Gegenüberstellung (/nanana/) vs. Baseline.....	35
4.1.2.3	Ergebnisse der Gegenüberstellung /tatata/ vs. Baseline	39
4.2	Ergebnisse der Gegenüberstellungen der Exekutionen der einzelnen Silbenfolgen gegeneinander	40
4.2.1	Ergebnisse der Berechnung /'dadada/ vs. /'nanana/	40
4.2.2	Ergebnisse der Berechnung /'nanana/ vs. /'dadada/	40
4.2.3	Ergebnisse der Berechnung /'dadada/ vs. /'tatata/	45
4.2.4	Ergebnisse der Berechnung /'tatata/ vs. /'dadada/	45
4.2.5	Ergebnisse der Berechnung /'nanana/ vs. /'tatata/	49
4.2.6	Ergebnisse der Berechnung /'tatata/ vs. /'nanana/	53
4.2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Gegenüberstellungen der einzelnen Exekutionen	58

5.	Diskussion der Ergebnisse	59
5.1	Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.1: Ergebnisse der Gegenüberstellung der Exekutionen aller Silbenfolgen vs. Baseline	60
5.2	Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.2: Ergebnisse der Gegenüberstellung der einzelnen Silbenfolgen vs. Baseline	63
5.3	Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.2: Ergebnisse der Gegenüberstellungen der einzelnen Silbenfolgen gegeneinander	66
5.3.1	Diskussion der Ergebnisse der Kapitel 4.2.1 und 4.2.2: Ergebnisse der Gegenüberstellung /'dadada/ und /'nanana/	67
5.3.2	Diskussion der Ergebnisse der Kapitel 4.2.3 und 4.2.4: Ergebnisse der Gegenüberstellung /'dadada/ und /'tatata/	69
5.3.3	Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.2.5 und 4.2.6: Ergebnisse der Gegenüberstellung /'nanana/ und /'tatata/	70
5.4	Zusammenfassung aller diskutierten Ergebnisse.....	73
6.	Zusammenfassung und Ausblick	75
7.	Literaturverzeichnis.....	76
8.	Abkürzungsverzeichnis.....	79
9.	Abbildungsverzeichnis.....	80
10.	Tabellenverzeichnis.....	81
11.	Danksagungen.....	82
12.	Anhang	83

1. Zusammenfassung

1.1 Zusammenfassung in deutscher Sprache

Hintergrund: Zur Generierung von Sprache sind viele verschiedene Strukturen des menschlichen Körpers, sogenannte Artikulatoren, erforderlich, für deren Einsatz eine neuronale Aktivierung notwendig ist. Diese findet ihren Ursprung als elektrischer Reiz im Gehirn, welcher zu den jeweiligen Artikulatoren weitergeleitet wird, um dort eine Aktion, beispielsweise eine Bewegung, auszulösen. Ziel dieser Arbeit war es, herauszufinden, ob die Aussprache von verschiedenen Silbenfolgen durch die spezielle Bewegung einzelner Artikulatoren unterschiedliche neuronale Aktivität im Gehirn hervorruft und weiter, ob sich diese unterschiedliche Aktivität anhand fMRI-Aufnahmen bildlich und somit nachweisbar darstellen lässt.

Methoden: Für die Messungen wurden 43 Probanden weiblichen und männlichen Geschlechts im Alter zwischen 21 und 55 Jahren (mittleres Alter 27,3 Jahre) im MRT untersucht. Es wurden fMRI- Aufnahmen während der lauten Aussprache von drei verschiedenen CV- Silbenfolgen - /'dadada/, /'nanana/ und /'tatata/ - angefertigt, welche in vorgegebener Reihenfolge wiedergegeben wurden. Zusätzlich wurden in gleicher Anzahl Aufnahmen angefertigt, während derer keine Produktion von Sprache gefordert war. Diese Aufnahmen dienten sämtlichen Berechnungen als Baseline. Die erzeugten Aufnahmen wurden mit dem Programm SPM8 statistisch ausgewertet. Die Auswertung erfolgte zunächst einzeln für jede Silbenfolge, um herauszufinden, in welchen Gehirnregionen Aktivitäten zu finden sind. Anschließend wurden die Aktivitäten der einzelnen Silbenfolgen mittels ROI-Analyse miteinander verglichen, um zu überprüfen, ob sich nachweisbare Unterschiede hinsichtlich der neuronalen Aktivierung ergeben.

Ergebnisse: Verschiedenheiten in der neuronalen Aktivität für die Artikulation unterschiedlicher Silbenfolgen ließen sich bildlich, sowohl in kortikalen als auch in nicht-kortikalen Gehirnregionen, darstellen. Für /'dadada/ ergab sich eine geringere neuronale Aktivität im Vergleich zu den beiden anderen Silbenfolgen, Abstufungen hinsichtlich des

Ausmaßes an neuronaler Aktivität zwischen /'nanana/ und /'tatata/ konnte nicht getroffen werden. Unterschiede ließen sich aber auch für diese Kontraste nachweisen.

Schlussfolgerung: Es konnte gezeigt werden, dass sich die durch die Aussprache verschiedener Silbenfolgen hervorgerufenen unterschiedlichen neuronalen Aktivitäten im Gehirn bildlich nachweisen lassen. Nun sind weitere Untersuchungen nötig, um den komplexen Verschaltungen im Gehirn, gerade hinsichtlich Produktion von Sprache, weiter auf den Grund gehen zu können. Diese könnten in Verbindung mit dem in dieser Arbeit verwendeten Studiendesign dazu beitragen, ein besseres Verständnis zu komplexen Krankheitsbildern, beispielsweise bei Patienten mit Zustand nach Apoplexien mit Aphasien, neurodegenerativen Erkrankungen oder Stottern zu erlangen.

1.2 Abstract

Background: The act of generating speech involves many different structures of the human body, i.e. the so-called articulators, which require neuronal activation. This activation originates from within the brain as an electrical stimulus, which is transmitted to particular articulators in order to trigger an action in terms of a physical motion. It was the topic and aim of the present study to examine whether the production of different kinds of sequences of syllables result in different neural activities by using diverse articulators and, furthermore, whether those different activities are visually detectable by using fMRI.

Methods: In total, 43 female and male subjects aged between 21 and 55 years old (average age 27,3 years) took part in the study. The fMRI recordings were made while the subjects pronounced three different sequences of syllables in the format of CV - skeleton - /'dadada/, /'nanana/ and /'tatata/ - loudly and in prescribed order. Furthermore, an identical number of recordings was made without loud pronunciation as the subjects were instructed to be silent. These recordings served as baseline for the calculations. The statistical evaluation was made using the program SPM8: firstly, each sequence of syllables was evaluated by itself to detect active brain regions for that specific speech production; secondly, the activities during the production of the sequences of syllables were compared with each other and evaluated

via ROI - analysis in order to assess whether there are any verifiable differences between them.

Results: Differences in the neural activity while pronouncing the sequences of syllables could be depicted both in cortical and non-cortical brain regions. The neuronal activity while pronouncing /'dadada/ was significantly lower compared to the other sequences of syllables. Whereas there were detectable differences for the two other contrasts as well, it was impossible to establish gradations between /'nanana/ and /'tatata/ regarding neuronal activity.

Conclusion: The study has been shown that different neural activity caused by the pronunciation of different sequences of syllables is visually verifiable via fMRI. At this point, further studies are required in order to illuminate these complex brain networks, particularly those involved in speech production. Subsequent findings in conjunction with this study might be able to contribute to a better understanding of complex diseases like conditions after stroke combined with aphasia, neurodegenerative diseases, or stutter.

2. Einleitung

2.1 Bedeutung von Sprache für das menschliche Zusammenleben:

Die Sprache ist das Medium, welches die Menschen von allen anderen Geschöpfen dieser Erde unterscheidet. Auch wenn andere Lebewesen ebenfalls fähig sind, zu kommunizieren und ebenso die Verständigung zwischen Mensch und Tier in unserem Alltag eine wichtige Rolle spielt, ist die Verwendung von Sprache mittels definierter Buchstabenfolgen, mit denen sich sowohl der abbildende als auch der auffordernde Charakter der Sprache umreißen lässt, das, was uns Menschen einzigartig macht. Durch Sprache sind Menschen in der Lage, durch lautlichen Ausdruck direkt und konkret zu interagieren. Immanuel Kant (1724 - 1804) beschreibt diese Fähigkeit treffend mit den Worten: *„Alle Sprache ist Bezeichnung der Gedanken, und umgekehrt die vorzüglichste Art der Gedankenbezeichnung ist durch die Sprache, dieses größte Mittel, sich selbst und andere zu verstehen.“*

Dabei ist der Akt des Sprechens an sich eine ebenso beeindruckende wie auch komplizierte und auf verschiedensten Ebenen funktionierende Meisterleistung der Evolution.

Der Wunsch, Sprache zu äußern, wird zunächst neuronal im Gehirn begonnen, neural weitergeleitet und in motorische Bewegungen einer Vielzahl an anatomischen Elementen des Sprachapparates im Bereich der Kopf-Halsregion umgewandelt. Soll Sprache als Kommunikationsmittel funktionieren, so ist sie nicht zuletzt vor allem an den Hörsinn gebunden. Das bedeutet, die Äußerungen der einen Person müssen in zeitlicher Sequenzierung den Empfänger erreichen, welcher die Laute als mechanische Bewegungen im Sinne von Schallwellen mit dem Hörorgan auffängt, in elektrische Reize verwandelt, welche neuronal weitergeleitet im Gehirn zu einer sinnhaften Aneinanderreihung von Wörtern verarbeitet werden, damit eine Verständigung stattfinden kann.

Die evolutionäre Entwicklung von Sprache liegt aufgrund mangelnder Überlieferungsmöglichkeiten weitgehend im Dunkeln. Harald Haarmann behauptet, der Zeitpunkt, ab dem Sprache beziehungsweise Sprachlaute als Verständigungsmittel verwendet wurden, liege deutlich vor 150.000 Jahren bis hin zu einer Millionen Jahren vor unserer Zeit. Durch die Verbindung aus Worten und Körpersprache sei zu dieser Zeit bereits menschliche Kommunikation möglich gewesen. Über Jahrtausende und die Auftrennung in verschiedene

Hominidenspezien hinweg bis zur Spezies des modernen Menschen (*Homo sapiens sapiens*) habe sich die Sprache zu dem, wie wir sie heute kennen, entwickelt.

2.2 Die Artikulation

Die Artikulation der menschlichen Sprache ist ein sehr komplexer Ablauf. Neben neuronalen Abläufen im Gehirn ist insbesondere auch die motorische Ausführung der Artikulation sehr komplex. Schneider-Stickler und Bigenzahn beschreiben mit dem Begriff Artikulation alle Vorgänge, durch welche Sprache erzeugt wird. Während der Wille und damit die neuronalen Reize aus dem Gehirn kommen, geschieht die Erzeugung eines Lautes an verschiedenen Artikulationsorten, also Bereichen innerhalb des Mund-Rachenraumes, an denen mittels Artikulationsorganen und deren Bewegung Sprache produziert wird. Dazu gehören vor allem Lippen, Zunge, Kehlkopf und Glottis. Damit Sprache, die bei einem gesunden Sprecher nahezu fehlerlos generiert wird, richtig produziert werden kann, müssen all diese Artikulatoren sehr genau neuronal angesteuert werden. Dieser Mechanismus, also die feine, bei jedem Wort unterschiedliche Ansteuerung vieler unterschiedlicher Artikulationsorgane, macht die hohe Komplexität der Sprachproduktion verständlich. Neben den oben genannten Artikulationsorganen spielt insbesondere auch die Atemmuskulatur eine wichtige Rolle, ohne welche die Produktion menschlicher Sprache schlichtweg nicht möglich wäre. Die genaue Anpassung des pulmonalen Luftflusses hat dabei die wichtigste Rolle inne, denn als aerodynamische Energiequelle wirkt dieser als Starter für die Lautbildung. Ist der Beginn gelungen, ist ebendieser Luftfluss weiterhin auch für die Stimmlippenschwingungen von Nöten, welche Schneider-Stickler und Bigenzahn als „Quelle des akustischen Signals“ bezeichnen. Somit ist auch die Atemmuskulatur intensiv an der Produktion von Sprache beteiligt. Die Atemmuskulatur, die sich vor allem aus Zwerchfell und Interkostalmuskulatur zusammensetzt, wird vor allem über den Nervus Phrenicus und die jeweiligen Interkostalnerven innerviert (Trepel 2012). Dabei ist der genaue Mechanismus aller Abläufe, all die einzelnen Verschaltungen zwischen den einzelnen Bereichen im Gehirn während der Sprachproduktion trotz ständig fortschreitender Technik und der besseren Verfügbarkeit hochmoderner Untersuchungsmethoden noch nicht völlig aufgedeckt, obwohl dieser schon lange Zeit Gegenstand unterschiedlichster Forschungsarbeiten ist.

2.3 Entstehung des neuronalen Modells der Sprachproduktion

Das ursprüngliche Modell der Produktion und Verarbeitung von Sprache wurde von Broca und Wernicke geprägt, nach welchen die zwei hauptverantwortlichen Bereiche für die motorische Ausführung (Broca) und das Verständnis von Sprache (Wernicke) benannt sind.

Das Broca-Areal, welches Paul Broca (1824-1880) entdeckte, befindet sich im Bereich des Frontallappens in den Brodmann-Arealen 44 und 45 im Bereich der Pars opercularis und der Pars triangularis, in der Regel nur einseitig – bei Rechtshändern in der linken Großhirnhemisphäre, bei Linkshändern dagegen rechts oder links. Broca machte 1861 die Entdeckung, dass es bei einer Läsion dieses Bereiches zu einer von ihm genannten Aphemie kommt. Heute ist für die Benennung von Sprachstörungen der Begriff der Aphasie geläufiger. Er kam zu dem Schluss, dass diese Region im Gehirn für die Funktion des Sprechens zuständig ist. Inzwischen weiß man, dass diese Region nicht isoliert das Sprechen koordiniert, sondern in diesen Bereichen Afferenzen zum Beispiel von der Hörrinde sowie davon ausgehend zahlreiche Efferenzen ziehen, welche unter anderem auch subcortikale Bereiche wie die Basalganglien oder den Thalamus mit in den Schaltkreislauf der Sprachgenerierung einbeziehen (Trepel 2012). Dabei spielt ein bisher noch nicht komplett erforschtes Zusammenspiel aus motorischer Rinde und den subkortikalen Bereichen eine wesentliche Rolle (Murdoch 2001).

Von dort aus gibt es weitere Verbindungen zum Gyrus praecentralis, dem Motorkortex (Brodmann-Areal 4). Über Umleitungen verlaufen von dort über Nervenkerne die Innervationen zu den entsprechenden Muskeln an den Artikulatoren (Trepel 2012). Trotz all dieser neu gewonnenen Informationen stimmt die Behauptung, dass Broca wegweisende Schritte in Richtung Erforschung des Sprechens an sich sowie dessen neuronaler Steuerung getan hat. Denn wie man heute weiß, war seine Vermutung, die mittlerweile über 150 Jahre alt ist, alles andere als falsch.

Aufgrund des technischen Fortschritts gab es stetige Progressse im Bereich der Erforschung der Sprachproduktion. Während es vor einigen Jahrzehnten vor allem darum ging, die Funktion der beteiligten Gehirnbereiche herauszufinden, hat die Technik des MRI, insbesondere das fMRI den Fokus der Studien erneut auf die Erkundung der Pfade und Verbindungen der Schaltkreise im Gehirn gelenkt. 1985 erforschte Crosson die subkortikalen Bereiche und deren mögliche Funktion und postulierte, die Basalganglien hätten eine Art

regulatorische Funktion, welche für das Auslösen der Aussprache vorformulierter Sprachstücke verantwortlich sind (Crosson 1985). Wallesch und Papageno behaupteten 1988 dagegen, insbesondere die Basalganglien und der Thalamus seien gerade für diese Entscheidungsfindung und Vorformulierung der richtigen Wörter zuständig. Vor kurzer Zeit konnte durch weitere Studien festgestellt werden, dass die Verschaltungen im Gehirn doch nicht so eindeutig definiert sind, wie ursprünglich gedacht und man beschäftigt sich wieder mehr mit den beteiligten Bereichen innerhalb der Schaltkreise und insbesondere der Reihenfolge der Aktivierung der jeweiligen Strukturen. Ford beispielsweise konfrontierte sich 2013 mit der Frage, ob Verbindungen zwischen dem Broca-Areal und subcortikalen Strukturen überhaupt nachweisbar sind und konnte anhand einer Diffusions-MRI-Studie nachweisen, dass es Pfade zwischen dem Broca-Areal und dem Putamen sowie dem Broca-Areal und dem Thalamus gibt, wobei zuletzt genannte nur variabel vorhanden sind. Geranmayeh et al. beschäftigten sich 2014 mit der Fragestellung, inwiefern sich motorische Sprachkontrolle tatsächlich nur fronto-temporal-parietal innerhalb der linken Hemisphäre, also im Bereich des Broca-Areales, abspielt. Sie konnten nachweisen, dass es auch bei Rechtshändern insbesondere während des Zählens ein aktives Netzwerk in der rechten Hemisphäre gibt. Während der Produktion von echter Sprache konnten sie ein zweites links-laterales Netzwerk im fronto-temporal-parietalem Bereich ausmachen. Anhand dieser Ergebnisse kann man erkennen, dass der neuronale Ablauf von Sprachproduktion noch lange nicht abschließend erforscht ist. Bevor dieser vollständige Ablauf des Sprachpfades im Gehirn nicht aufgedeckt ist, erscheint es fragwürdig, sich über die möglichen Aufgaben der einzelnen Strukturen Gedanken zu machen.

2.4 Theoretische Einführung in die Arbeit - Phonologische Grundlagen

Einen weiteren Beitrag, den Ablauf von Sprachproduktion zu eruieren, soll die vorliegende Studie erbringen. Hier stehen jedoch weniger die Pfade und Abläufe im Vordergrund, vielmehr geht es um den Vergleich von Aktivierungsmustern des Gehirnes während der Produktion unterschiedlicher Silbenfolgen. Es soll ein Messverfahren verifiziert werden, mit welchem es möglich ist, minimalste Unterschiede der Gehirnaktivierung bildlich anhand von fMRI-Aufnahmen darzustellen. Diese Unterschiede sollen durch die Artikulation

unterschiedlicher Silbenfolgen hervorgerufen werden. Ist dieses Messverfahren erfolgreich, kann damit in weiteren Studien und Untersuchungen herausgefunden werden, welche exakten Sprachregionen bei unterschiedlichen Sprachstörungen beeinträchtigt sind.

Die theoretische Begründung für diese Annahme ergibt sich aus dem Gedanken heraus, dass unterschiedliche Silben unterschiedliche Bewegungen im Mund- Nasen- und Rachenraum benötigen, damit Laute als unterschiedlich klingend wahrgenommen werden. Führt man diese Überlegung weiter, kommt man zu dem Schluss, dass jede Silbe eine andere neuronale Ansteuerung benötigt, um exakt und adäquat artikuliert werden zu können. In der Theorie bedeutet dies, dass jeder Artikulator einzeln neuronal aktiviert werden muss, um diejenigen Bewegungen ausführen zu können, die für die entsprechend gewünschten Artikulationen benötigt werden, seien es die unterschiedlichen Stellungen von Lippen und Zunge oder die jeweils benötigte Anpassung des pulmonalen Luftflusses, welche durch Beeinflussung der Atemmuskulatur geschehen. Werden nun unterschiedliche, aber in der Aussprache sehr ähnlich klingende Silbenfolgen ausgesprochen, so sollte es auch für jede Silbenfolge eine eigene Aktivierungskarte im Gehirn geben. In der Vergangenheit gab es bereits fMRI-Studien, die mit der Verwendung von Silbenfolgen oder Pseudoworten (Orfanidou 2006) oder anderen bekannten Begriffen wie Monatsnamen (Wildgruber 1999) gearbeitet haben, jedoch wurden diese Ergebnisse meist nur in Ihrer Gesamtheit ausgewertet, nicht jedoch die Aktivitäten der einzelnen Begriffe untereinander verglichen. Ähnlich ist dies auch bei dem Versuch von Koch. 2012 konnte er mit einem ähnlichen Studienmodell zeigen, dass es signifikante Unterschiede der aktiven Gehirnareale während der Initiierung, also der Planung, im Vergleich zu denen während der Exekution, also der Aussprache der Silbenfolgen gibt. Weiterhin konnte er nachweisen, dass sich auch für den Vergleich Exekution gegen Baseline signifikante Unterschiede nachweisen lassen. Mit der vorliegenden Arbeit basierend auf diesem Versuchsmodell, soll geklärt werden, ob sich diese Unterschiede noch feiner darstellen lassen können, indem die Exekutionen nicht nur mit der Baseline verglichen werden, sondern auch untereinander. Somit soll zum einen herausgefunden werden, ob sich diese Unterschiede überhaupt nachweisen lassen und falls dies möglich ist, weiterhin auch, innerhalb welcher Gehirnregionen sich diese Unterschiede im Speziellen befinden. Es soll gezeigt werden, dass durch ein geeignetes Messverfahren, welches speziell auf diese Studie zugeschnitten wurde, minimalste Unterschiede in der neuronalen Ansteuerung verschiedener anatomischer Strukturen bildlich dargestellt werden können.

Das Studiendesign basiert auf der dreifach wiederholten Produktion von drei unterschiedlichen Einzelsilben. Um für alle Probanden gleiche Bedingungen zu schaffen, wurde ihnen vorgegeben, welche Laute sie produzieren sollten. Es handelt sich hierbei um die CV - Silben /da/, /na/ und /ta/, die durch die für diese Studie erforderlichen Wiederholungen folglich die Silbenfolgen /'dadada/, /'nanana/ und /'tatata/ ergeben. Das verwendete CV- Modell versucht, innerhalb des Wortskelettes silbische, in der Wortstruktur durch ein großes V gekennzeichnet, von nicht-silbischen Positionen, dargestellt durch ein großes C, zu unterscheiden (Vogel 2007). Das Grundgerüst dieser drei Silbenfolgen war dabei stets der Kardinalvokal /a:/, welcher die geeignete Vergleichbarkeit der Silbenfolgen garantiert. Die Ergebnisse lassen sich somit gut untereinander vergleichen. Die Unterschiede zwischen den Silbenfolgen ergeben sich aus der Verwendung unterschiedlicher Konsonanten, wobei jeder dieser drei Konsonanten unterschiedliche Komplexitäten hinsichtlich der Motorik innehat. Dies wurde speziell so ausgewählt, um die Frage beantworten zu können, ob eine erhöhte motorische Komplexität auch eine komplexere neuronale Aktivierung benötigt. /'dadada/ entspricht dabei der am wenigsten komplexen Silbenfolge, für ihre Produktion benötigt es nur einer supraglottischen Veränderung, indem durch ein Anheben der Zunge ein oraler Verschluss erzeugt wird. /'nanana/ erscheint ein wenig komplexer. Auch hier erzeugen nur supraglottale Veränderungen die Laute, jedoch wird zur Konsonantenbildung der Mundraum so verschlossen, dass die Luft über die Nase entweicht und somit der Laut erzeugt wird (= Nasale). Dies entsteht durch ein Absenken des Velums. Dieser Mechanismus muss zum Erzeugen des Vokales auch wieder umgekehrt, das Velum also angehoben werden, damit die Luft aus dem Mundraum entweichen kann. Somit entsteht eine zweite Bewegung, die eine erhöhte motorische Komplexität von /'nanana/ gegenüber /'dadada/ vermuten lässt. Daraus ergibt sich die Annahme, dass für /'dadada/ eine vermehrte neuronale Aktivität nachweisbar ist, da eine Reizüberleitung an mehrere Artikulatoren stattfinden muss. Am komplexesten in der Ausführung ist die Silbenfolge /'tatata/, denn der Konsonant /t/ ist ein klassischer Plosiv, also ein Verschlusslaut. Bei diesem wird sowohl ein oraler als auch ein velarer Verschluss benötigt, was bedeutet, dass zu dem Zeitpunkt des Verschlusses weder durch den Mund noch durch die Nase Luft entweichen kann. Aber auch ein glottaler Verschluss ist für die Erzeugung dieses Konsonanten erforderlich, was die Aktivierung weiterer Artikulatoren benötigt, wodurch die erhöhte Komplexität erklärt ist (vgl. Schneider-Stickler und Bigenzahn 2013). Pützer, welcher

diesen Studienaufbau entwickelt und 2008 selbst bereits erfolgreich verwendet hat, begründet die Verwendung dieser drei Silbenfolgen anschaulich folgendermaßen:

„Für das Experiment wurde einerseits eine Silbenfolge gewählt, zu deren Artikulation eine sich wiederholende Verbindung einer glottalen Abduktions- und Adduktionsgeste mit einer supraglottalen Artikulationsgeste vonnöten ist (/‘tatata/). Andererseits wurde eine Silbenfolge gewählt, bei der primär eine supraglottale Artikulationsgeste verlangt wird. Die glottale Adduktionsstellung für die Stimmlippenschwingungen verändert sich bei ihrer Produktion auf Grund der größtenteils vorhandenen Stimmhaftigkeit während des oralen Verschlusses nur geringfügig zu einer Öffnung der Glottis hin (/‘dadada/). Schließlich wurde eine dritte Silbenfolge gewählt, bei deren Artikulation zwei unterschiedliche Verschlüsse (Verschluss des Oralraums durch die Zunge bei der Nasalproduktion; Verschluss des Nasenraums durch das Velum bei der Vokalproduktion) alternieren (/‘nanana/). Die glottale Adduktionsstellung der Stimmlippen wird dabei auf Grund der durchgehenden Stimmhaftigkeit nicht verändert. Die drei gewählten Silbenfolgen haben die Gemeinsamkeit, dass die supraglottale Artikulationsstelle bei der Konsonantenproduktion (dental bzw. alveolar) sowie bei der nachfolgenden Vokalproduktion (jeweils offener Vokal /a/) dieselbe ist.“

Weiterhin weist auch der pulmonale Airflow während der Produktion dieser drei Silbenfolgen jeweils Differenzen auf, was einen verstärkten Unterschied in der neuronalen Aktivität durch unterschiedliche Ansteuerung der Atemmuskulatur erwarten lässt.

2.5 Fragestellung der Arbeit

Der Nachweis dieser Aktivitätsunterschiede zwischen der Produktion der einzelnen Silbenfolgen bildlich anhand von fMRI-Aufnahmen, und weiterhin, ob sich diese Unterschiede mit den vermuteten, unterschiedlichen Komplexitäten der einzelnen Silbenfolgen decken und – falls nachweisbar – wo sich im Speziellen diese Unterschiede befinden, ist Thematik dieser Arbeit sein und soll im Folgenden geklärt werden.

3. Methoden/Materialien – Versuchsaufbau/Studiendesign

3.1 Probanden

An der Studie nahmen insgesamt 43 gesunde Personen weiblichen und männlichen Geschlechts, davon 22 Frauen und 21 Männer, als Probanden teil. 39 Testpersonen waren zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 20 und 30 Jahre, vier Probanden über 40 Jahre alt. Die jüngste Testperson war zum Messzeitpunkt 21 Jahre alt, die älteste 55. Aus allen Teilnehmern ergibt sich ein mittleres Alter von 27 (27,3) Jahren (Standardabweichung $sd = 8$ (7,9)). Bei keinem der Probanden war zum Zeitpunkt der Messungen eine neurologische oder psychiatrische Erkrankung bekannt. Des Weiteren waren keine aktuellen oder früheren Kopfverletzungen bekannt. Für die MRT-Messung mussten die Probanden außerdem frei von metallischen oder magnetisierbaren Implantaten sein, eine bestehende Schwangerschaft war ein weiteres Ausschlusskriterium. Eine schriftliche Einverständniserklärung für die wissenschaftliche Verwendung der erhobenen Daten im Rahmen dieser Messungen liegt für alle Probanden vor.

In der Studie aus 2009 von Koch, auf welche im Verlauf der Arbeit des Öfteren verwiesen wird, wurden die Experimente mit ähnlichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Im Zuge dieser Studie gab es ein positives Ethikvotum für das verwendete Studiendesign.

3.2 Studiendesign

Um die in der Einleitung erwähnten Ziele zu verfolgen, wurden die Probanden in einem zweiteilig aufgebauten Experiment gebeten, die Silbenfolgen in vorgegebener Reihenfolge zu artikulieren. Dabei wurden sie einmal für den Erhalt von akustischen Aufnahmen mit einem Mikrophon aufgenommen und im Anschluss an diese Aufnahmen bei exakt gleichen Sprachproduktionen kernspintomographische Aufnahmen angefertigt. Die Reihenfolge der Versuchsanordnung wurde bewusst so gewählt, da es im MRT-Raum aufgrund der dort

herrschenden, lauten Umgebungsgeräusche keine Möglichkeit gab, die Probanden aufzunehmen und dabei die korrekte Sprachausführung zu überprüfen. Bei den akustischen Aufnahmen war ich bei jeder Probandenausführung anwesend und habe diese begleitet, so dass auf etwaige Fehler hingewiesen bzw. bei Bedarf der Versuch noch einmal wiederholt werden konnte. Die Aufnahmen wurden für diese Arbeit nicht benötigt, sondern im Hinblick auf weitere Studien mit angefertigt. Durch das Vorliegen und Evaluieren der akustischen Aufnahmen ist gewährleistet, dass nur Probanden in die Studie mit einbezogen sind, die zu jedem Zeitpunkt des Versuches vollkommen adäquat Sprache produziert haben. Probanden, deren Aussprache als nicht ausreichend erachtet wurde, wurden nicht in die Studie mit einbezogen. Die Auswahl der verwendeten Silbenfolgen und die Begründungen dafür wurden bereits in der Einleitung ausführlich besprochen.

3.2.1 Präsentation der Silbenfolgen im Experiment - Entwicklung und Ablauf

Die Vorgabe an die Probanden, wann welche Silbenfolgen zu sprechen waren, geschah anhand einer mit dem Programm LabVIEW für diese Studie von Dr. Christoph Krick angefertigten Präsentation, mit deren Hilfen die Probanden durch den Versuch geleitet wurden. Dadurch ergab sich für alle Teilnehmer der Studie dieselbe Testsituation. Grundsätzlich gab es für die Probanden während der Messungen zwei unterschiedliche Anweisungen: entweder die Aufforderung zur lauten Aussprache der vorgegebenen Silbenfolge oder die Aufforderung, nicht zu sprechen. Der genaue Ablauf wird im Folgenden näher erläutert. Vor allem hinsichtlich der Messung im MRT war es notwendig, Aktivierung von Gehirnarealen, welche für das Lesen und Verstehen von Buchstaben notwendig sind, wie den Gyrus angularis oder das Wernicke - Sprachzentrum, auszuklammern, um Aktivität in für diese Studie nicht relevanten Gehirnarealen möglichst auszuschließen. Deshalb wurden die Aufforderungen nicht wie Worte als Aneinanderreihung an Buchstaben ausgeschrieben, sondern durch einen speziell entwickelten Zeichencode ersetzt. Dieses Konzept hat sich bereits in der Studie von Koch 2009 als sinnvoll und erfolgreich erwiesen.

Tabelle 1: Alle möglichen Zeichenfolgen der Präsentation

<u>Silbenfolge:</u>	<u>Zeichenfolge Silben:</u>	<u>Zeichenfolge Baseline:</u>
/dadada/	△△△	
/nanana/	○○○	
/tatata/	□□□	
Baseline:		○△□

Wie in Tab. 1 dargestellt, wurde in der Präsentation pro auszusprechender Silbenfolge je eine Zeichenfolge verwendet. Die Zeichenfolgen wurden so gestaltet, dass sie die zu sprechenden Silbenfolgen in ihrer Form möglichst widerspiegelten. Als Silben wurden, wie in der Einleitung erwähnt, CV- Silben verwendet, die pro Aussprache dreimal wiederholt werden sollten. Daraus ergibt sich die Silbenstruktur CV-CV-CV. Diese Dreierstruktur wurde auch für die Zeichenfolge gewählt. Für jeden Befehl zur Aussprache wurde eine Zeichenfolge bestehend aus dreimal dem gleichen Zeichen präsentiert. Wie in Tab. 1 zu sehen ist, wurde für /dadada/ drei Dreiecke gezeigt, für /nanana/ drei Kreise und für /tatata/ drei Vierecke. Eine weitere, bisher nicht erklärte Zeichenfolge ist „○△□“, welche für die Baseline steht. Die Baseline samt Zeichenfolge - die Kombination aller drei verwendeten Zeichen zusammen - wurde für die Messung im MRT konzipiert. Diese Zeichenfolge symbolisierte die oben erwähnte Aufforderung, nicht zu sprechen. Außerdem sollten die Probanden versuchen, so gut wie möglich an nichts zu denken oder zumindest Gedanken an die Silben bzw. Silbenfolgen zu vermeiden. Die Baseline wird benötigt, um bei der Auswertung der fMRI-Daten die Aktivität während des Sprechens einer Gedanken- Nulllinie gegenüberstellen zu können. Die Aktivitäten während des Sprechens und Nicht-Sprechens werden voneinander abgezogen. Dadurch stellen sich die ausschließlich für den Akt des Sprechens relevanten Gehirnareale als aktiv in der Bildgebung dar.

Ein weiteres Ziel des besonderen Studiendesigns war es, den Moment der Exekution - der Zeitpunkt der Aussprache - vollständig von dem Moment der Sprachinitiierung - dem Zeitpunkt, zu dem gezeigt wurde, welche Silbe gleich zu sprechen sei - zu entkoppeln. Dies gelang durch das Zeigen zweier Zeichenfolgen hintereinander pro auszusprechender Silbenfolge. Dadurch konnten im MRT die Messungen exakt zum gewünschten Zeitpunkt angefertigt werden. Die zwei Zeichenfolgen wurden in der LabView-Präsentation hintereinandergeschaltet und durch eine immer gleiche und bei jeder Ausführung vorhandene Pause, ein sogenanntes Retentionsintervall, voneinander getrennt. Zur Initiierung wurden die zu sprechenden Silbenfolgen anhand der in Tab. 1 gezeigten Symbole präsentiert. Zu diesem Zeitpunkt wussten die Probanden, welche Silben sie als nächstes zu artikulieren hatten. Nach dem Retentionsintervall wurde den Probanden eine weitere Zeichenfolge gezeigt, welche zur Aussprache der zuvor gezeigten Silben animierte. Durch die Verwendung einer einheitlichen Zeichenfolge für alle Exekutionsphasen, unabhängig der zu sprechenden Silben, konnte weiterhin auch eine hervorragende Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermöglicht werden, da es zu diesem Zeitpunkt keine unterschiedlichen optischen Reize gab, welche die Daten verfälschen könnten. In dieser Zeichenfolge wurde jede Silbe durch ein „>“ symbolisiert. Die Silbenfolgen und auch die Baseline wurden somit durch „>>>“ präsentiert.

Zusammenfassend lässt sich für die Präsentation feststellen, dass vier verschiedene Zeichenfolgen verwendet wurden, je eine pro Silbenfolge sowie eine für die Baseline. Auf jede Zeichenfolge, welche die Initiierung der Sprachproduktion symbolisierte, folgte nach einem kurzen Retentionsintervall der Befehl für die Exekution, dargestellt durch die Pfeilfolge. Für jeden Aufnahmezyklus gab es somit ausnahmslos zwei Teile:

1. A) Anweisung zur Initiierung der Silbenfolge
B) Retentionsintervall / Erste Ruhephase

2. A) Anweisung zur Exekution der Silbenfolge
B) Retentionsintervall / Zweite Ruhephase

Nach jedem Teil 2B) folgte ohne Verzug der nächste Aufnahmezyklus in der gleichen Reihenfolge, beginnend bei 1A). Anschaulich stellt sich der Ablauf beispielsweise so dar:

(...) ooo >>> ΔΔΔ >>> oΔ□ >>> □□□ >>> (...)

Ausgesprochen ergibt diese Beispielzeile:

(...) Initiierung /'nanana/ -> Aussprache /'nanana/ -> Initiierung /'dadada/ -> Aussprache /'dadada/ -> Initiierung Baseline -> keine Aussprache -> Initiierung /'tatata/ -> Aussprache /'tatata/ (...)

Die Dauer der Präsentation lag insgesamt bei ca. 27 Minuten. Es wurden während der Präsentation 144 Aufnahmezyklen durchlaufen. Diese Zahl setzt sich so zusammen: Jede mögliche in Tab. 1 dargestellte Silbenfolge wurde insgesamt 36 Mal gezeigt. Somit wurden viermal 36 Zeichenfolgen präsentiert, in der Summe 144.

Um den Probanden den Ablauf der Testungen im Vorfeld bereits näher zu bringen, wurde ein Tag vor den jeweiligen Messungen per Email ein Schriftdokument versendet, in welchem der genaue Ablauf des Experiments erklärt wurde.¹ Die Versuchspersonen wurden gebeten, sich dieses im Vorfeld genau durchzulesen, damit das Grundprinzip des Studienaufbaus eingängig ist und zur Messung nur noch die Feinheiten erklärt werden mussten. Am Tag der Messung wurde direkt vor Beginn des Versuchs der Ablauf mit jedem Probanden anhand des herausgegebenen Schriftdokuments durchgesprochen. Die für den Versuch unabdingbare, richtige Silbenproduktion wurde detailliert bis zur sicheren und korrekten Aussprache geübt.

3.2.2 Messungen mittels fMRI: Technische Grundlagen und Ablauf

Die fMRI-Messungen wurden in dem 3-Tesla-Gerät Skyra von Siemens der Neuroradiologie Universitätsklinik Homburg angefertigt. Nach dem Ablegen aller metallischen Teile wurden die Probanden in den Raum mit dem Kernspintomographen geführt. Während der Aufnahme auf dem Rücken liegend – zum Schutz vor übermäßiger Lärmbelästigung mit Gehörschutz ausgerüstet - wurde der Kopf in einer Kopfspule gelagert und mit Schaumstoffkeilen und Klebeband leicht fixiert, um etwaige Bewegungen während der Messung zu unterbinden. Zusätzlich wurde der Proband darauf hingewiesen, sich bei den

¹ Siehe Kapitel 12 Anhang: Koch, X. 2012: fMRT - Anleitung

Messungen im MRT zu bemühen, insbesondere den Kopf so ruhig wie möglich zu halten, um Bewegungsartefakte zu vermeiden.

Zunächst wurde eine circa fünfminütige anatomische Aufnahme des Kopfes angefertigt, um im Einzelfall anatomische Auffälligkeiten erkennen zu können. Im Anschluss daran startete automatisch die LabView- Präsentation, welche den im MRT liegenden Probanden über eine Leinwand vorgespielt wurde. Diese konnte durch einen auf der Kopfspule vor dem Gesicht schräg angebrachten Spiegel ohne Probleme eingesehen werden. An den Beginn der Präsentation gekoppelt begann gleichzeitig das MRT-Gerät, Aufnahmesequenzen mittels der für fMRI-Aufnahmen geläufigen Schnellsequenz-Messtechnik Echo Planar Imaging (Abk. EPI) mit den vorab eingestellten technischen Vorgaben (vgl. Tab. 2) anzufertigen, während die Probanden im MRT ihre Sprachproduktionen artikulierten.

Tabelle 2: Technische Einstellungen des Kernspintomographen für die Messungen

Einstellung:	Anzahl / Maßeinheit:
Sequenz	EPI
Schichten	49
Schichtdicke	2 mm
Repetition Time	3,5 s
Echo Time	30 ms
Spacing between Slices	2,5 mm
Flip Angle	90°
Acquisition Matrix	94 x 94
Pixel Spacing	2mm

Ziel von fMRI- Aufnahmen ist es, das Gehirn während geistiger und/oder motorischer Leistungen aufzunehmen und dabei aktive Areale zu detektieren, welche dadurch betrachtet und verglichen werden können. Aktive Gehirnareale bedeutet im Falle von fMRI- Messungen, dass in diesen Arealen der sogenannte Blood Oxygenation Level Dependent - Effekt, kurz der BOLD - Effekt, gezeigt werden konnte. Diese relativ neue Technologie, von

Ogawa 1990 entdeckt und im Verlauf weiter untersucht und entwickelt, besagt, dass zum Zeitpunkt der Untersuchung der Gehirnaktivität in den aktiven Gehirnarealen das durch dieses Areal fließende Blut stärker oxygeniert ist als in den anderen Bereichen des Gehirns. Das Blut weist durch die erhöhte Sättigung mit Sauerstoff veränderte magnetische Eigenschaften auf, welche durch das MRI- Gerät gemessen und aufgenommen werden können. Dadurch lässt sich im Nachhinein feststellen, welche Areale im Gehirn zu welchen Zeitpunkten aktiv waren. Diese aktiven Areale können bildlich anhand Aktivierungscluster, die auf das gemessene Gehirn projiziert werden, dargestellt werden. Aktivierungscluster kommen zustande, indem für die jeweilige Berechnung jedes einzelne Voxel, was einem dreidimensionalen Pixel entspricht, die Aktivierung anhand von Veränderungen der magnetischen Eigenschaften durch den BOLD- Effekt berechnet wird. Diese Änderungen werden dann mit Lokalisation und Intensität der Aktivität dargestellt. Als Kontrast versteht man in diesem Zusammenhang den gewählten Zeitpunkt einer bestimmten Aktivierung, für diese Studie sind es demnach die Zeitpunkte der Exekutionen.

3.2.3 Auswertung der fMRI-Daten

Zur statistischen Analyse und Auswertung der Daten wurde das in das Programm MATLAB R2012b der Firma „The Mathworks, Inc.“ integrierte Programm Statistical Parametric Mapping in der achten Generation, kurz SPM8, für fMRI-Bilder herangezogen. Dieses Programm ermöglicht es außerdem, vor der Analyse die fMRI- Daten aller Probanden zu verarbeiten und zu standardisieren. Ziel dieser Verarbeitung ist es, mögliche entstandene Artefakte zu korrigieren. Diese entstehen beispielsweise durch unwillkürliche Kopfbewegungen der Probanden. Um dies zu korrigieren, wurde der Datensatz per Realignment bearbeitet. Auch die EPI-Sequenzen neigen durch ihre schnelle Messesequenz ebenfalls zur Artefaktbildung. Daher müssen diese Sequenzen per se korrigiert werden, was durch Slice Time - Correction geschieht. Es gibt klare Empfehlungen für dieses Vorgehen. Potentielle Fehler in den Datensätzen sollen dadurch sehr gut kompensiert werden können (Sladky 2011). Anschließend wurden die Aufnahmen der unterschiedlichen Probanden mit unterschiedlich großen Köpfen und darin enthaltenen Gehirnen standardisiert und auf eine

einheitliche Größe angepasst. Um die Ergebnisse veranschaulichen zu können, wurden sie als Aktivierungscluster auf ein Gehirn projiziert. Als Standardgehirn für die verwendeten Ergebnisse wurde das MNI-Gehirn verwendet. Das bedeutet, dass die Cluster in dem vom Montreal Neurological Institut standardisierten Gehirn dargestellt werden. Dieses Gehirn ist in das Programm SPM8 bereits integriert.

Die korrigierten, normalisierten und auf das MNI-Gehirn standardisierten Daten wurden dann per Voxel by Voxel t-/F-Statistik ausgewertet. Dies bedeutet, dass jedes Voxel einzeln auf signifikante Veränderungen für die jeweiligen Bedingungen getestet wird. Ergeben sich während einer Bedingung im Vergleich zur vorgegebenen Nullaktivierung Signifikanzen für ein Voxel, wird dieses Voxel als aktives Areal im Gehirn dargestellt. Als vorgegebene Nullaktivierung wurde in dieser Arbeit immer die zerebrale Aktivität während der Baseline gewählt. Sollte sich also in den berechneten Daten für ein Voxel eine Abweichung von Null ergeben, besteht hier zu dem berechneten Zeitpunkt eine Aktivität. Abhängig von den verwendeten statistischen Parametern (p -Wert, FWE-Korrektion, usw.) werden diese Aktivitäten anhand oben erklärter Aktivierungscluster dargestellt. Die angewandte Analyseverfahren ist die sogenannte Subtraktionsmethode. Bei dieser Methode geht man davon aus, dass es eine Art Gedankennulllinie gibt, die sogenannte Baseline, welcher die Phase der Aktivierung gegenübersteht, in der ein Plus an Aktivierung im Gehirn besteht. Nun kann man von dieser Aktivierungsphase die Phase der Baseline subtrahieren, womit in der bildlichen Darstellung lediglich die zum gesuchten Zeitpunkt aktivierten Hirnregionen sichtbar sind. Somit lässt sich dadurch innerhalb der Abbildungen auf einen Blick erkennen, welche Areale für die Produktion welcher Silbe aktiv sind.

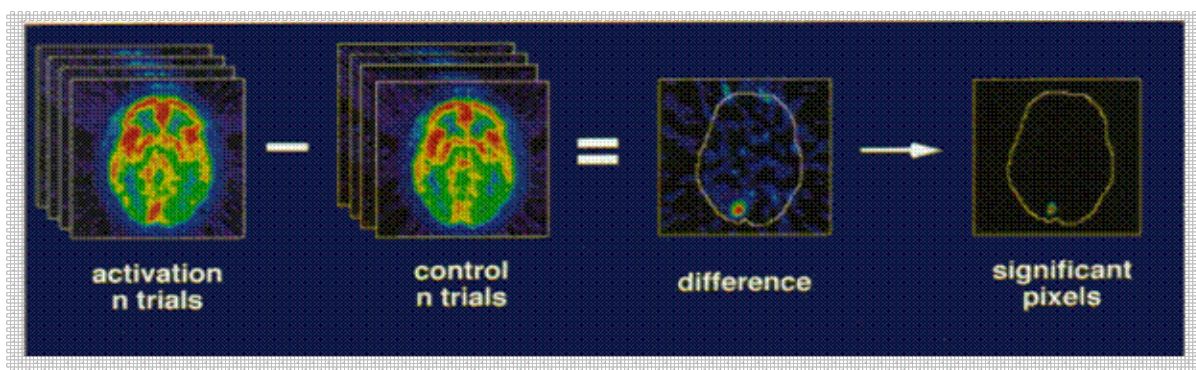


Abbildung 1: Darstellung der Subtraktionsmethode am Beispiel von PET - Bildern (Siedentopf, CM. Stand 2015)

Die Daten für die Berechnungen der Ergebnisse Exekutionen vs. Baseline sind sehr eindeutig. Daher wurden diese Ergebnisse mit einem Signifikanzschwellenwert von $p < 0,05$ berechnet. Zusätzlich wurden die Ergebnisse Family Wise Error korrigiert (FWE- korrigiert). Die Arealgröße wurde mit einer Mindestgröße, also einem extent threshold von $k = 20$ Voxel berechnet. Der Begriff „extent threshold“ bezeichnet die Anzahl, ab wie vielen, unmittelbar benachbarten aktiven Voxel ein Aktivierungscluster dargestellt wird. Das bedeutet, dass einzelne, als aktiv berechnete Voxel, die sich nicht in unmittelbarer Umgebung von mindestens 19 weiteren aktiven Voxel befinden und damit zusammen eine Gruppe von 20 aktiven Voxel ergeben, als nicht aktiv gewertet wurden. Somit wird der Fokus nur auf größere, aktive Areale gehalten.

Die Ergebnisse aus den Gegenüberstellungen der Exekution von jeweils zwei verschiedenen Silbenfolgen mussten weniger konservativ berechnet werden. Beide miteinander zu vergleichenden Silbenfolgen wurden jeweils der Baseline gegenübergestellt, um genau nur die aktiven Areale zu bekommen, die für die eine Silbenfolge der anderen gegenüber mehraktiviert sind. Daraus ergibt sich die folgende Berechnung: (Exekution der Silbenfolge a - Baseline) > (Exekution der Silbenfolge b - Baseline). Es ergeben sich die Areale, die während der Produktion von Silbenfolge a aktiv sind, nicht jedoch während der Produktion der Silbenfolge b. Um auch die Areale, die bei der Produktion von Silbenfolge b im Gegensatz zu Silbenfolge a darstellen zu können, muss dieser Kontrast auch umgekehrt berechnet werden: (Exekution der Silbenfolge b - Baseline) > (Exekution der Silbenfolge a - Baseline). Die Ergebnisse wurden mit einem Signifikanzschwellenwert von p (uncorr) < 0,005 und einem extent threshold von $k = 20$ Voxel berechnet. Da sich bei der Auswertung dieser Ergebnisse trotz oder gerade aufgrund des geringen Signifikanzniveaus teilweise sehr schwer zu differenzierende und einzuordnende Aktivitätsareale ergaben, wurden die Ergebnisse anhand einer ROI- Maske genauer analysiert. ROI steht für Region of Interest und bezeichnet eine Art Schablone, durch die nur Aktivitäten innerhalb vorher definierter Gehirnareale betrachtet werden. In die Maske wurden alle, der aktuellen Forschungsmeinung nach für die Generierung von Sprache relevanten Gehirnareale mit einbezogen, die auch in Kapitel 4.1 dieser Arbeit bestätigt wurden. Die verwendete ROI-Maske ergibt sich aus folgenden Arealen: Motorkortex, respektive Gyrus praecentralis (=primär motorische Rinde M1), der Gyrus frontalis inferior (= IFG), welcher mit der Pars triangularis der dominanten Hemisphäre das motorische Sprachzentrum, das sogenannte Broca- Areal (Brodmann-Areale 44/45)

beinhaltet und das supplementär-motorische Areal (=SMA) (Alario 2006, Hartwigsen 2013, Geranmayeh 2014). Weiterhin wurde auch der Gyrus postcentralis als primär somatosensorisches Gebiet mit in die Maske aufgenommen, da auch diese Region als motorische Kontrollfunktion an der Sprachproduktion beteiligt sein soll (Behroozmand 2015). Vervollständigend als letzte Region wurden auch die Inselrindenregionen beidseits mit in die ROI- Maske einbezogen, einmal, da in ihnen zunehmend eine wichtige Rolle zur Produktion von Sprache vermutet wird (Oh 2016) und weiterhin, da sie neben den anderen genannten Regionen in den Ergebnissen des Kapitels 4.1. dieser Arbeit durchgehend Aktivitäten aufwiesen. Die für die ROI- Maske verwendeten Areale wurden aus dem Atlas IBASPM116 verwendet. Dieser Atlas ist in das Programm SPM8 integriert und wird darin zur Verfügung gestellt.

3.3 Erläuterung der Ergebnisdarstellung

Die Art der Darstellungen der Abbildungen ist in allen Teilen des Ergebniskapitels identisch, daher sind hier einige allgemeine Dinge vorweggenommen. Darstellungen wie Abb. 2 zeigen im oberen Teil alle Aktivierungscluster im MNI-Gehirn in drei Schnittebenen, welche sich für die jeweilig berechneten Bedingungen ergeben haben. Im unteren Teil sind diese Cluster tabellarisch dargestellt. Sie werden dabei anhand der Positionen ihrer Signifikanzmaxima innerhalb des dreidimensionalen Koordinatensystems aufgelistet. In den drei äußeren Spalten ganz rechts in der Tabelle werden die jeweiligen Punkte der lokalen Maxima eines jeden Clusters im Koordinatensystem aufgezehlt. Die Entfernungen zu den jeweiligen Achsen werden dabei in Millimeter (mm) angegeben. Der k-Wert in der Tabelle steht dafür, wie viele Voxel jeweils dieses eine Cluster bilden. Der t-Wert entspricht dem Quotienten des t-Tests, durch welchen die Signifikanz für die einzelnen Voxel wie oben beschrieben berechnet wird. Da dieser Wert allerdings stets stichprobenabhängig ist, muss er zunächst standardisiert werden, um ihn vergleichen zu können. Dafür berechnet SPM8 automatisch den z-Wert mit, welcher dem normalisierten t-Wert entspricht.

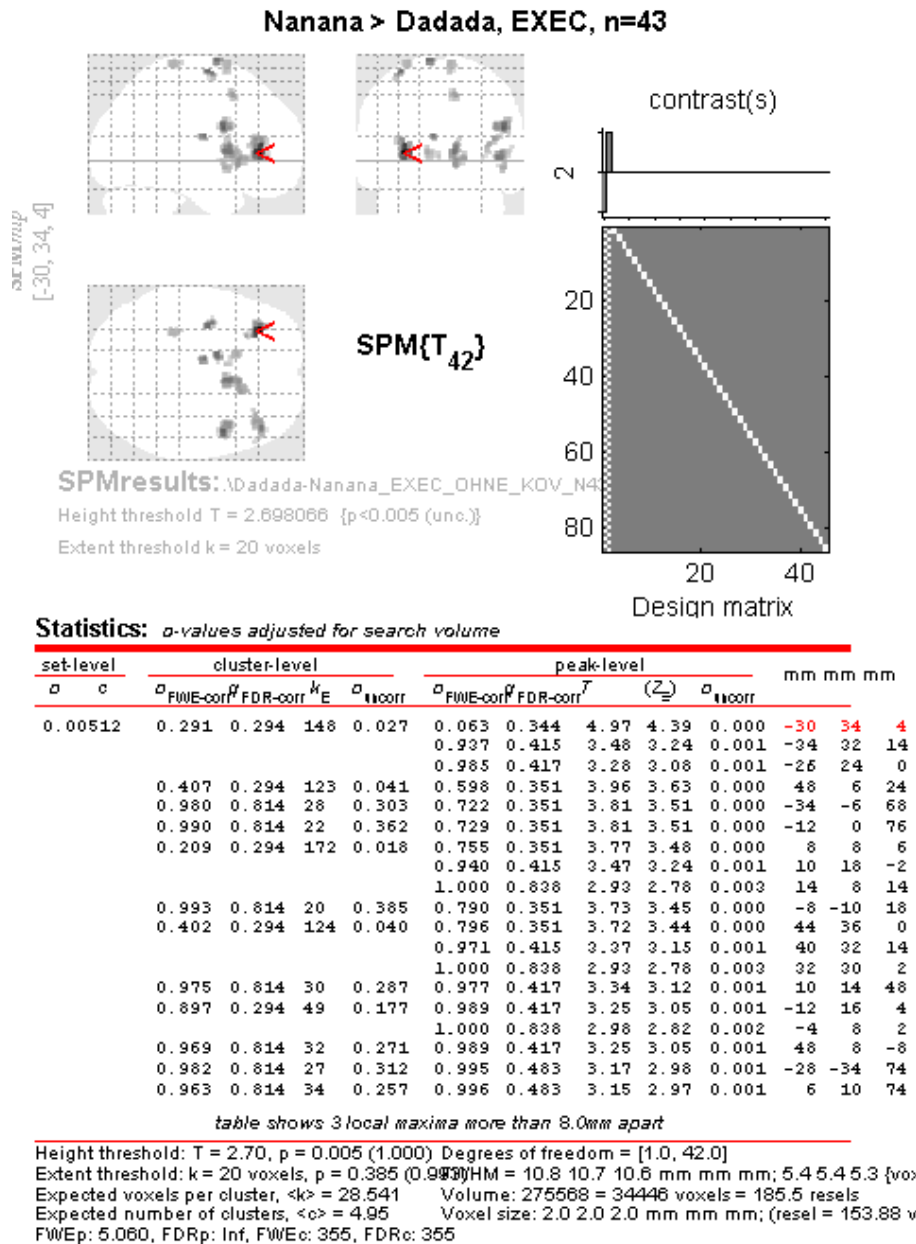


Abbildung 2: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster der Exekutionen /'nanana/ > /'dadada/

Des Weiteren gibt es sogenannte Volume - Render, wie exemplarisch in Abb. 3 dargestellt. Bei dieser Art Abbildungen werden die in der oberen Hälfte sichtbaren, grauen Aktivierungscluster im unteren Teil als eingefärbte Sections dargestellt. Diese Möglichkeit der Darstellung wird verwendet, um die grauen Cluster besser unterscheiden zu können. Dies bedeutet, dass die Cluster farbig in einem Spektrum von schwarz über rot und gelb zu weiß dargestellt werden, wobei die jeweilige farbliche Darstellung eine bestimmte Bedeutung hat: je heller die Section, desto signifikanter das Ergebnis. Diese Art der Darstellung lässt jedoch nur die

Betrachtung eines bestimmten Schnittes zu und nicht wie im oberen Teil die Überlagerung aller Cluster. Daher auch die Bezeichnung Sections, für Abschnitte.

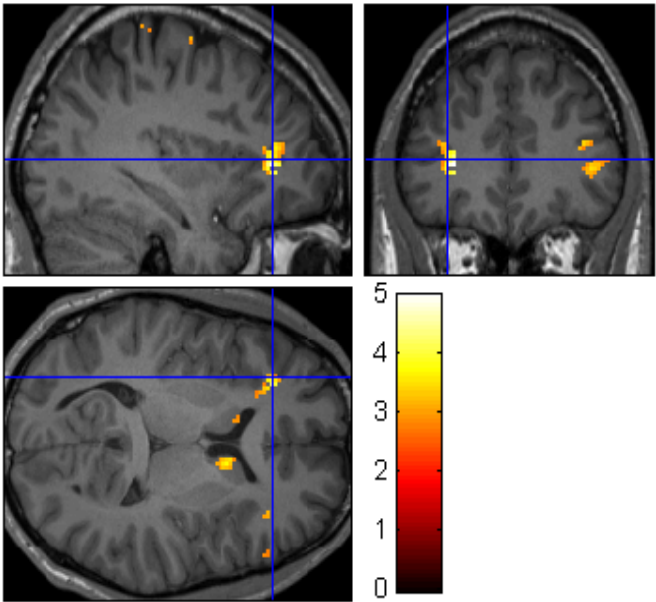
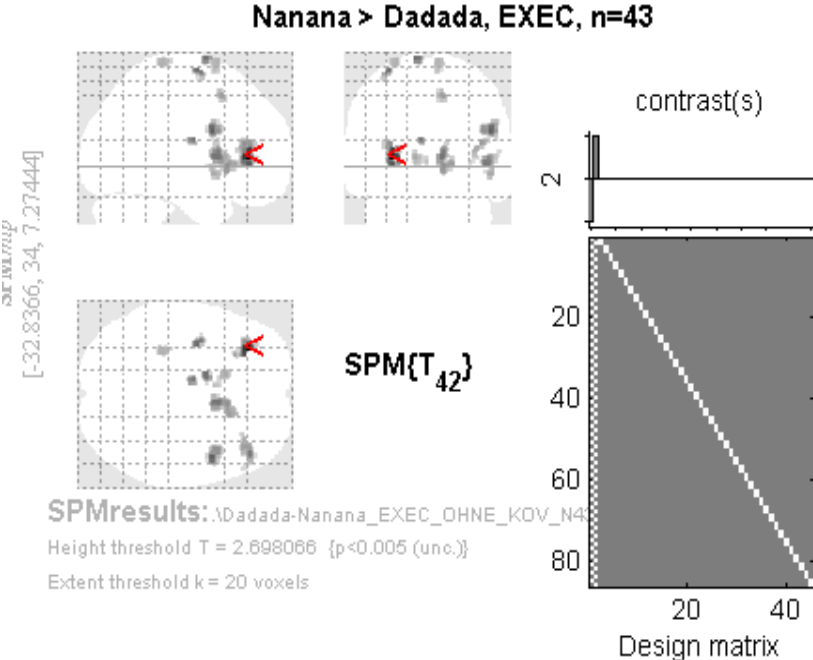


Abbildung 3: Volume-Render mit aktiven Sections für /'nanana/ > /'dadada/ als Beispiel

4. Darstellung der Ergebnisse

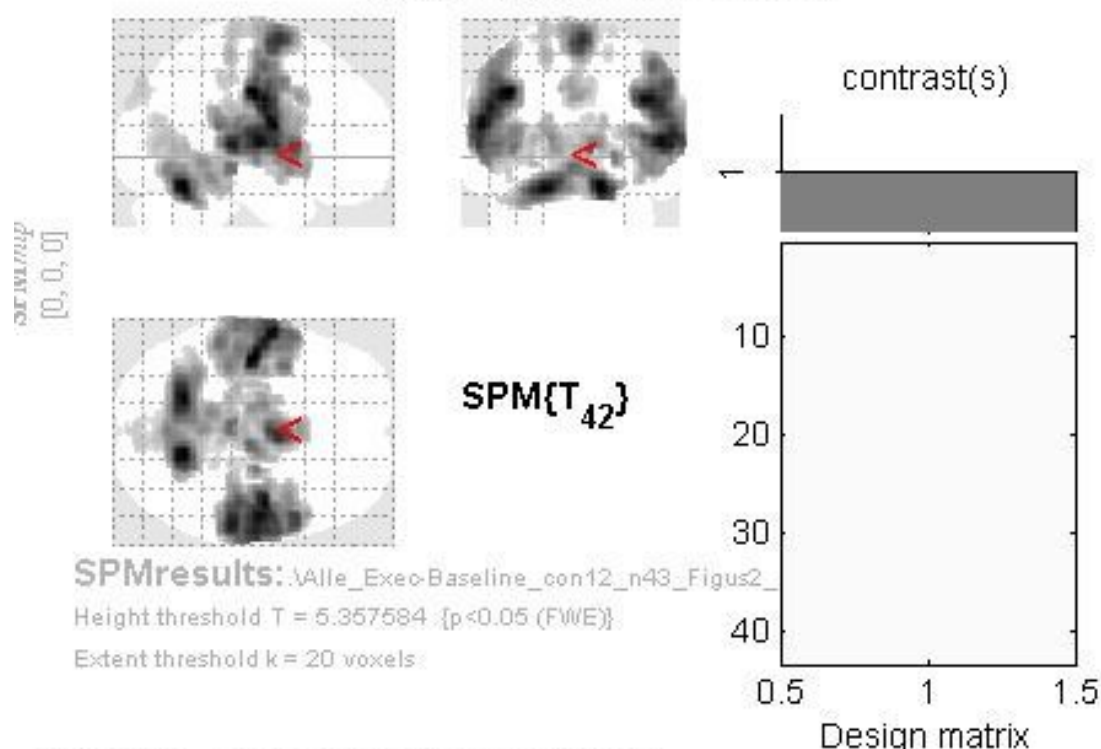
4.1 Ergebnisse der Gegenüberstellung Exekution vs. Baseline

In diesem Kapitel werden die Regionen, die während der Artikulation der Silbenfolgen Aktivität aufweisen, dargestellt. Es werden die Zeitpunkte der Exekutionen den Zeitpunkten der Baselines gegenübergestellt, um die Aktivitäten aufzeigen zu können. Zunächst werden alle Silbenfolgen gemeinsam der Baseline gegenübergestellt, um einen Überblick zu verschaffen. Anschließend wird jede Silbenfolge einzeln mit der Baseline verglichen. Dieses Kapitel dient in erster Linie, das von Koch 2012 entwickelte Studiendesign zu bestätigen und dessen Ergebnisse zu verifizieren, was die Grundlage für die weiterführende Forschung in den folgenden Teilen dieser Arbeit bietet.

4.1.1 Ergebnisse der Gegenüberstellung der Exekutionen aller Silbenfolgen vs. Baseline

Dieser Abschnitt beschreibt, welche Areale grundsätzlich für die Artikulation aktiv sind. Hier wird noch nicht unterschieden, welche Regionen im Gehirn für die Artikulation welcher Silbenfolge aktiv sind. Alle Darstellungen für Aktivitäten in diesem Abschnitt wurden mit einem p -Wert $< 0,05$ und FWE-korrigiert berechnet. Dargestellt sind in allen Abbildungen nur Aktivitäten mit einem extent threshold von $k = 20$ Voxel. Abb. 4 visualisiert die Projektion aller aktiven Areale während aller Exekutionen aller Silbenfolgen in das MNI- Gehirn. Erkennen lässt sich dabei die Lokalisation der Areale im Gehirn im oberen Teil der Abbildung sowie im unteren Teil der Abbildung durch Darstellung der genauen Koordinaten. Insgesamt konnten durch die Produktion der drei Silbenfolgen neun Aktivierungscluster berechnet werden. Die aktiven Areale befinden sich vor allem im Bereich des Motorkortex, des SMA und auch in Teilen des Kleinhirns, spezifischer dargestellt in den Abb. 5 - 7.

Alle Exec > Baseline, n=43



Statistics: *a-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level					mm	mm	mm				
α	c	$\alpha_{FWE-corr}$	$\alpha_{FDR-corr}$	k_E	α_{uncorr}	$\alpha_{FWE-corr}$	$\alpha_{FDR-corr}$	T	(Z_{peak})	α_{uncorr}							
0.0009		0.000	0.000	1948	0.000	0.000	0.000	13.10	Inf	0.000	-42	-16	36				
						0.000	0.000	13.04	Inf	0.000	16	-60	-20				
						0.000	0.000	12.61	Inf	0.000	-58	-4	18				
						0.000	0.000	11.17	7.57	0.000	6	0	68				
						0.000	0.002	7.82	6.11	0.000	0	12	34				
						0.000	0.003	7.67	6.03	0.000	-2	-2	40				
						0.000	0.003	7.71	6.05	0.000	4	14	2				
						0.000	0.015	48	0.007	0.003	0.085	6.32	5.27	0.000	58	-30	46
						0.000	0.007	62	0.003	0.004	0.105	6.23	5.21	0.000	-60	-36	44
						0.000	0.000	225	0.000	0.005	0.106	6.22	5.21	0.000	8	-86	42
						0.000	0.000	225	0.000	0.007	0.156	6.07	5.11	0.000	0	-88	38
						0.003	0.077	22	0.053	0.008	0.182	6.00	5.07	0.000	22	-40	0
						0.002	0.052	28	0.032	0.011	0.233	5.91	5.01	0.000	22	-30	60
						0.001	0.046	31	0.025	0.012	0.258	5.87	4.99	0.000	24	-26	72

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: $T = 5.36$, $p = 0.000$ (0.050) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: $k = 20$ voxels, $p = 0.064$ (0.003) $HM = 13.0$ 12.7 12.5 mm mm mm; 6.5 6.3 6.2 {vox
 Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 5.809$ Volume: 1344712 = 168089 voxels = 605.6 resels
 Expected number of clusters, $\langle c \rangle = 0.00$ Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 255.78 v
 FWEp: 5.358, FDRp: 6.519, FWEc: 3, FDRc: 31

Abbildung 4: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster aller Exekutionen

In Abb. 5 liegt das Fadenkreuz und damit der Fokus der Betrachtungen auf der linken Inselrindenregion mit angrenzender Rinde des Parietallappens, dem Motorkortex. Weiterhin sind aktive Gebiete im Bereich des SMA, des Gyrus cinguli und der Basalganglien, vor allem im Bereich des linken Nucleus caudatus zu erkennen.

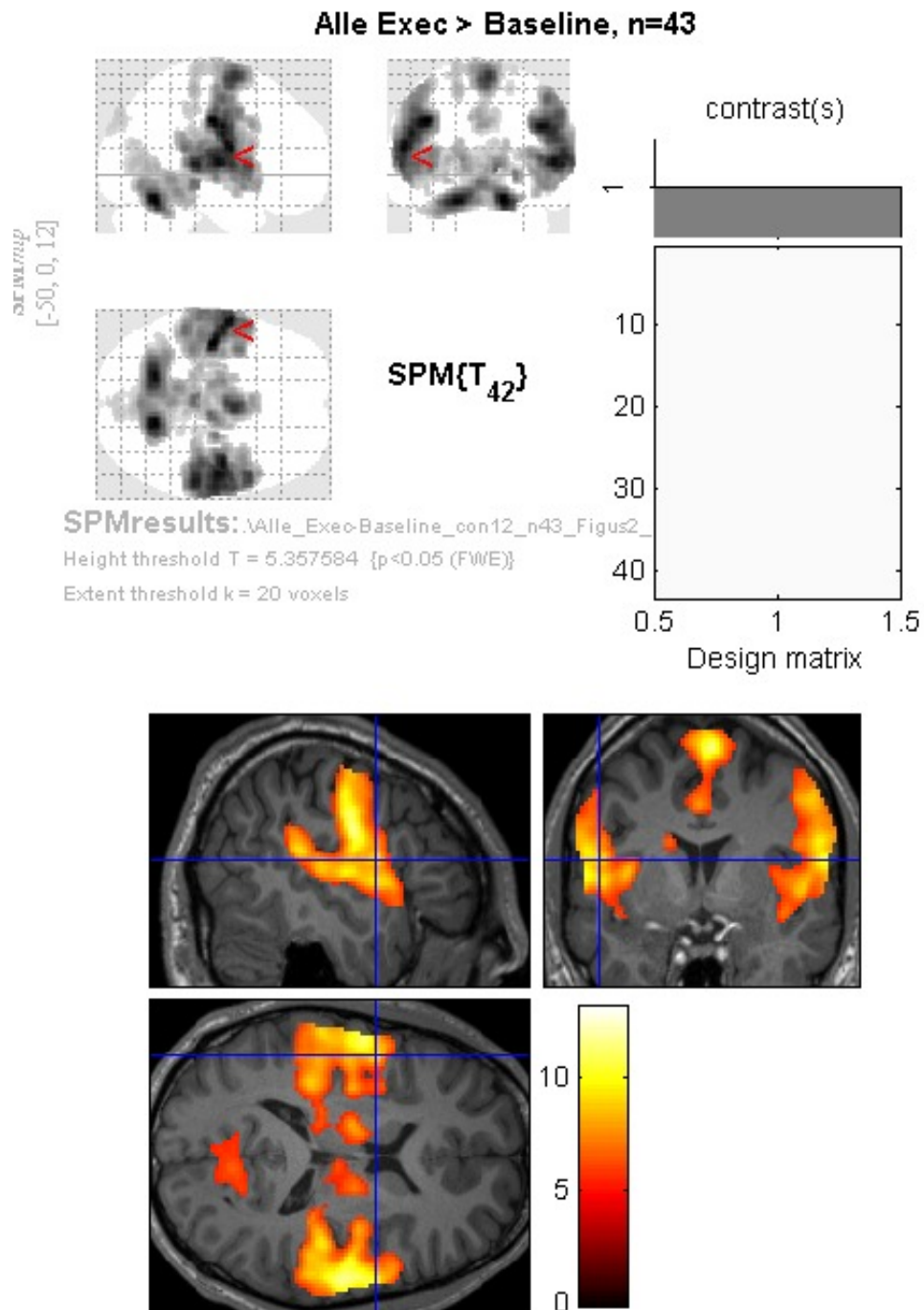


Abbildung 5: Aktive Areale aller Exekutionen mit Darstellung aktiver Sections: Fokus auf den linken Motorkortex

In Abb. 6 ist der Fokus auf das supplementär motorische Areal (=SMA) gerichtet. Außerdem ist Aktivität im Bereich des Gyrus cinguli, im Bereich des Motorkortex beidseits, im Bereich der Inselrinde, des linken Nucleus caudatus, des Parietallappens, des Okzipitallappens / der sekundären Sehrinde, des Cerebellums sowie des Thalamus zu erkennen.

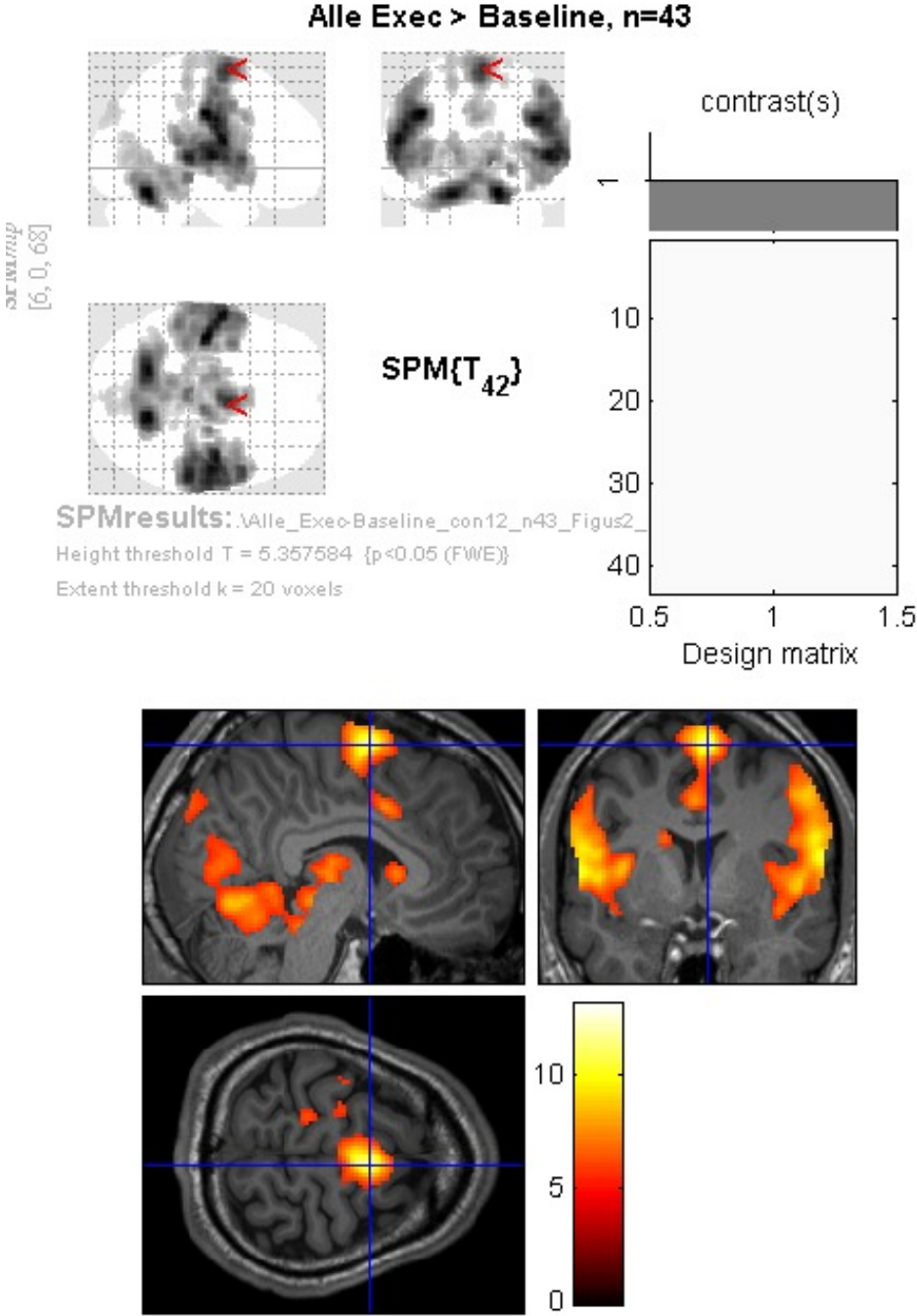


Abbildung 6: Aktive Areale aller Exekutionen mit Darstellung aktiver Sections: Fokus auf das SMA

In Abb. 7 ist der Fokus mit dem Fadenkreuz auf das Kleinhirn gerichtet, speziell auf den Lobus anterior der linken Kleinhirnhemisphäre. Des Weiteren ist auch in dieser Abbildung Aktivität im Bereich des SMA sowie der Basalganglien zu erkennen.

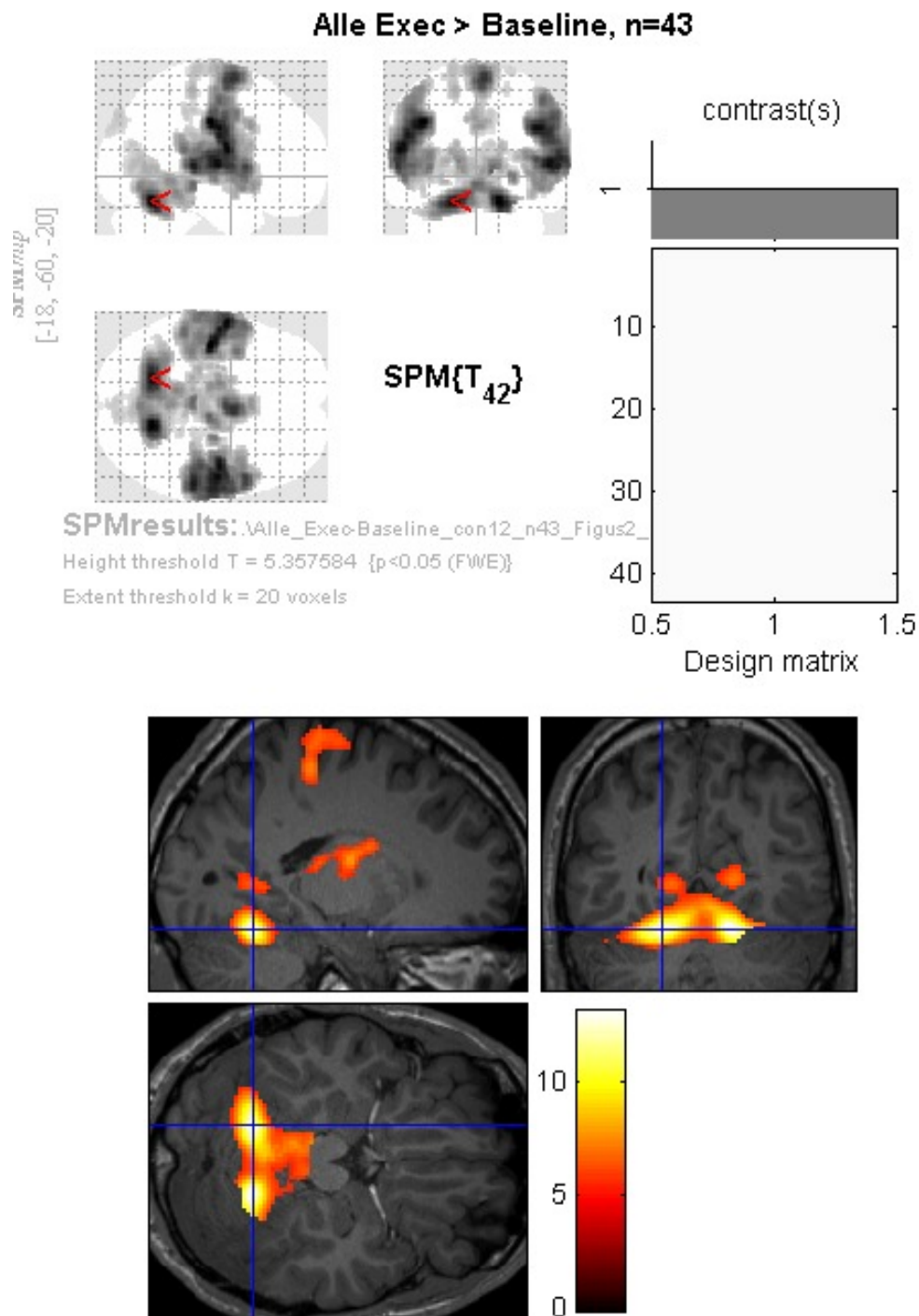


Abbildung 7: Aktive Areale aller Exekutionen mit Darstellung aktiver Sections: Fokus auf die linke Kleinhirnhälfte

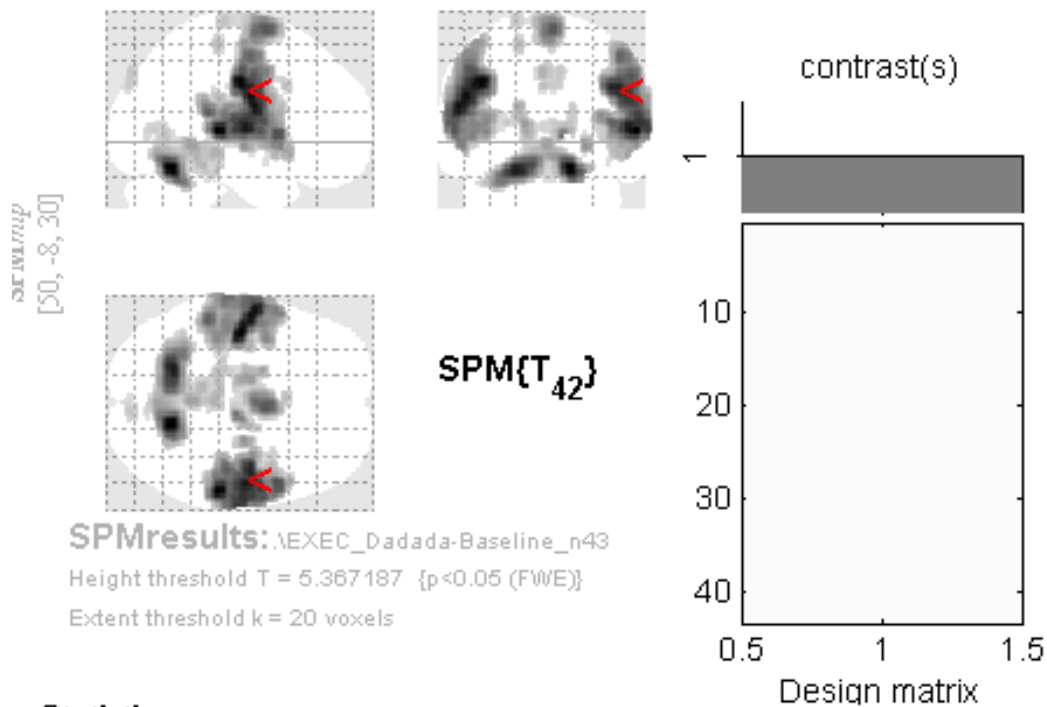
4.1.2 Ergebnisse der Gegenüberstellung der Silbenfolgen im Einzelnen vs. Baseline

4.1.2.1 Ergebnisse der Gegenüberstellung /'dadada/ vs. Baseline

Es folgt die Darstellung der Ergebnisse, die sich aus der Gegenüberstellung der Silbenfolge /'dadada/ mit der Baseline ergeben. Es werden die Aktivierungen der für diese Silbenfolge zuständigen Areale isoliert dargestellt, um im Vergleich erkennen zu können, ob sich Unterschiede zu den Aktivierungen für die anderen Silbenfolgen ergeben.

Abb. 8 und 9 zeigen zunächst alle für die Produktion der Silbenfolge /'dadada/ aktiven Areale. In diesen Abbildungen erkennt man, dass sich die Aktivitäten für /'dadada/ sehr mit den gemeinsamen Aktivitäten aller drei Silben decken, jedoch stellen sie sich etwas schmaler dar (vgl. Abb. 4). Berechnet für diese Silbenfolge wurden insgesamt 11 aktive Areale. Auf eine genauere Betrachtung der Regionen wird verzichtet, da diese sich zum einen im Wesentlichen mit denen der anderen Silbenfolgen decken und zum anderen, da der Nachweis dieser Bereiche nicht Hauptziel der Arbeit war.

EXEC Dadada > Baseline, n=43



Statistics: *p-values adjusted for search volume*

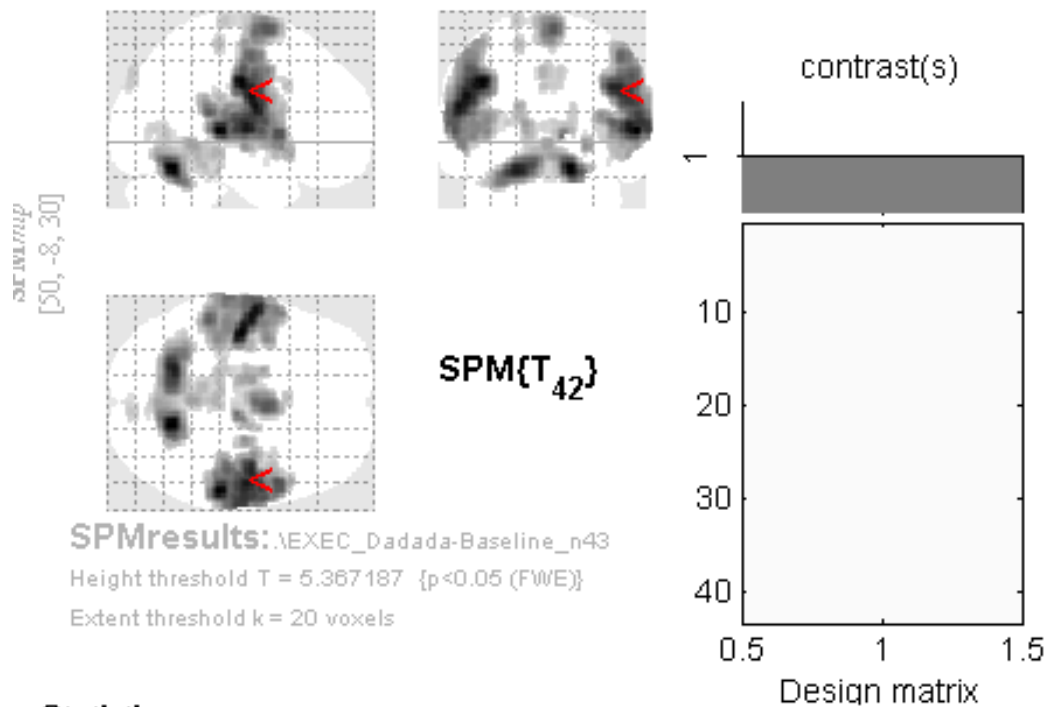
set-level		cluster-level				peak-level					mm mm mm		
<i>p</i>	<i>c</i>	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>k</i> _E	<i>p</i> _{uncorr}	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>T</i>	(<i>Z</i> _{eq})	<i>p</i> _{uncorr}			
0.00011		0.000	0.000	3018	0.000	0.000	0.000	12.77	Inf	0.000	16	-62	-18
						0.000	0.000	11.65	7.74	0.000	-18	-60	-20
						0.000	0.000	8.82	6.60	0.000	-28	-54	-26
		0.000	0.000	5582	0.000	0.000	0.000	12.59	Inf	0.000	58	-30	6
						0.000	0.000	11.75	7.77	0.000	54	-12	6
						0.000	0.000	11.40	7.65	0.000	44	-10	32
		0.000	0.000	5191	0.000	0.000	0.000	12.45	Inf	0.000	-42	-16	36
						0.000	0.000	12.09	Inf	0.000	-52	-10	28
						0.000	0.000	12.01	Inf	0.000	-56	-6	20
		0.000	0.000	1012	0.000	0.000	0.000	9.73	7.00	0.000	4	2	68
						0.000	0.000	9.18	6.76	0.000	2	-6	68
						0.004	0.113	6.28	5.24	0.000	-18	-26	74
		0.000	0.000	581	0.000	0.000	0.000	8.92	6.65	0.000	10	-18	2
						0.000	0.005	7.50	5.94	0.000	-12	-8	8
						0.000	0.007	7.32	5.85	0.000	-18	-2	20
		0.000	0.001	93	0.000	0.000	0.001	7.95	6.17	0.000	26	-14	-4
		0.000	0.000	131	0.000	0.001	0.023	6.90	5.61	0.000	-2	-4	42
						0.039	0.798	5.46	4.72	0.000	-6	-12	40
		0.000	0.009	53	0.005	0.002	0.052	6.56	5.41	0.000	-18	-30	60
		0.000	0.008	57	0.003	0.003	0.080	6.41	5.32	0.000	0	14	34

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: T = 5.37, p = 0.000 (0.050) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: k = 20 voxels, p = 0.060 (0.003) *M* = 12.8 12.6 12.4 mm mm mm; 6.4 6.3 6.2 {vox}
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.620 Volume: 1344712 = 168089 voxels = 622.6 resels
 Expected number of clusters, <c> = 0.000 Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 248.70 v
 FWEp: 5.367, FDRp: 6.614, FWEc: 1, FDRc: 5.367 Page 1

Abbildung 8: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'dadada/ > Baseline, Seite 1

EXEC Dadada > Baseline, n=43



Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level			peak-level					mm mm mm			
<i>p</i>	<i>c</i>	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>k</i> _E	<i>p</i> _{uncorr}	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>T</i>	(<i>Z</i> _{eq})	<i>p</i> _{uncorr}			
		0.000	0.001	99	0.000	0.014	0.322	5.83	4.95	0.000	6	8	38
						0.005	0.143	6.18	5.18	0.000	8	-86	42
						0.042	0.851	5.43	4.70	0.000	-2	-86	42
		0.000	0.003	76	0.001	0.007	0.184	6.06	5.11	0.000	6	-72	6

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

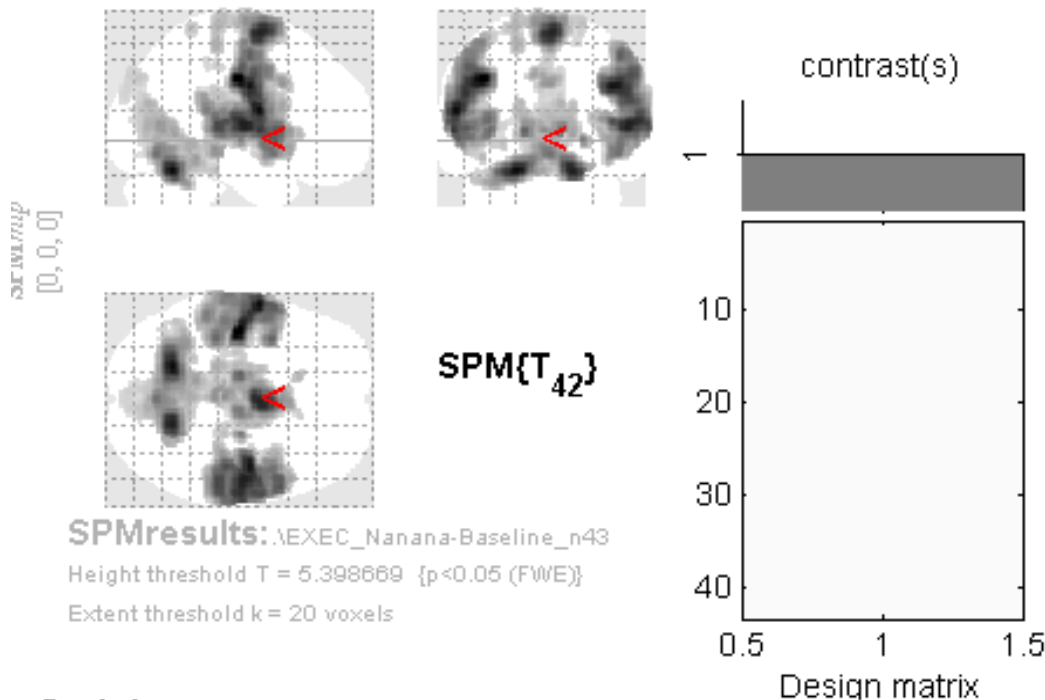
Height threshold: T = 5.37, p = 0.000 (0.050) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: k = 20 voxels, p = 0.060 (0.003) M = 12.8 12.6 12.4 mm mm mm; 6.4 6.3 6.2 {vox}
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.620 Volume: 1344712 = 168089 voxels = 622.6 resels
 Expected number of clusters, <c> = 0.00 Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 248.70 v
 FWEp: 5.367, FDRp: 6.614, FWEc: 1, FDRc: 5.367

Abbildung 9: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'dadada/ > Baseline, Seite 2

4.1.2.2 Ergebnisse der Gegenüberstellung (/nanana/) vs. Baseline

In den Abbildungen 10 und 11 werden alle für die Produktion der Silbenfolge /nanana/ aktiven Areale dargestellt. Beim Vergleich dieser Silbenfolge mit der Baseline ergeben sich zehn aktive Bereiche. Bei deren Betrachtung scheinen sich die Areale im Bereich des Motorkortex weniger auszubreiten als in der Gegenüberstellung von /dadada/ mit der Baseline (vgl. Abb. 8 und 9). Innerhalb der Basalganglien dagegen stellt sich während der Artikulation von /nanana/ deutlich vermehrt Aktivität dar (vgl. Abb. 12, roter Pfeil), wie auch in den Bereichen des SMA, der Kleinhirnregion und des Okzipitallappens.

EXEC Nanana > Baseline, n=43



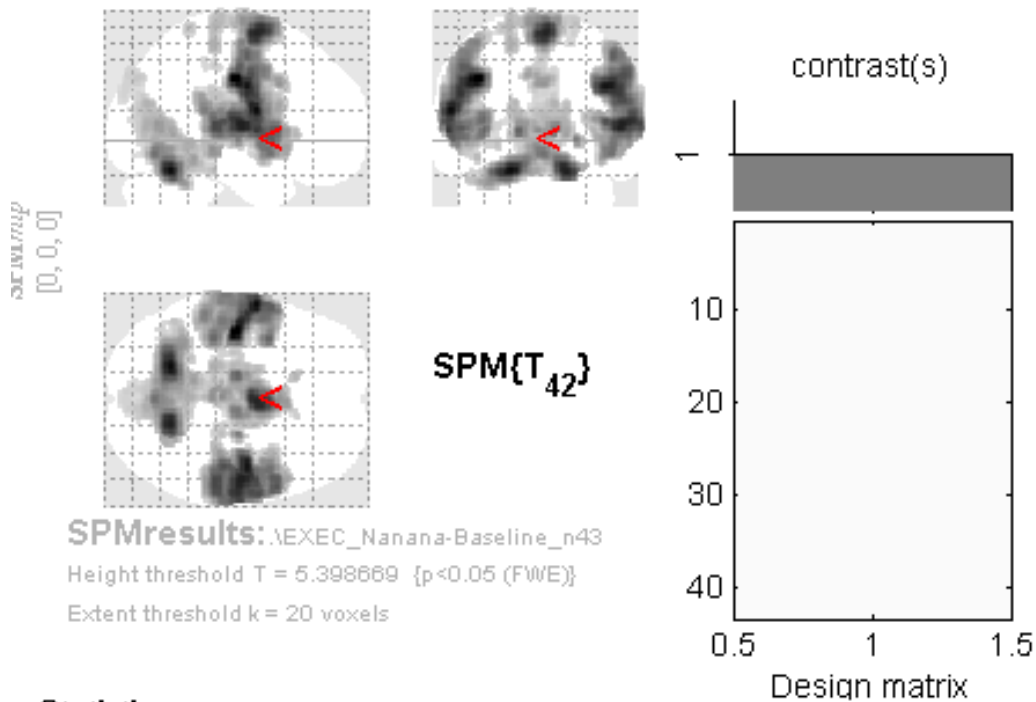
Statistics: *a-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level			peak-level					mm	mm	mm	
<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>k</i> _E	<i>a</i> _{uncorr}	<i>a</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>T</i>	(<i>Z</i>)	<i>a</i> _{uncorr}			
0.00010		0.000	0.000	5454	0.000	0.000	0.000	13.14	Inf	0.000	-40	-16	36
								12.46	Inf	0.000	-58	-4	18
								11.22	7.59	0.000	-52	-10	28
		0.000	0.000	6475	0.000	0.000	0.000	12.48	Inf	0.000	-18	-60	-20
								11.82	7.80	0.000	18	-60	-22
								9.50	6.90	0.000	-14	-16	4
		0.000	0.000	6250	0.000	0.000	0.000	12.24	Inf	0.000	44	-10	32
								11.80	7.79	0.000	54	-14	8
								10.55	7.33	0.000	54	-30	6
		0.000	0.000	2365	0.000	0.000	0.000	11.66	7.74	0.000	4	-4	66
								7.98	6.19	0.000	12	-10	72
								7.93	6.16	0.000	2	12	34
		0.000	0.000	152	0.000	0.000	0.002	7.82	6.11	0.000	4	14	2
								5.98	5.06	0.000	14	24	2
		0.001	0.038	30	0.019	0.001	0.025	6.87	5.59	0.000	-12	22	2
		0.000	0.000	103	0.000	0.002	0.058	6.52	5.39	0.000	24	-26	72
						0.021	0.429	5.72	4.89	0.000	20	-30	58
		0.000	0.016	42	0.007	0.003	0.067	6.46	5.35	0.000	-24	-46	70
						0.017	0.353	5.79	4.94	0.000	-32	-48	66
		0.002	0.052	24	0.033	0.007	0.163	6.12	5.15	0.000	58	-30	46

Height threshold: *T* = 5.40, *p* = 0.000 (0.050) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: *k* = 20 voxels, *p* = 0.048 (0.050) *HM* = 12.4 12.2 12.0 mm mm mm; 6.2 6.1 6.0 {vox}
 Expected voxels per cluster, <*k*> = 5.042 Volume: 1344712 = 168089 voxels = 681.8 resels
 Expected number of clusters, <*c*> = 0.00 Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 227.10 v
 FWEp: 5.399, FDRp: 6.601, FWEc: 1, FDRc: 30 Page 1

Abbildung 10: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana / > Baseline, Seite 1

EXEC Nanana > Baseline, n=43



Statistics: *alpha-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level			peak-level					mm	mm	mm
α	c	$\alpha_{FWE-corr}$	$\alpha_{FDR-corr}$	k_E	α_{uncorr}	$\alpha_{FWE-corr}$	$\alpha_{FDR-corr}$	Z	α_{uncorr}			
0.002	0.052	24	0.033	0.018	0.377	5.77	4.92	0.000	-56	-36	46	

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: $T = 5.40$, $p = 0.000$ (0.050) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: $k = 20$ voxels, $p = 0.048$ (0.050) $HM = 12.4$ 12.2 12.0 mm mm mm; 6.2 6.1 6.0 {vox}
 Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 5.042$ Volume: 1344712 = 168089 voxels = 681.8 resels
 Expected number of clusters, $\langle c \rangle = 0.00$ Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 227.10 v
 FWEp: 5.399, FDRp: 6.601, FWEc: 1, FDRc: 30
 Page 2/2

Abbildung 11: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana/ > Baseline, Seite 2

In Abb. 12 liegt der Fokus auf den Basalganglien (roter Pfeil/Fadenkreuz), da besonders in deren Bereich eine bemerkenswerte, vermehrte Aktivität zu erkennen ist. Weiterhin ist auch im Bereich des SMA, des Gyrus cinguli, beidseitig im Bereich des Motorkortex, des Kleinhirns und des Okzipitallappens Aktivität zu erkennen.

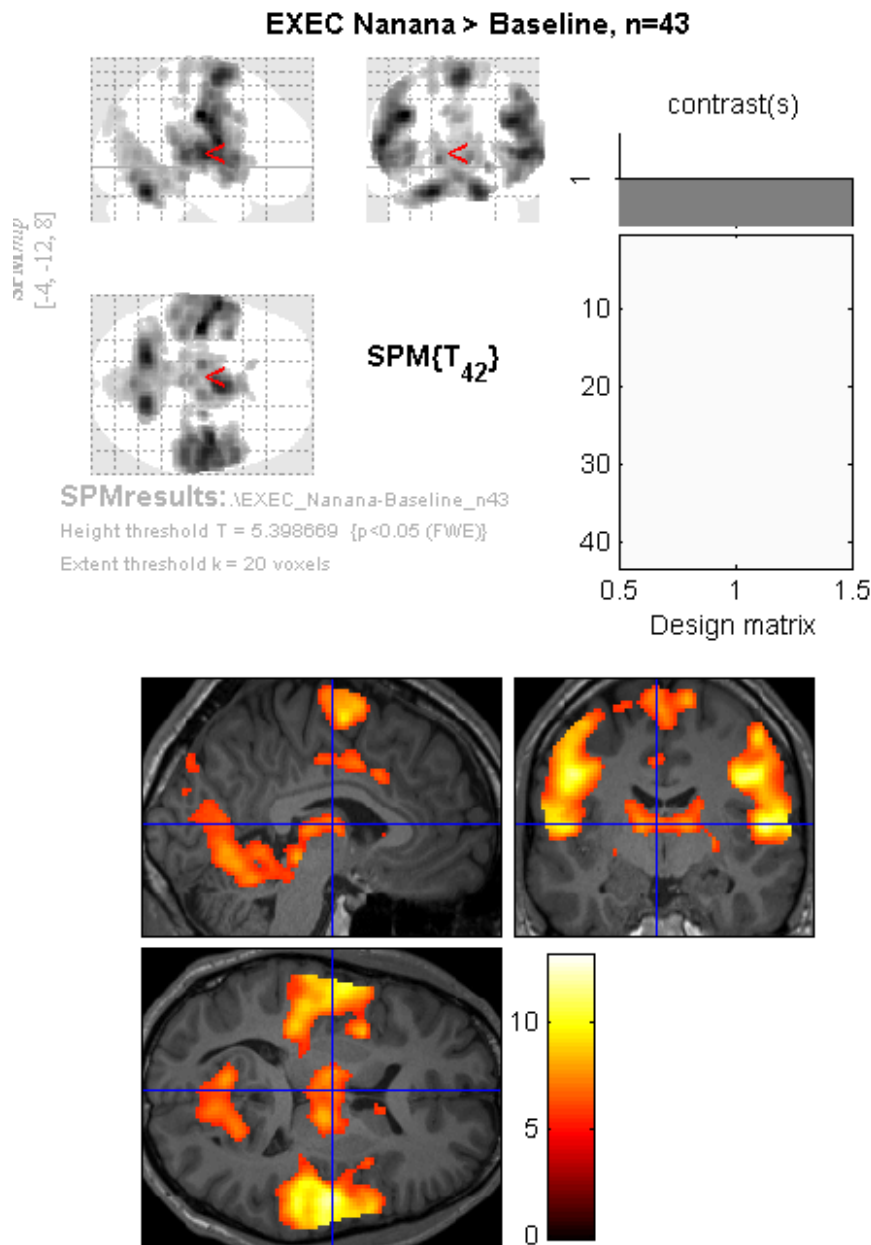


Abbildung 12: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > Baseline: Fokus auf die Basalganglien

4.1.2.3 Ergebnisse der Gegenüberstellung /tatata/ vs. Baseline

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse dargestellt, die aus der Gegenüberstellung der Silbenfolge /tatata/ mit der Baseline berechnet wurden. In Abb. 15 sind die Aktivitäten dargestellt. Aus den Berechnungen ergaben sich für diese Silbenfolge 9 aktive Areale. Es sind keine manifesten Divergenzen zu den anderen beiden Silbenfolgen zu erkennen.

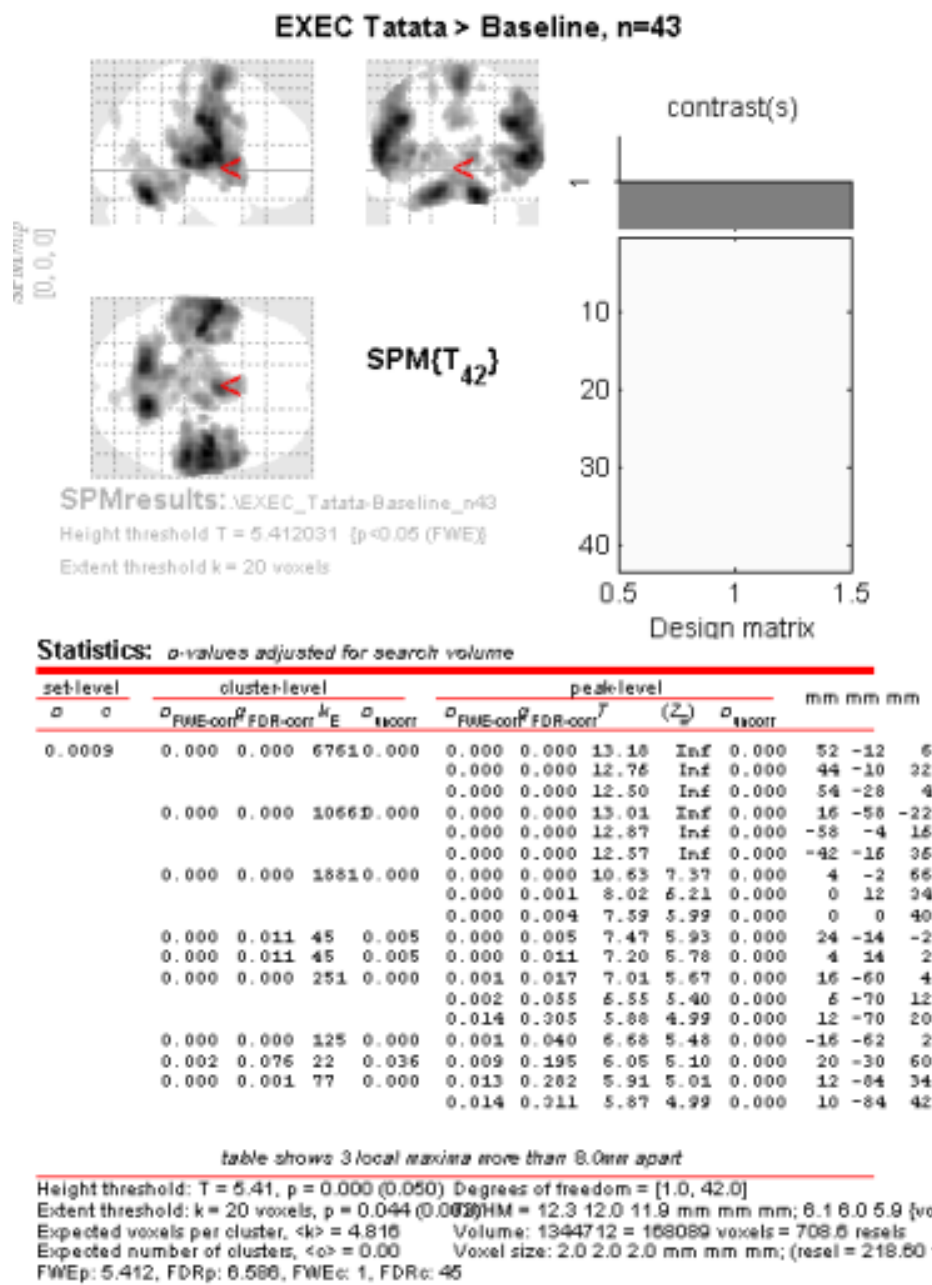


Abbildung 13: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'tatata/ > Baseline

4.2 Ergebnisse der Gegenüberstellungen der Exekutionen der einzelnen Silbenfolgen gegeneinander

Nach Darstellung der einzelnen Aktivitäten der jeweiligen Exekutionen zur Verifizierung des Studienmodells erfolgt nun die direkte Gegenüberstellung der einzelnen Silbenfolgen. Dieser Teil behandelt diejenigen Ergebnisse, deren Gewinnung das Hauptziel dieser Arbeit war. Es galt herauszufinden, ob sich durch das aufgestellte Studiendesign unter den gegebenen Voraussetzungen überhaupt Unterschiede nachweisen lassen, und wenn ja, weiter, in welchen Bereichen sich diese jeweils befinden. Die Ergebnisse dieses Kapitels wurden mit einer niedrigeren Signifikanzniveauschwelle $p(\text{uncorr}) < 0,005$ und einem extent threshold $k = 20$ Voxel berechnet und nach Gewinnung direkt mittels einer ROI-Maske bearbeitet und gefiltert, damit nur die relevanten Gehirnareale Einzug in diese Arbeit halten konnten.

4.2.1 Ergebnisse der Berechnung /'dadada/ vs. /'nanana/

An dieser Stelle sollen die Ergebnisse des Vergleiches /'dadada/ vs. /'nanana/ beschrieben werden, also die Gehirnareale, die während der Produktion von /'dadada/ aktiv sind, während der von /'nanana/ dagegen nicht. Jedoch konnten für diese Bedingung keine Resultate berechnet werden, was bedeutet, dass /'dadada/ keine Mehraktivierung /'nanana/ gegenüber hat.

4.2.2 Ergebnisse der Berechnung /'nanana/ vs. /'dadada/

Für die Produktion von /'nanana/ konnten im Vergleich mit /'dadada/ insgesamt neun aktive Bereiche nachgewiesen werden (vgl. Abb. 14). Das größte aktive Areal befindet sich im Bereich des IFG der linken Hemisphäre, erkennbar in Abb. 15 als Section (Fadenkreuz). Daneben konnte Aktivität auch im Bereich des rechten IFG, den jeweils angrenzenden

anterioren Insulae, des SMA, des linken und rechten Motorkortex und des linken Gyrus postzentralis nachgewiesen werden (vgl. Abb. 15 – 17).

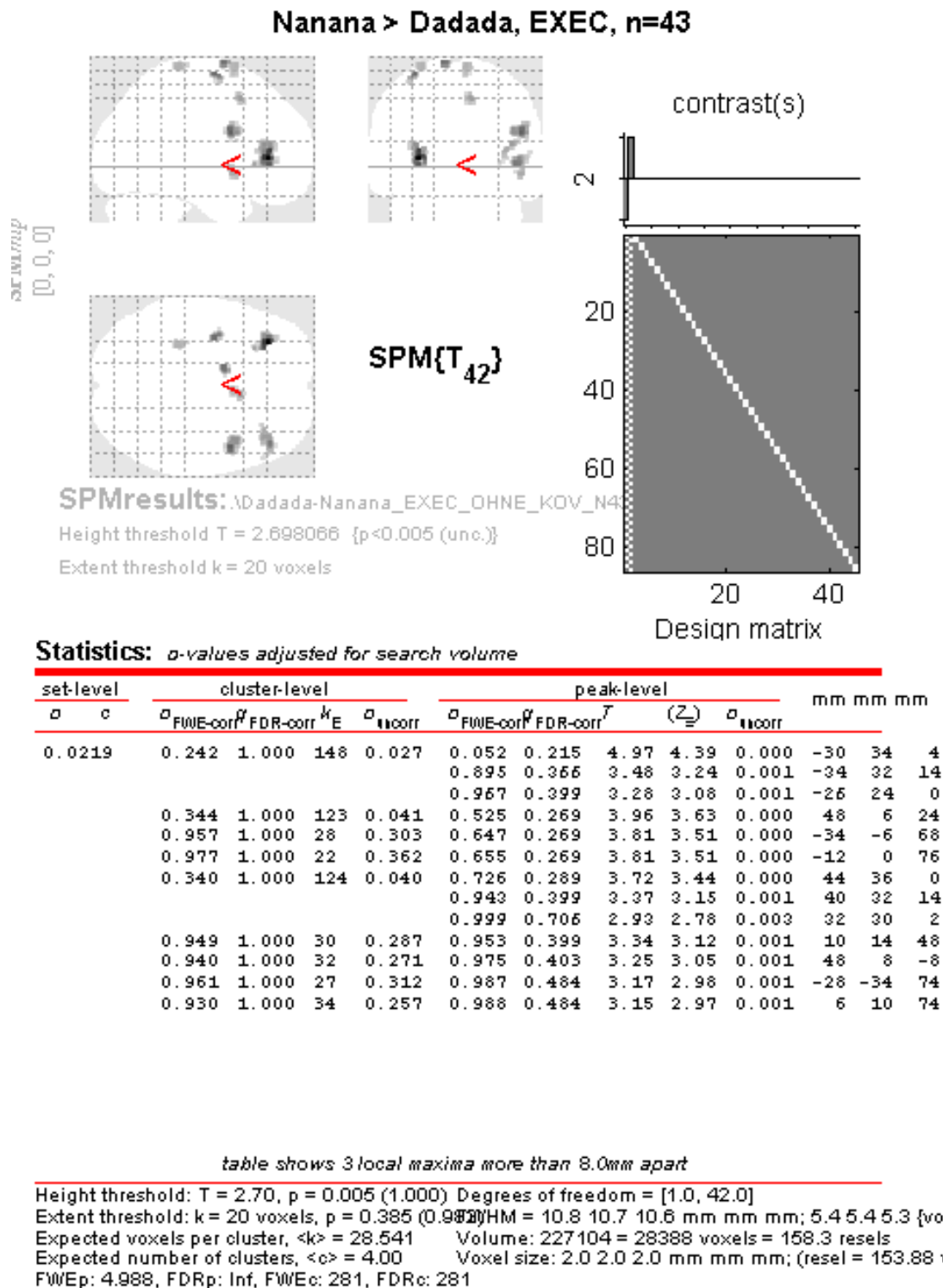


Abbildung 14: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/

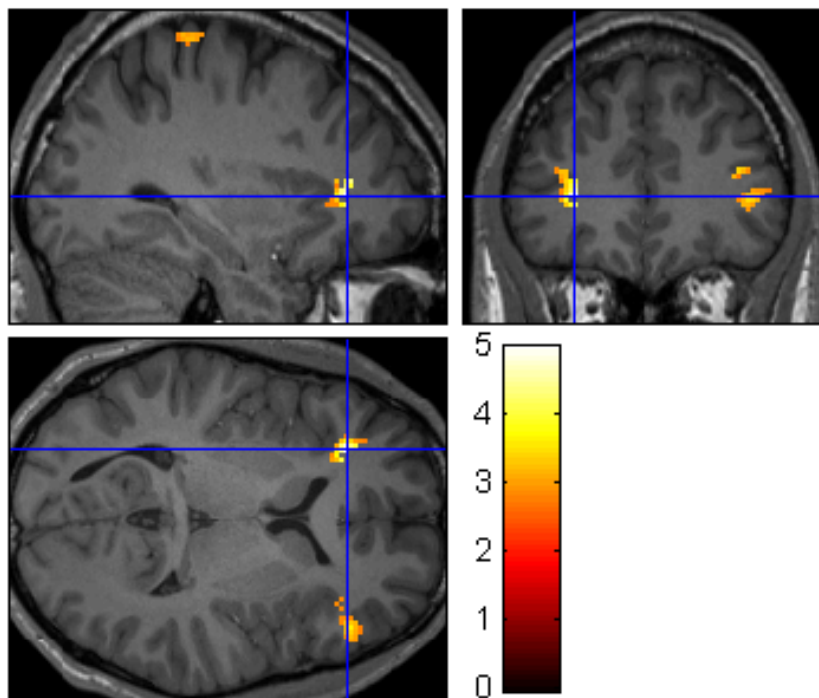
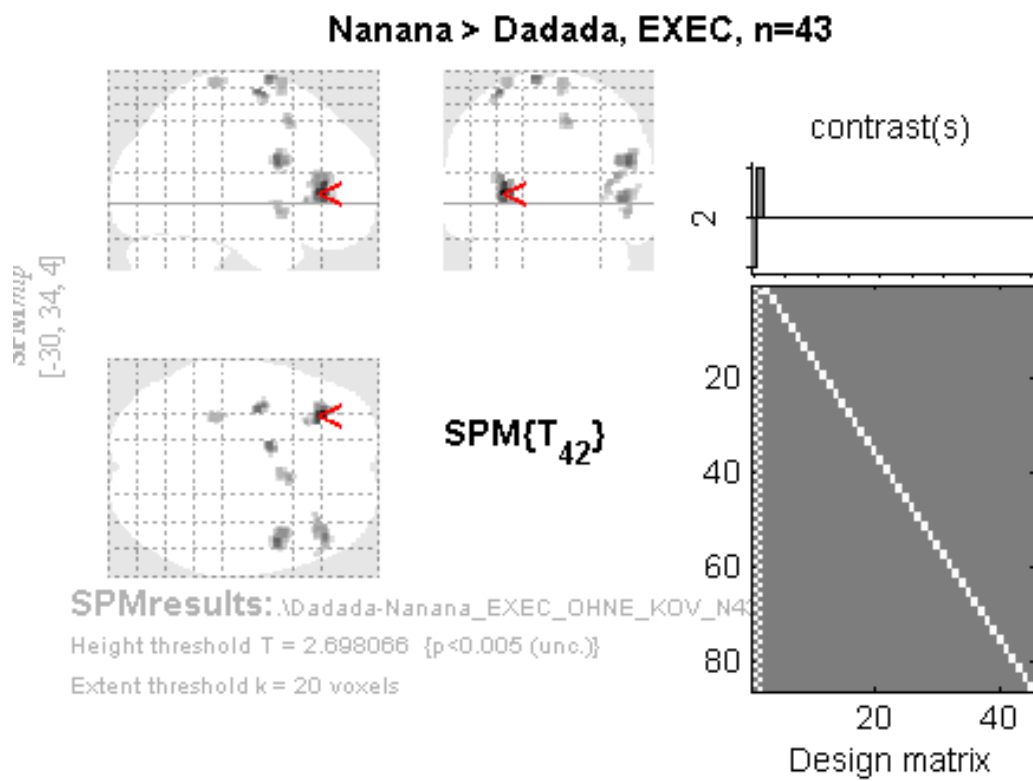


Abbildung 15: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/: Fokus auf den linken IFG und die anteriore Insula

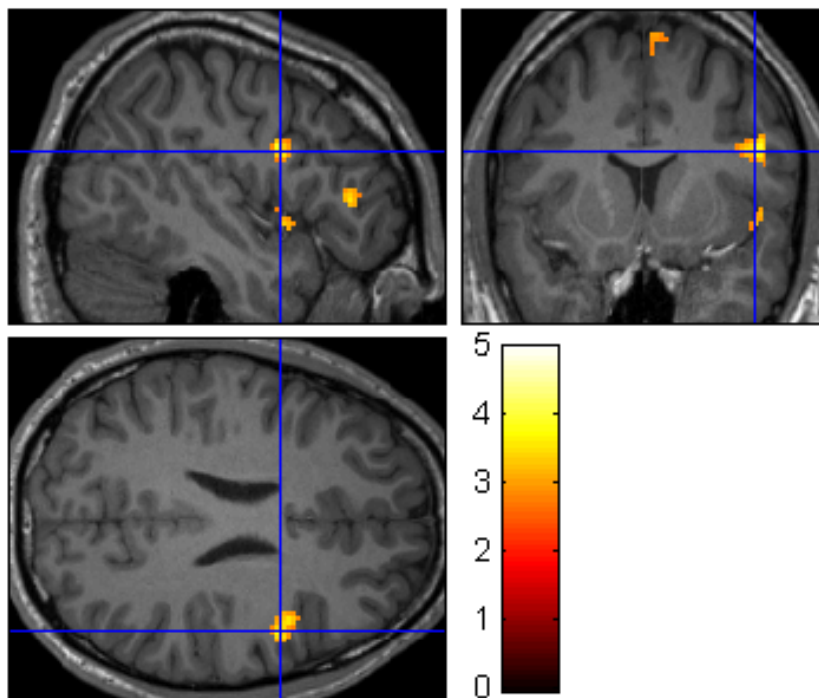
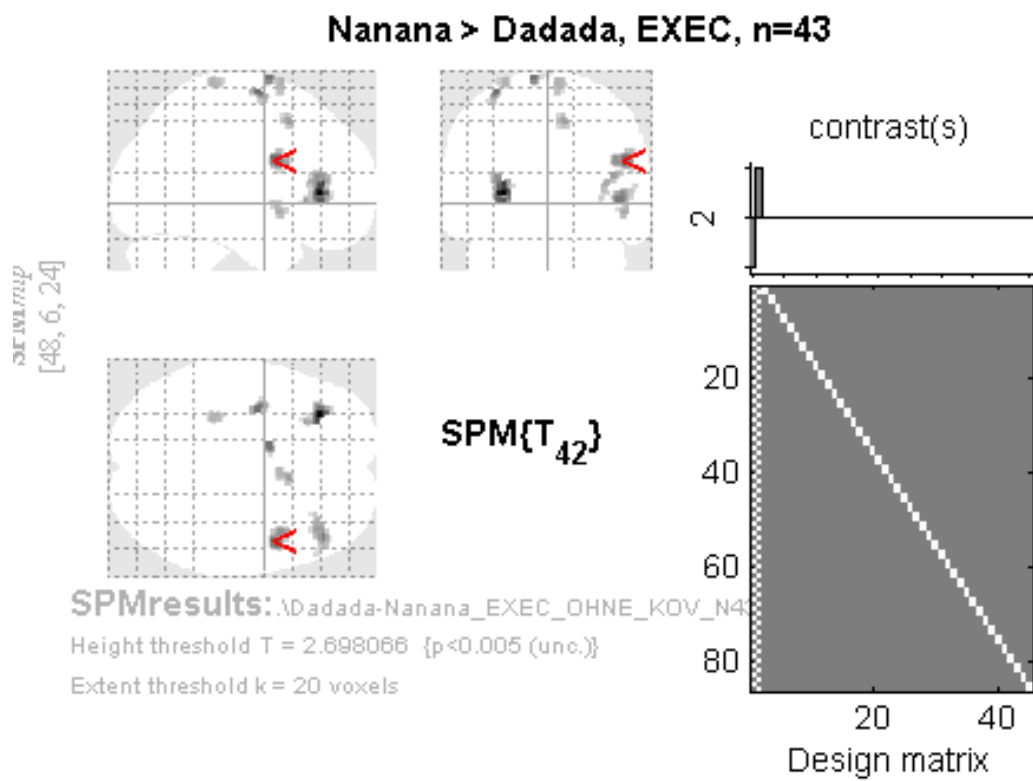


Abbildung 16: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/: Fokus auf den rechten Gyrus praecentralis

In Abb. 17 ist das Zentrum der Betrachtung auf das SMA gerichtet. Es ist erkennbar, dass auch in diesem Bereich eine vermehrte Aktivität für /'nanana/ herrscht. Darüber hinaus ist in dieser Abbildung auch vermehrte Aktivität im Bereich des linken Gyrus postcentralis erkennbar.

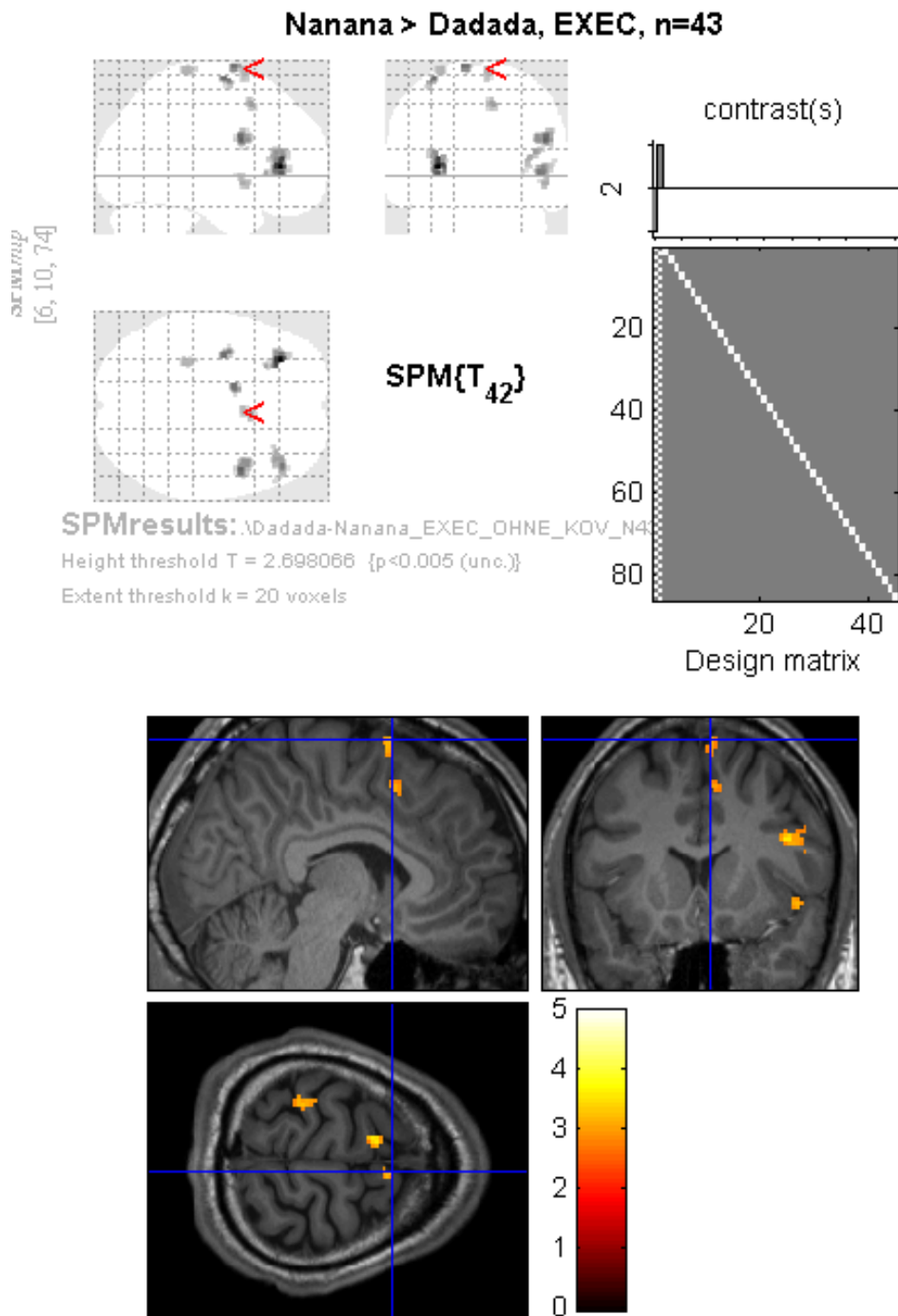


Abbildung 17: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/: Fokus auf das SMA

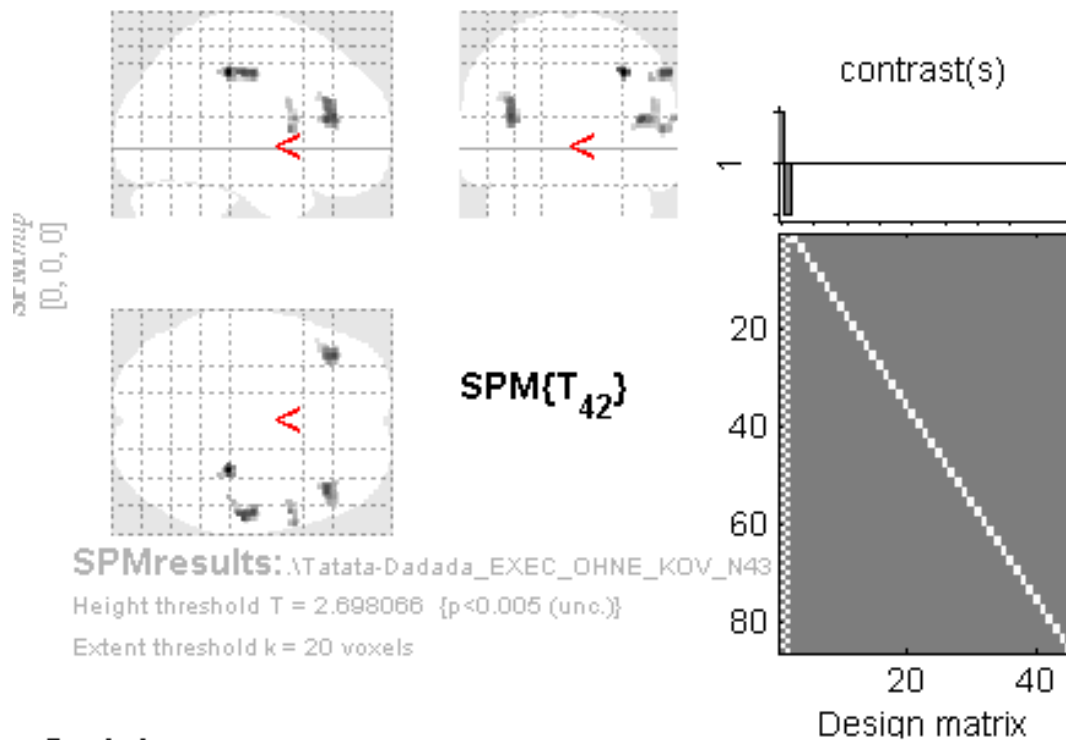
4.2.3 Ergebnisse der Berechnung /'dadada/ vs. /'tatata/

Wie bereits für die Gegenüberstellung /'dadada/ und /'nanana/ (Vgl. Kapitel 4.2.1.) konnte auch in diesem Fall keine Mehraktivierung für /'dadada/ gegenüber der Vergleichsilbe nachgewiesen werden.

4.2.4 Ergebnisse der Berechnung /'tatata/ vs. /'dadada/

Es werden die Areale dargestellt, die sich während der Produktion der Silbenfolge /'tatata/ im MRT als aktiv zeigen, für /'dadada/ jedoch keine Aktivität aufweisen. Insgesamt ergeben sich innerhalb der ROI-Maske fünf Aktivierungscluster (vgl. Abb. 18). Diese befinden sich vornehmlich in der rechten Hemisphäre, dort im Bereich des IFG, des Motorkortex und des Gyrus postzentralis. Innerhalb der linken Hemisphäre sind Aktivitäten im Bereich des IFG (= Broca-Areal) nachzuweisen (vgl. Abb. 19 und 20). Keine verifizierbaren Unterschiede haben sich für diese Bedingung in den Bereichen des SMA sowie der Inselrindenregionen ergeben.

Tatata > Dadada, EXEX, n=43



Statistics: *a-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level					mm	mm	mm
<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>k</i> _E	<i>a</i> _{uncorr}	<i>a</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>T</i>	(<i>Z</i>)	<i>a</i> _{uncorr}			
0.3575		0.953	1.000	29	0.321	0.396	0.421	4.08	3.72	0.000	32	-30	44
		0.702	1.000	71	0.127	0.790	0.421	3.60	3.34	0.000	60	-22	44
						0.994	0.640	3.03	2.87	0.002	48	-30	40
		0.695	1.000	72	0.125	0.790	0.421	3.60	3.34	0.000	44	30	16
						1.000	0.824	2.81	2.68	0.004	38	36	10
		0.547	1.000	94	0.083	0.791	0.421	3.60	3.34	0.000	-38	34	18
						0.904	0.421	3.42	3.19	0.001	-38	32	26
		0.863	1.000	47	0.209	0.952	0.421	3.30	3.09	0.001	56	8	10
						0.974	0.550	3.21	3.02	0.001	64	10	16
						0.998	0.824	2.93	2.78	0.003	50	8	22

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: T = 2.70, p = 0.005 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: k = 20 voxels, p = 0.412 (0.999) VHM = 11.2 11.1 11.0 mm mm mm; 5.6 5.6 5.5 {vox
 Expected voxels per cluster, <k> = 31.861 Volume: 227104 = 28388 voxels = 141.8 resels
 Expected number of clusters, <c> = 3.93 Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 171.78 v
 FWEp: 4.953, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: 151

Abbildung 18: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'tatata/ > /'dadada/

Tatata > Dadada, EXEX, n=43

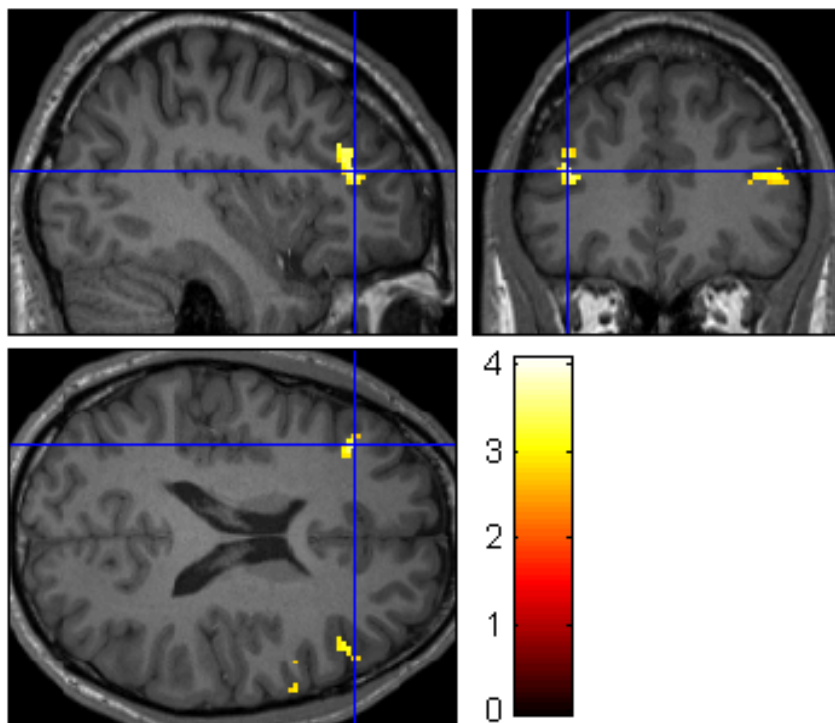
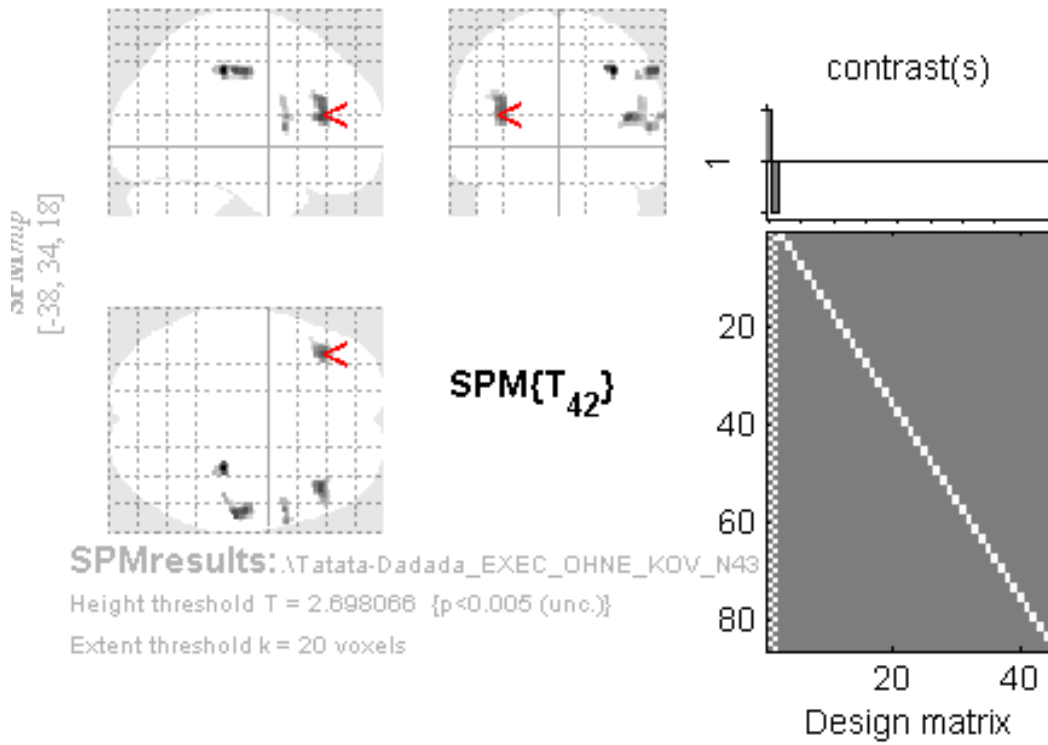


Abbildung 19: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'dadada/: Fokus auf den linken IFG (Broca)

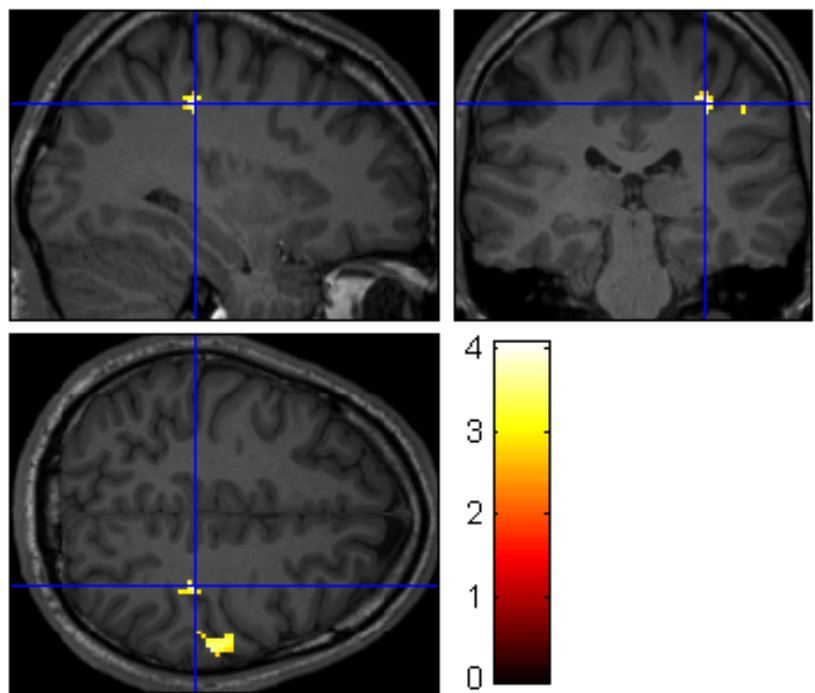
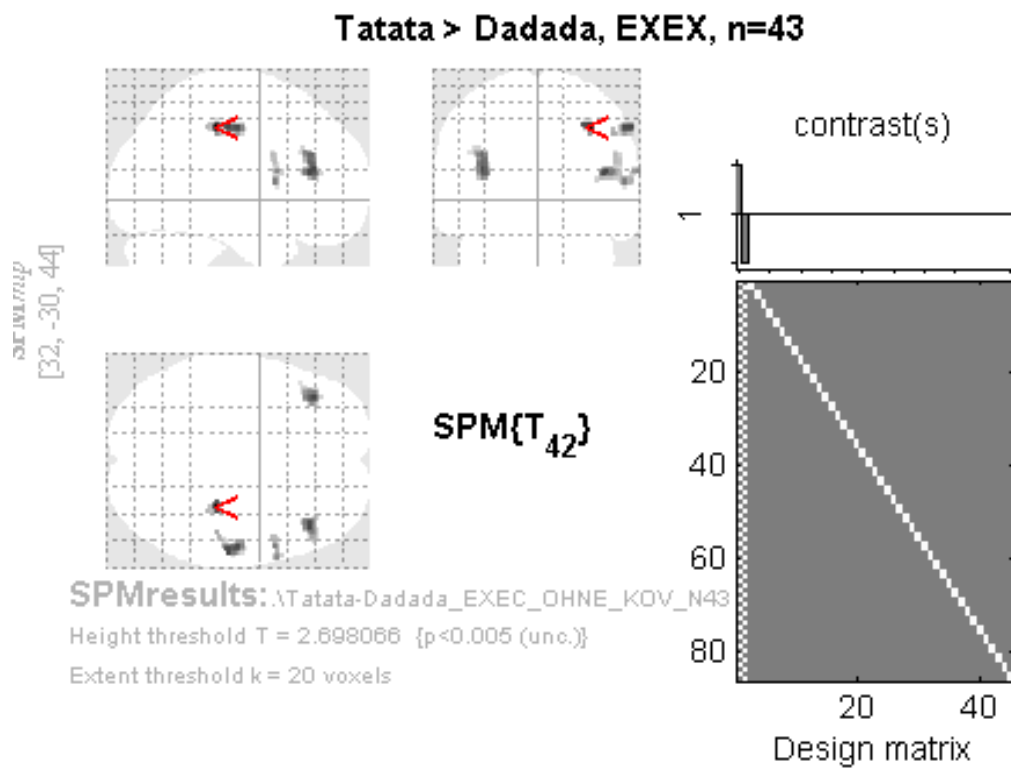
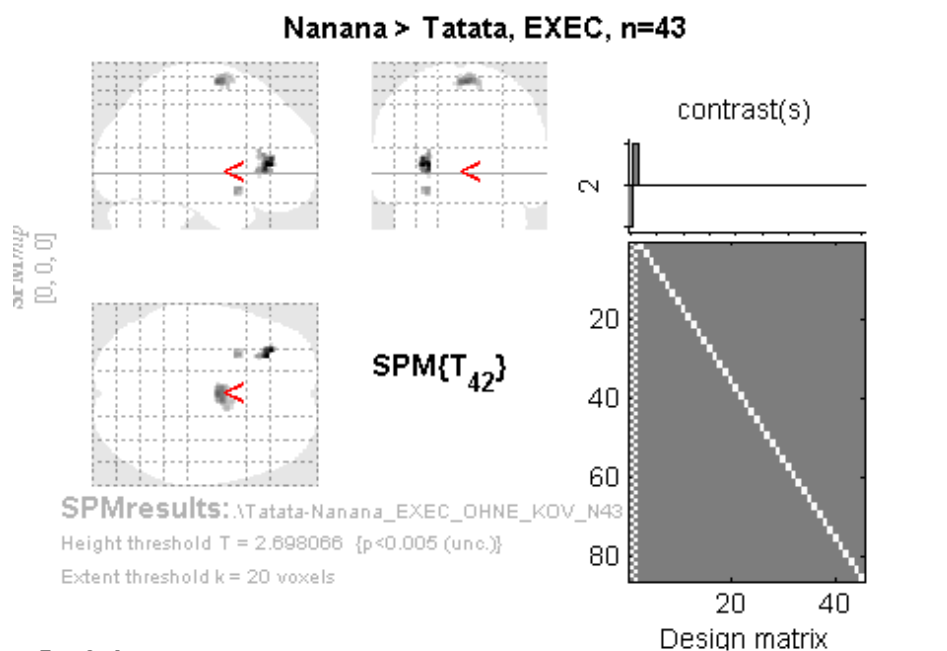


Abbildung 20: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'dadada/: Fokus auf den rechten Gyrus postcentralis

4.2.5 Ergebnisse der Berechnung /'nanana/ vs. /'tatata/

Bei der Gegenüberstellung der Silbenfolgen /'nanana/ und /'tatata/ zeigten sich lediglich drei Areale, die im Vergleich Mehraktivität aufweisen, dargestellt in Abbildung 21. Die aktiven Areale befinden sich im Bereich des SMA sowie in der linken Hemisphäre im Bereich des IFG und der anterioren Inselrindenregion. In den Abb. 22 bis 24 werden diese Regionen mittels darauf gerichteten Fokus einzeln dargestellt.



Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level					mm mm mm						
<i>p</i>	<i>c</i>	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>k</i> _E	<i>p</i> _{uncorr}	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>p</i> _{FDR-corr}	<i>T</i>	<i>Z</i> _{max}	<i>p</i> _{uncorr}							
0.7613		0.589	0.529	83	0.086	0.142	0.149	4.58	4.10	0.000	-26	32	4				
						0.935	0.369	3.38	3.16	0.001	-26	28	12				
						0.228	0.110	153	0.025	0.716	0.318	3.73	3.45	0.000	2	-6	66
						0.996	0.636	3.04	2.87	0.002	12	2	64				
0.982	0.529	20	0.387	0.965	0.462	3.29	3.08	0.001	-28	10	-14						

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: T = 2.70, p = 0.005 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: k = 20 voxels, p = 0.387 (0.999) *THM* = 10.8 10.7 10.7 mm mm mm; 5.4 5.4 5.3 {vox}
 Expected voxels per cluster, <k> = 28.776 Volume: 227104 = 28388 voxels = 157.0 resels
 Expected number of clusters, <c> = 3.99 Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 155.15 v
 FWEp: 4.985, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf

Abbildung 21: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/

Nanana > Tatata, EXEC, n=43

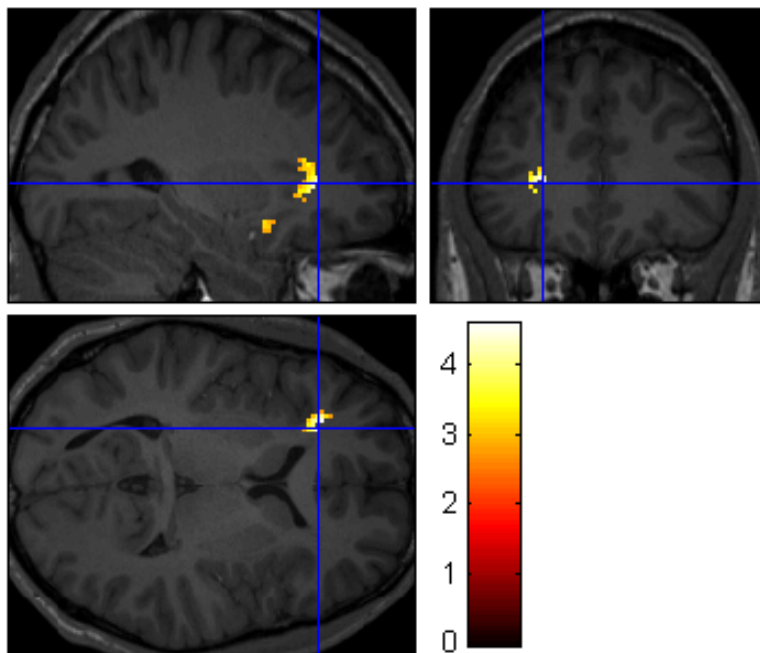
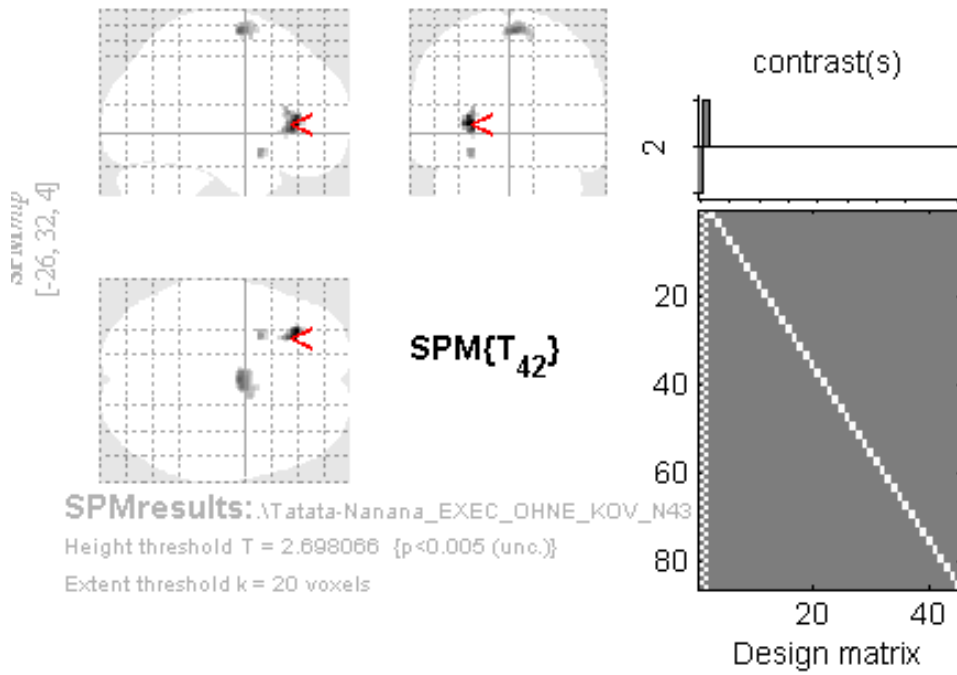


Abbildung 22: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/: Fokus auf den linkes IFG

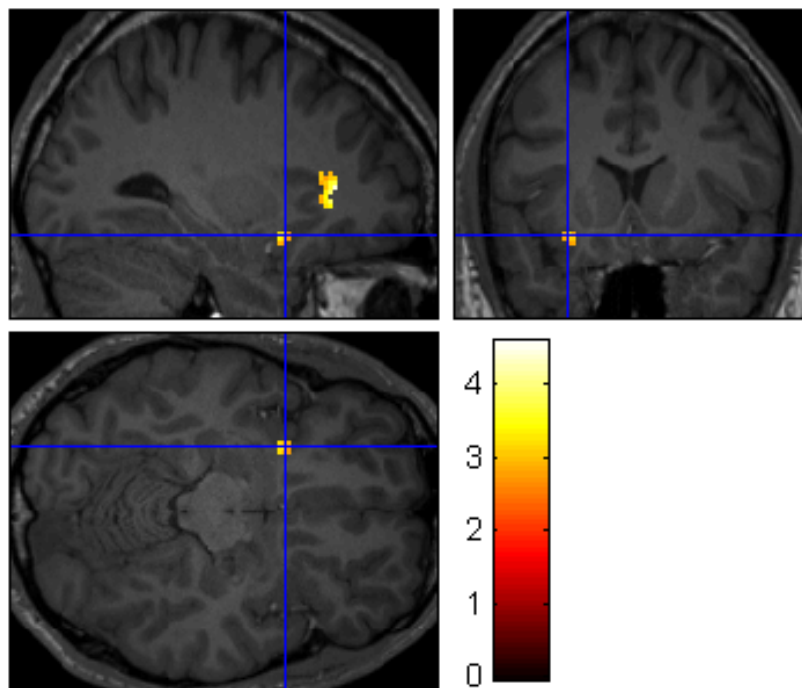
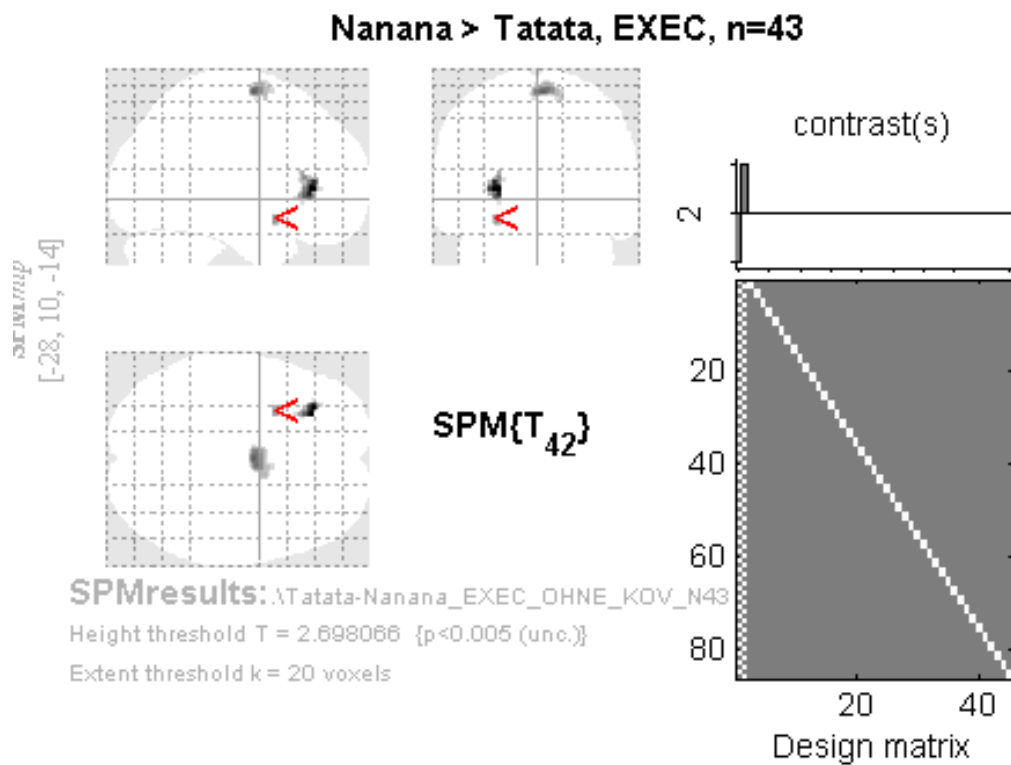


Abbildung 23: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/: Fokus auf die linke, anteriore Inselrindenregion

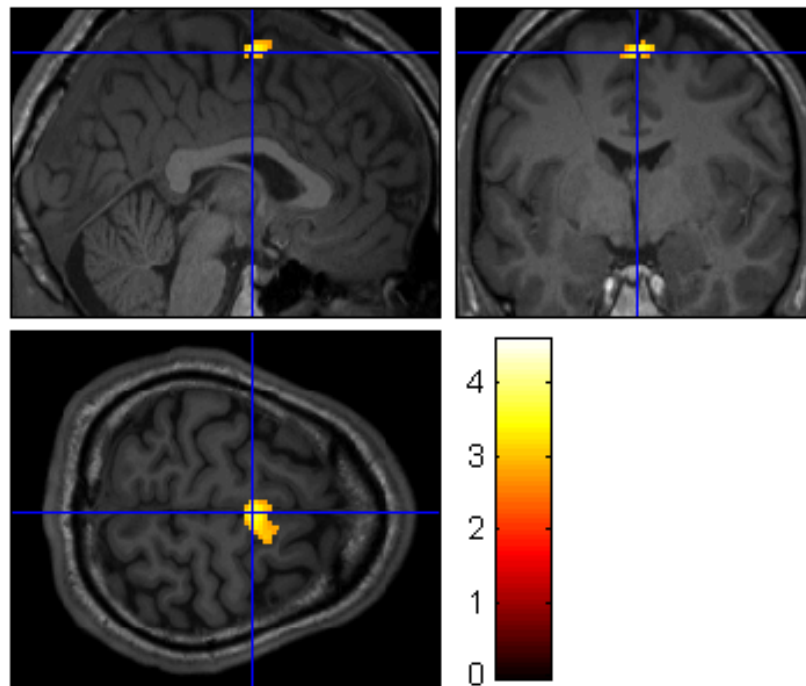
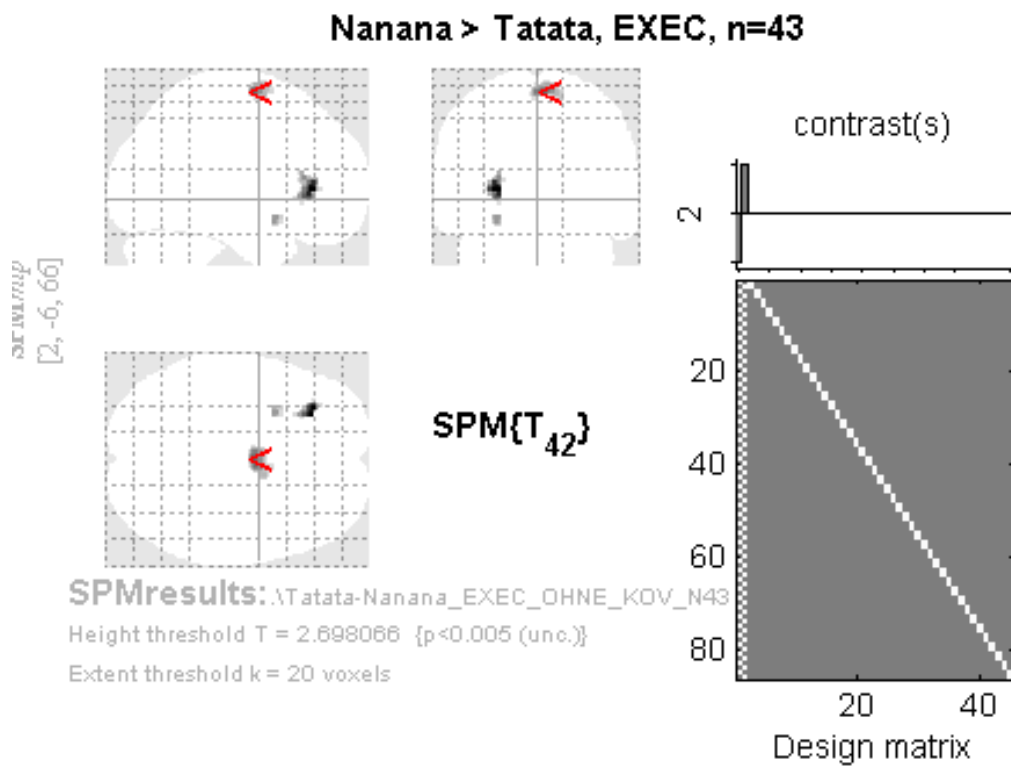
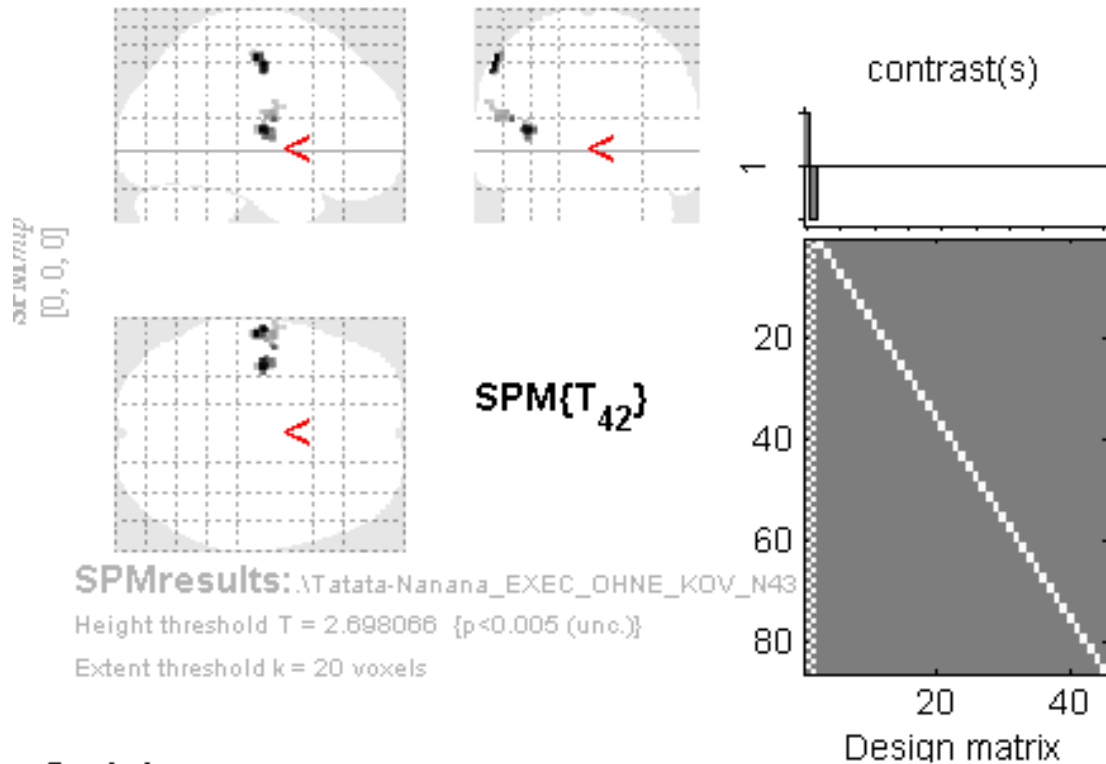


Abbildung 24: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/: Fokus auf das SMA

4.2.6 Ergebnisse der Berechnung /'tatata/ vs. /'nanana/

Abschließend erfolgt die Darstellung der Ergebnisse aus der Gegenüberstellung der Silbenfolgen /'tatata/ mit /'nanana/. In Abb. 25 werden alle aktiven Areale miteinander dargestellt. Aus der Berechnung ergaben sich insgesamt drei aktive Areale, die sich in der linken Gehirnhälfte im Bereich des Motorkortex und der Inselrindenregion befinden. In Abb. 26 wird ein aktives Areal im Bereich des Motorkortex mittels Fadenkreuz gekennzeichnet. Ein weiteres aktives Gebiet im Bereich des Motorkortex, jedoch weiter kaudal gelegen, ist in Abb. 27 zu erkennen. In Abb. 28 wird abschließend das aktive Areal im Bereich der Inselrindenregion genauer beleuchtet.

Tatata > Nanana, EXEC, n=43



Statistics: α -values adjusted for search volume

set-level		cluster-level			peak-level					mm	mm	mm	
α	c	$\alpha_{FWER-corr}$	$\alpha_{FDR-corr}$	k_E	α_{uncorr}	$\alpha_{FWER-corr}$	$\alpha_{FDR-corr}$	T	(Z_{α})	α_{uncorr}			
0.7613		0.926	0.815	35	0.252	0.849	0.494	3.55	3.30	0.000	-58	-14	48
		0.813	0.815	53	0.163	0.870	0.494	3.52	3.27	0.001	-36	-14	10
		0.904	0.815	39	0.227	0.981	0.567	3.20	3.01	0.001	-48	-8	16
						1.000	1.000	2.82	2.68	0.004	-60	-6	24

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: $T = 2.70$, $p = 0.005$ (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 42.0]
 Extent threshold: $k = 20$ voxels, $p = 0.387$ (0.983) $HM = 10.8$ 10.7 10.7 mm mm mm; 5.4 5.4 5.3 {vox}
 Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 28.776$ Volume: 227104 = 28388 voxels = 157.0 resels
 Expected number of clusters, $\langle c \rangle = 3.99$ Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 155.15 v
 FWERp: 4.985, FDRp: Inf, FWERc: Inf, FDRc: Inf

Abbildung 25: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster für die Bedingung /'tatata/ > /'nanana/

Tatata > Nanana, EXEC, n=43

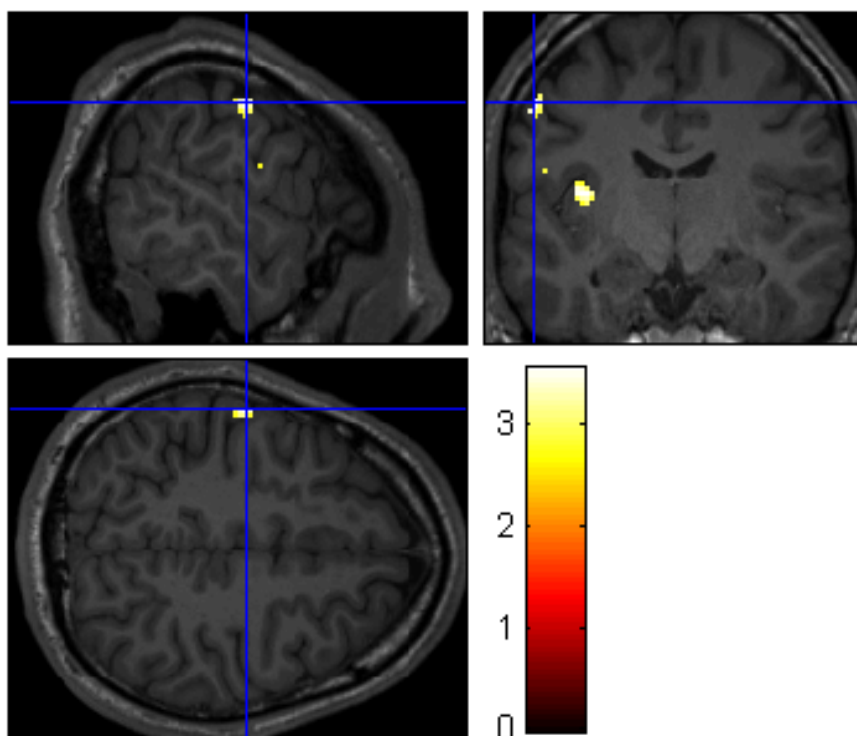
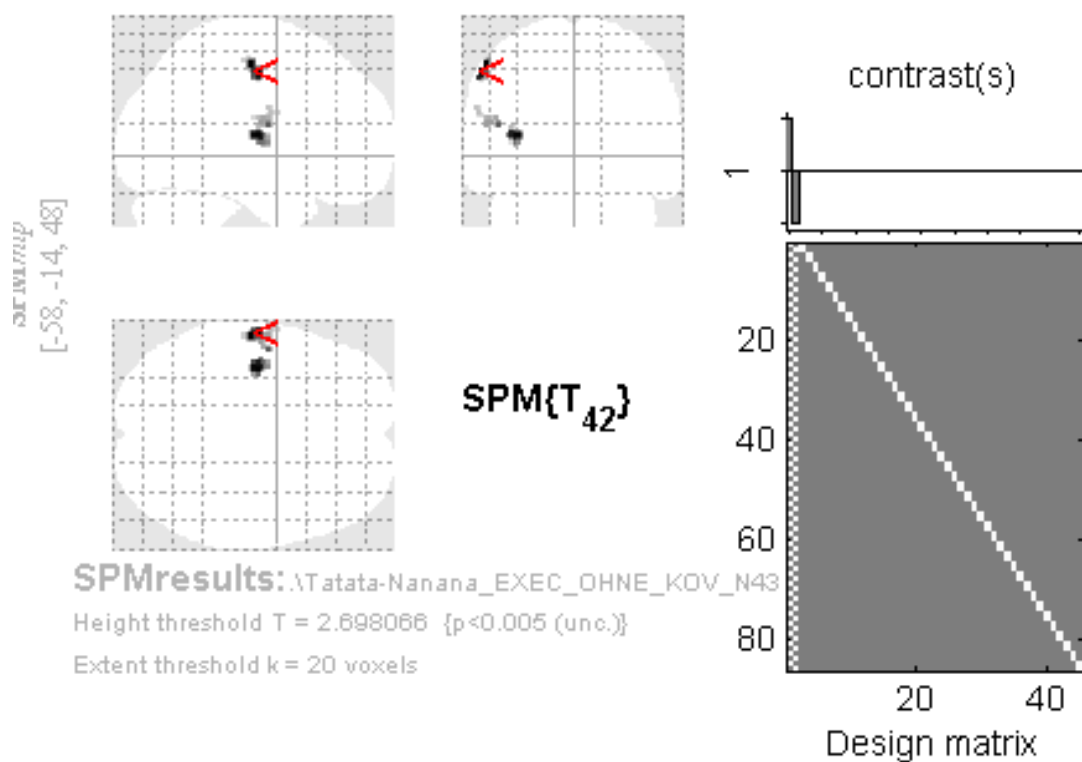


Abbildung 26: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'nanana/: Fokus auf den linken Motorkortex

Tatata > Nanana, EXEC, n=43

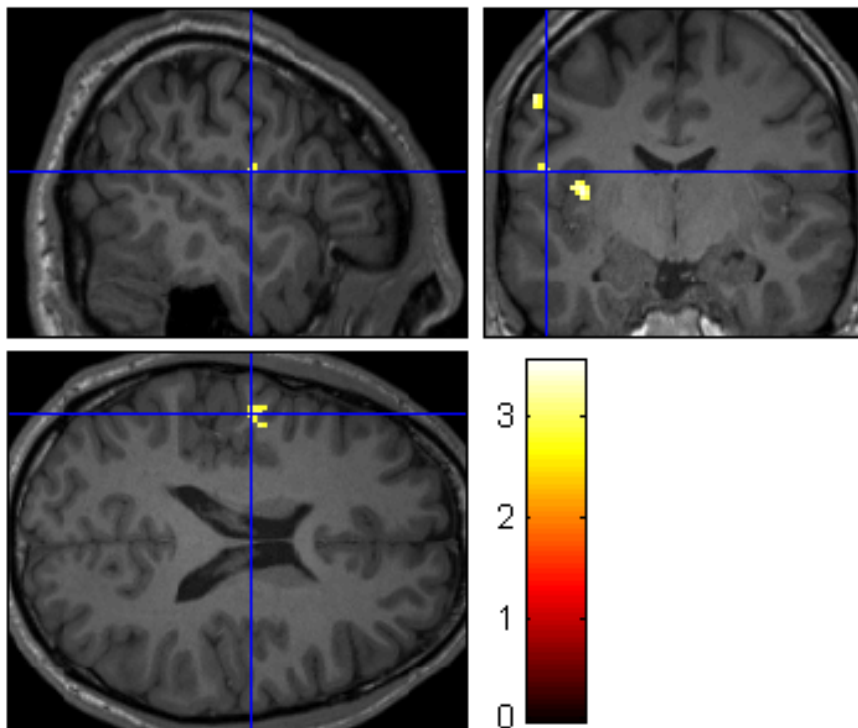
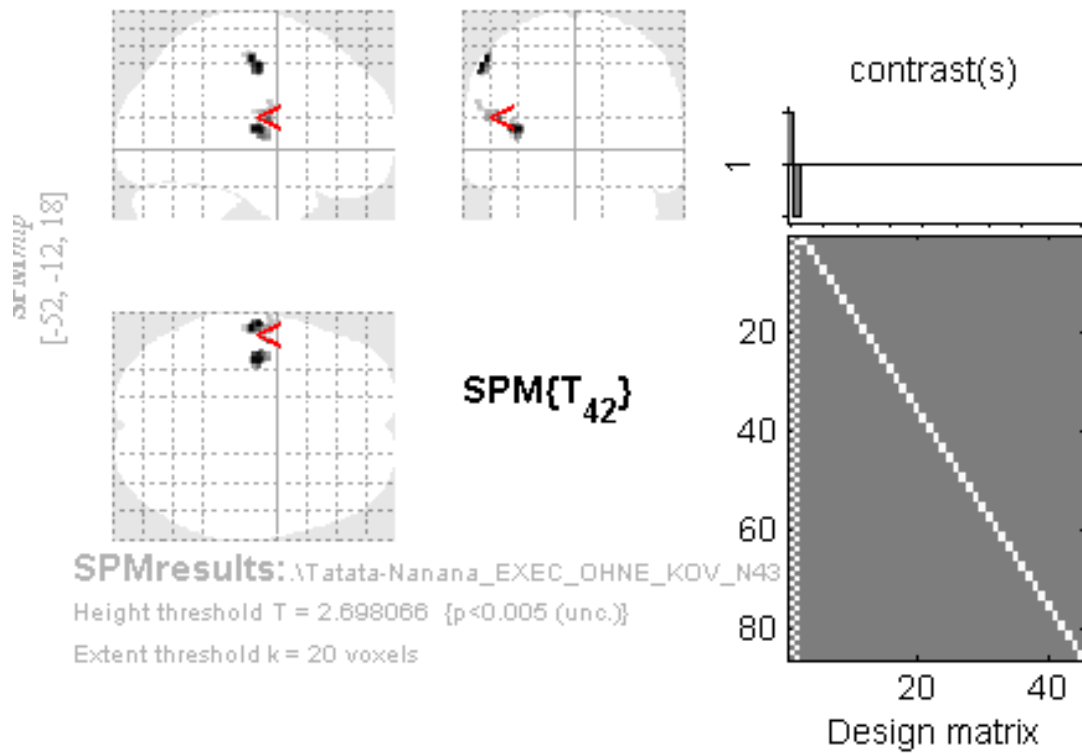


Abbildung 27: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /tatata/ > /nanana/: Fokus auf den linken Motorkortex, kaudaler Bereich

Tatata > Nanana, EXEC, n=43

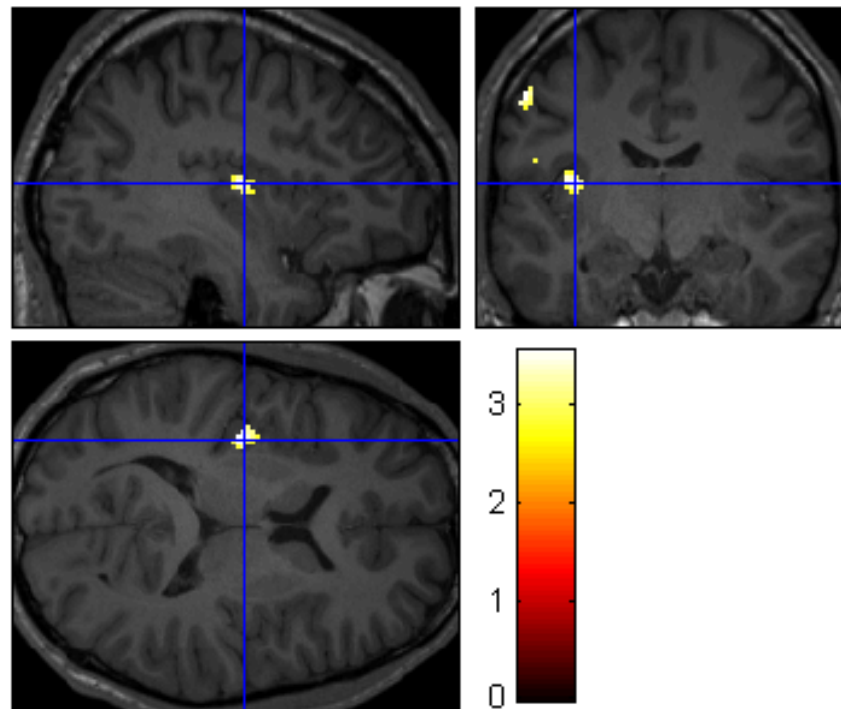
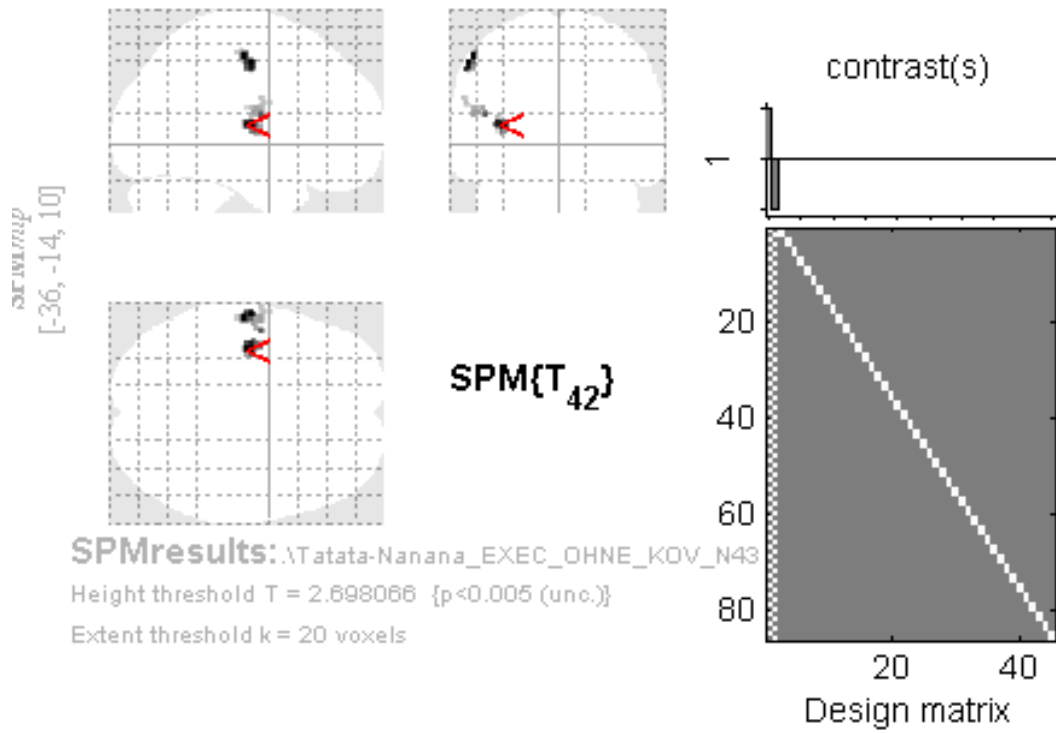


Abbildung 28: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'nanana/: Fokus auf die linksposteriore Inselrindenregion

4.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Gegenüberstellungen der einzelnen Exekutionen

Aufgrund der durchgeführten Ergebnisse konnte eindeutig aufgezeigt werden, dass Unterschiede in den Gehirnaktivitäten während der Artikulationen der einzelnen Silbenfolgen überhaupt vorhanden sind und weiter, dass sich diese anhand von MRT-Aufnahmen auch nachweisen und bildlich darstellen lassen. In Tab. 3 ist eine Zusammenfassung dieser Unterschiede zu sehen. Die Tabelle zeigt die Unterschiede im Detail auf, also, für welche Silbenfolgen sich Mehraktivitäten ergeben haben und grob auch, in welchen Gehirnregionen sich diese befinden. Dabei entspricht die senkrechte Randspalte den Silbenfolgen, für welche sich in den Gegenüberstellungen Mehraktivierungen den jeweiligen Silbenfolgen aus der waagrechten Randspalte ergeben haben. In den Kästen innerhalb der Tabelle sind die Mehraktivierungen dargestellt. Mehraktivität konnte für /'nanana/ gegenüber /'dadada/ und /'tatata/ nachgewiesen werden und für /'tatata/ gegenüber /'dadada/ und /'nanana/. Die Areale wiesen dabei unterschiedliche Lokalisationen auf. Für /'dadada/ konnte in keiner der Gegenüberstellungen Mehraktivierung nachgewiesen werden.

Tabelle 3: Darstellung der Mehraktivierungen der einzelnen Silbe gegenüber den anderen

		<i>Silbenfolgen, welchen gegenüber Mehraktivierung nachgewiesen wurden</i>			
		<i>></i>	<i>/'dadada/</i>	<i>/'nanana/</i>	<i>/'tatata/</i>
<i>Silbenfolgen, für die Mehraktivierungen nachgewiesen wurden</i>	<i>/'dadada/</i>			Keine Mehraktivierung	Keine Mehraktivierung
	<i>/'nanana/</i>	<u>Mehraktivierung:</u> Rechts: IFG, Motorkortex, Links: Motorkortex, Gyrus postzentralis Zentral: SMA			<u>Mehraktivierung:</u> Rechts: - Links: IFG, Motorkortex Zentral: SMA
	<i>/'tatata/</i>	<u>Mehraktivierung:</u> Rechts: IFG, Motorkortex, Gyrus postzentralis Links: IFG Zentral: -	<u>Mehraktivierung:</u> Rechts: - Links: Motorkortex, Insula Zentral: -		

5. Diskussion der Ergebnisse

Kernfrage der vorliegenden Arbeit war, ob es mittels fMRI- Aufnahmen möglich ist, minimale Unterschiede der Gehirnaktivität während der Aussprache unterschiedlicher Silben nachzuweisen. Die Studie zielt insbesondere darauf hin ab, künftig klinische Untersuchungen mit dem in der Arbeit angewandten oder einem darauf basierenden, weiterentwickelten Modell durchzuführen. Dass es Unterschiede hinsichtlich der neuronalen Ansteuerung für die einzelnen Silbenfolgen geben muss, lässt sich prinzipiell logisch ableiten. Mit der Verwendung verschiedener Silbenfolgen geht neben der Verwendung unterschiedlicher Artikulatoren zugleich die individuelle neuronale Ansteuerung ebendieser einher. Daher kann postuliert werden, dass es für unterschiedliche Silbenfolgen auch unterschiedliche neuronale Korrelate geben muss. Diese Unterschiede galt es nachzuweisen.

Im Folgenden soll zunächst aufgezeigt werden, inwiefern die gewonnenen Ergebnisse diese Kernfrage beantworten können. Im Anschluss daran erfolgt ein Vergleich mit der aktuellen Forschungsmeinung, um die gewonnenen Erkenntnisse einordnen zu können. Diverse Studien beschäftigten sich mit den intrazerebralen Abläufen während der Produktion von Sprache. Riecker konnte 2005 anhand einer fMRI-Studie zwei unterschiedliche Regelkreise ausmachen, einen für die Vorbereitung von Sprache, entsprechend dem Initiierungsteil dieser Arbeit, und einen für die motorische Ausführung. Da es bisher jedoch nie Gegenstand einer Studie war, sich mit dem Vergleich der Produktion unterschiedlicher Silben und der damit korrelierenden Gehirnaktivität zu beschäftigen, um herauszufinden, ob sich die hörbaren Unterschiede mittels hochspezifischer Bildgebung auch sichtbar nachweisen lassen, erwies sich diese Einordnung aufgrund der insgesamt nur spärlich vorhandenen Literatur allerdings als diffizil. Am ehesten können und sollen die gewonnenen Ergebnisse dieser Studie als Grundlage für weitere Untersuchungen in diesem Bereich dienen.

5.1 Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.1: Ergebnisse der Gegenüberstellung der Exekutionen aller Silbenfolgen vs. Baseline

Der Ablauf des Sehens, Erkennens und Verstehens von Buchstaben beziehungsweise Wörtern und die Weiterverarbeitung bis hin zur Produktion von verständlicher Sprache ist bereits sehr gut erforscht. Bestehende Studien beschreiben diesen Regelkreis des Ablaufs vom Sehen beziehungsweise dem Wahrnehmen von Schrift über die Verarbeitung der einzelnen Wörter bis hin zur Produktion von Sprache. Wie Riecker 2005 konnte auch Geranmayeh 2014 diverse Netzwerke nachweisen, die die Planung und auch die Ausführung der Sprachproduktion koordinieren. Ebenfalls mit Netzwerken während der Planung, dem Verstehen und der Produktion von Sprache und den Beeinflussungen von bestimmten Erkrankungen auf diese, hat sich Awad 2007 beschäftigt. Die Grundzüge dieser erforschten Netzwerke gelten als sehr sicher und haben teilweise Einzug in die heutigen Lehrbücher der Medizin gehalten. Betrachtet man beispielsweise den von Trepel 2012 dargestellten Regelkreis, wird gelehrt, dass alles zunächst mit dem Sehen beziehungsweise dem Lesen beginnt. Durch das Lesen von Wörtern wird die Sehrinde, also die Areale 18 (primäre Sehrinde) und 19 (sekundäre Sehrinde) nach Brodmann, im Okzipitallappen aktiviert. Von dort aus wird der Reiz aus der Sehrinde über den Gyrus angularis weiter zum sensiblen Sprachzentrum im Gehirn, dem sogenannten Wernicke-Sprachzentrum, hin weitergeleitet. Dieses ist zuständig, die Semantik der gelesenen Wörter zu verarbeiten und zu verstehen. Bis zu diesem Punkt läuft der Reihe nach Sehen, Erkennen und Verstehen ab.

Die Aktivität der Sehrinde konnte in diesem Versuch eindeutig nachgewiesen werden (vgl. Abb. 6). Doch wie verhält es sich mit den beiden ebenfalls erwähnten Regionen, dem Gyrus angularis und dem Wernicke-Sprachzentrum? Wie in Kapitel 3.2 dieser Arbeit dargestellt, war es unter anderem ein Ziel der verwendeten LabView-Präsentation, die Aktivität dieser Teile durch Erkennen und Verstehen von Buchstaben zu vermeiden. Durch Ausschaltung dieser Bereiche bleibt der Fokus auf den für diese Arbeit wichtigen Regionen. Die Aktivität zu vieler, für das Ziel dieses Experimentes nicht relevanter aktiver Gehirnareale sollte möglichst vollständig vermieden werden.

Für den geplanten Versuchsaufbau war das Sehen erforderlich, denn die Probanden mussten die Symbole der Zeichenfolge aus der LabView-Präsentation erkennen. Das Sehen konnte bei diesem Versuch nicht abgekoppelt werden, da sonst der ganze Versuchsaufbau nicht möglich gewesen wäre. Schließlich mussten die Probanden die Symbole der Zeichenfolge aus der LabView-Präsentation sehen und erkennen können. Der Nachweis von Aktivität der Sehrinde ist demnach eine logische Schlussfolgerung. Hinsichtlich der beiden anderen, oben besprochenen Bereiche wird bei der Reflexion der Ergebnisse dieses Kapitels ersichtlich, dass dieser Teil des Experiments als gelungen bezeichnet werden kann. Denn es ließen sich weder im Bereich des Gyrus angularis, welcher als höheres Assoziationszentrum insbesondere für die Verschaltung zwischen Seh- und Hörrinde zuständig ist und damit auch für Lesen und Schreiben (Trepel 2012), noch im Bereich des Wernicke-Sprachzentrums, welches im Schläfenlappen liegt und für das Verständnis und die Produktion von Wörtern und Sprachen zuständig ist (Roth 1999), Aktivitäten nachweisen. Dadurch wird deutlich, dass diese Bereiche für die Produktion bzw. Generation im Sinne der motorischen Planung und Durchführung der Sprache selbst keine Rolle spielen. Neue Erkenntnisse hinsichtlich neuronaler Aktivität des Regelkreises für das Erkennen und Verstehen von Schrift und Sprache konnte diese Studie nicht beitragen, was aber auch nicht deren Ziel war. Bemerkenswert ist jedoch, dass das verwendete Versuchsmodell hinsichtlich der Ausschaltung der besprochenen Areale auch in dieser Studie erfolgreich war. Damit kann bei zukünftigen Versuchen, bei denen die reine Motorik bzw. die neuronale Ansteuerung von Sprache untersucht werden soll, auf dieses Modell zurückgegriffen werden.

Wird der neuronale Regelkreis entsprechend der derzeit geltenden Auffassungen weiterverfolgt, wird angenommen, dass der Reiz, der durch die gesehene und verarbeitete Schrift entsteht, vom sensiblen weiter an das motorische Sprachzentrum, das Broca-Sprachzentrum, mit angrenzender Rinde weitergeleitet wird. Von dort erfolgt die Initiierung der Sprache über das Kleinhirn zum Thalamus. Davon ausgehend, aber auch teilweise direkt vom Broca-Areal aus, gelangt der Reiz zum Motorkortex, beziehungsweise dem SMA (Trepel 2012). In diesem Bereich werden die notwendigen Bewegungen für die Artikulation des jeweilig zu produzierenden Lautes geplant und schließlich zu den erwünschten Artikulatoren, also Kehlkopf, Zunge, Kiefer, Lippen aber auch Brustkorb sowie an alle sonstigen Bereiche in der Peripherie, die für die Produktion von Sprache notwendig sind, weitergeleitet. All diese Stationen des Regelkreises konnten in diesem Versuch nachgewiesen werden.

Es ging in dieser Studie nicht darum, Regelkreise zur Generierung von Sprache zu bestätigen (was jedoch der Fall ist, gerade aufgrund der hohen Anzahl von Probanden, unabhängig der Zielsetzung) oder gar neue Erkenntnisse dazu beizutragen. Die Erkenntnisse sind trotzdem dargestellt, da nachgewiesen werden konnte, dass sich diese mit dem allgemeinen Wissensstand zu diesem Thema decken. Es konnte suffizient gezeigt werden, dass der gewählte Versuchsaufbau sinnvoll und erfolgreich gestaltet ist.

Neben den zu erwartenden Aktivitäten im Rahmen des untersuchten Regelkreises konnten weiterhin Aktivitäten im Bereich des Gyrus cinguli und der Insula, jeweils beidseits, nachgewiesen werden (vgl. Abb. 4 - 7). Der Gyrus cinguli als Teil des limbischen Systems hat gewisse emotionale Funktionen, ist aber auch, vor allem im anterioren Bereich, zuständig für kognitive Aufgaben, im Bereich Konzentration sowie Auf- und Bearbeitung von Aufgaben (Barbas 2007; Mohany 2007). Der posteriore Bereich dagegen besitzt eher Zuständigkeit für die Wiedererkennung von Objekten (Sugiura 2005). Als möglicher Grund für die Aktivität in diesem Bereich könnte neben der notwendigen Konzentration auf die kommende Aufgabe auch die Verwendung der beschriebenen Silbenfolgen in dieser Studie gelten, da diese durch Objekte dargestellt wurden. Ein weiterer Grund für Aktivität im Bereich des Gyrus cinguli könnte aber auch die mögliche semantische Bedeutung der Silbenfolge (/nanana/) sein. Dies wird in dem für diese Silbenfolge speziellen Abschnitt (vgl. Kapitel 5.2.) noch einmal genauer besprochen. Die Aufgaben der Inselrinde sind noch nicht vollständig erforscht. Vermutet wird vor allem Beteiligung bei der Bearbeitung von Emotionen und Empathie im Sinne von Spiegelneuronen (Pfeifer 2008), was für diese Studie keine große Relevanz hat. Außerdem soll sie neben viserosensiblen auch somatosensible Reize verarbeiten und wäre damit an der Wahrnehmung der Lage bestimmter Körperareale und damit auch Artikulatoren beteiligt (Trepel 2012). Auch diese Funktion scheint für die Produktion von Sprache notwendig zu sein, dies hinsichtlich der richtigen Koordination der für das Sprechen notwendigen Bereiche im Mund- / Nasen- und Rachenraum. Weiterhin soll die Insula auch eine Rolle beim Treffen von riskanten Entscheidungen in emotionalen Situationen innehaben (Clark 2008). Auch wenn Emotionen während der Messungen im MRT vermutlich nicht sonderlich ausgeprägt waren, könnte die schnelle Notwendigkeit einer Entscheidung ein möglicher Grund für Aktivität in diesem Bereich sein. Denn für jede Produktion musste jede symbolisierte Silbenfolge erneut identifiziert und verarbeitet werden. Es musste demzufolge schnell entschieden werden, welche Silbenfolge ausgesprochen werden soll. Nicht zuletzt

wird ihr aber auch eine Rolle bei der Generierung von Sprache zugewiesen, als eine Art Verbindungsstück zwischen den beiden Sprachzentren nach Wernicke und Broca (Ardila 2016). Diese Funktion wird vermutlich der Hauptgrund für Aktivität der Insula während der Artikulation der Silbenfolgen sein. Weiterhin könnte die Insula selbst auch eine bisher unbekannte direkte Funktion bei der Produktion von Sprache haben. Um dies weiter herauszufinden, sollten auch in dieser Hinsicht weitere Forschungen mit speziellem Fokus auf die Insula betrieben werden.

5.2 Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.2: Ergebnisse der Gegenüberstellung der einzelnen Silbenfolgen vs. Baseline

In Abschnitt 4.1.2 wurden anhand der Subtraktionsmethode die jeweilig nur während der Produktion einer bestimmten Silbenfolge aktiven Areale dargestellt. Koch hat sich 2012 mit dieser Thematik bereits auseinandergesetzt und konnte dabei zeigen, dass sich im Vergleich Exekution vs. Baseline signifikante Unterschiede nachweisen lassen. Somit sind aus den durchgeführten Berechnungen keine neuen Erkenntnisse zu erwarten, es sollte aber das Studiendesign noch einmal bestätigt werden, um somit die Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen dieser Arbeit zu definieren. Dennoch konnten einige bemerkenswerte Auffälligkeiten festgestellt werden. Zunächst einmal ist bei der Analyse dieser Ergebnisse bereits zu erkennen, dass sich die aktiven Areale für die jeweilig produzierten Silbenfolgen nicht komplett decken, sondern für jede Silbenfolge ein unterschiedliches Aktivierungsmuster herrscht. Es lässt sich bereits an diesem Punkt vermuten, dass Unterschiede in der neuronalen Ansteuerung der einzelnen Silben vorhanden sind, die sich auch bildlich darstellen lassen. Für die Silbenfolge /'dadada/ stellt sich beispielsweise geringere Aktivität im Bereich der Basalganglien, des Gyrus cinguli sowie des Motorkortex dar (vgl. Abb. 8 und 9).

Für den Kontrast /'nanana/ vs. Baseline lassen sich Unterschiede im Aktivierungsmuster im Vergleich zu den anderen Silbenfolgen erkennen, jedoch deutlich weniger ausgeprägt als für /'dadada/, was scheinbar in der weniger komplexen motorischen Leistung für /'dadada/

begründet ist (Pützer 2008). Insgesamt ergeben sich aus den Berechnungen für die Silbenfolge /'nanana/ hauptsächlich Aktivitäten im Bereich des SMA, des Gyrus cinguli, des Motorkortex mit Broca-Areal, des Kleinhirns, des Okzipitallappens, der Basalganglien und der Insularegion (vgl. Abb. 10 – 12). Was für diese Silbenfolge besonders auffällt, ist die im Gegensatz zu den anderen Silben deutlich vermehrte Aktivität im Bereich der Basalganglien. Als Zentrum des extrapyramidal motorischen Systems besitzen die Basalganglien eine wichtige motorische Funktion (Vgl. Mayer 2014). Vor allem das Erlernen (Poldrack 1999) und die Kontrolle (Trepel 2012) motorischer Bewegungen wird ihnen zugeordnet, dies insbesondere dem Striatum mit Nucleus caudatus. Dieser wiederum scheint auch Funktionen zu haben, die über die Steuerung der Willkürmotorik hinausgehen. Gemeinsam mit dem Thalamus besitzt er Funktionen bei der Verarbeitung von Sprache (Ketteler 2008). Auch Vorstellung und Verarbeitung emotionaler Situationen in naher Zukunft, wenn auch eher mit positiven Ereignissen verbunden, scheinen mit dem Nucleus caudatus verknüpft zu sein (D'Argembeau 2008). Dies könnte eine Erklärung für vermehrte Aktivität speziell in diesem Bereich sein. Denn wenn man selbst für sich /'nanana/ laut wiederholt, fällt auf, dass diese Silbenfolge - nur im deutschen Sprachgebrauch natürlich - eine gewisse semantische Bedeutung hat, im Sinne einer Tadelung, beispielsweise von Eltern einem kleinen Kind gegenüber, wenn dieses etwas Unangemessenes tut. Neben den erhöhten motorischen Anforderungen für diese Silbenfolge könnte sich auch dadurch eine Mehraktivierung in diesem Bereich erklären lassen, da unterbewusst bei den Probanden dieser emotionale Teil während der Artikulation dieser Silbenfolge angesprochen wurde. Wissenschaftlich zu beweisen ist diese Beobachtung zu diesem Zeitpunkt nicht, in nachfolgenden Studien mit diesem Versuchsmodell sollte dennoch eventuell überlegt werden, diese Silbenfolge eventuell durch eine andere, ähnliche, aber ohne semantische Bedeutung auszutauschen, um zu überprüfen, ob diese Mehraktivierung tatsächlich an dieser bestimmten Silbenfolge lag.

Für die Bedingung der Silbenfolge /'tatata/ zeigten sich deutliche Aktivitäten im Bereich des Okzipitallappens mit Sehrinde, des Motorkortex der linken Hemisphäre, des Cerebellums, der Basalganglien, des SMA und ebenfalls auch im Bereich des Gyrus cinguli und der Inselrindenregion (vgl. Abb. 13). Auch bei der Untersuchung der Ergebnisse für diese Silbenfolge ist ersichtlich, dass sich das Aktivitätsmuster im Vergleich zu den anderen Silbenfolgen vor allem im Bereich der Basalganglien unterscheidet. In diesem Bereich ist die

neuronalen Aktivität für diesen Kontrast nicht so stark ausgeprägt wie vor allem für die Produktion von /'nanana/. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Silbenfolge /'nanana/ durch ihre emotionale Konnotation mehr Aktivität im Bereich des Nucleus caudatus zur Folge haben könnte. Außerdem fällt in dem Bereich des rechten Motorkortex eine etwas geringere Aktivität im Vergleich zu den anderen Silbenfolgen auf. Die Darstellung und Diskussion, in welchen Bereichen sich die Unterschiede der Aktivitätsmuster für die einzelnen Silbenfolgen genau befinden, findet in den folgenden Kapiteln statt.

Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle sagen, dass die wichtigste bisherige Erkenntnis dieser Arbeit die Bestätigung der Ergebnisse der Arbeit von Koch ist. Auch im vorliegenden Experiment ließen sich signifikant aktive Areale im Vergleich Exekution vs. Baseline nachweisen. Das bedeutet, dass für die Aussprache einzelner Silbenfolgen bestimmte Gehirnareale aktiv sein müssen und weiter, dass diese sich auch bildlich darstellen lassen.

In den weiteren Abschnitten soll nun diskutiert werden, inwiefern sich die minimalen Unterschiede in der neuronalen Ansteuerung, die bisher schon indirekt nachgewiesen wurden, einzeln und spezifisch darstellen lassen. Dies geschieht, indem die unterschiedlichen Aktivitätsmuster während der Aussprache der einzelnen Silbenfolgen gegeneinander berechnet werden. Somit kann einmal die Behauptung beantwortet werden, dass sich diese minimalsten Unterschiede in der Gehirnaktivierung überhaupt darstellen lassen und weiterhin diskutiert werden, in welchen Bereichen sich die jeweiligen Unterschiede genau befinden und weshalb dort Unterschiede im Aktivierungsmuster vorhanden sein könnten.

5.3 Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.2: Ergebnisse der Gegenüberstellungen der einzelnen Silbenfolgen gegeneinander

Gegenstand der folgenden Ausführungen ist der Hauptaspekt dieser Arbeit und die damit verbundene Fragestellung: Lassen sich Aktivitätsunterschiede im Vergleich der einzelnen Silbenfolgen untereinander nachweisen? Es sollten die Unterschiede in der neuronalen Ansteuerung, die bereits für die einzelnen Silben nachgewiesen werden konnten, gegeneinander verglichen und genauer untersucht werden. Dies geschah zum einen deshalb, um herauszufinden, ob sich diese minimalen Unterschiede in der neurologischen Ansteuerung überhaupt nachweisen lassen, und zum anderen, um herauszufinden, was die jeweiligen Ursachen für die Unterschiede sein könnten. Die Gegenüberstellung der Aktivitäten gelang mittels der Verwendung einer ROI- Maske, da so die zu beobachtenden Regionen eingegrenzt werden konnten. Diese Versuchsanordnung ermöglichte die genauere Betrachtung derjenigen Hirnregionen, die für die Produktion von Sprache als wichtig erschienen. Vornehmlich sollte es in dieser Arbeit jedoch nicht um die Regionen selbst und die mögliche Bedeutung für eine Aktivierung in diesem Bereich gehen, sondern in erster Linie darum, herauszufinden, ob sich überhaupt Unterschiede darstellen lassen. Im Anschluss daran an den Nachweis werden sich ergebende Anhaltspunkte für Aktivitäten der jeweiligen Regionen unter Einbeziehung bereits vorliegender Literatur dargestellt. Nach aktuellem Wissenstand scheint dies die erste Studie zu sein, die sich mit der Frage beschäftigt, ob sich solche minimalen Unterschiede in der Artikulation durch eine bildgebende Methode darstellen lassen. Vergleichbare Literatur liegt nur sehr begrenzt vor, angemessene Vergleiche zu ziehen ist daher schwierig. Deshalb werden im Rahmen dieser Diskussion Gedankenkonstrukte aufgestellt, die sich nicht vollständig auf bestehende Evidenz stützen können. Die vorliegende Arbeit soll damit einen ersten Schritt in diese Richtung gehen und Anhaltspunkte für kommende Studien liefern, anhand derer vertieft weiter geforscht werden soll, um die dargelegten Theorien weiter auszubauen oder zu widerlegen.

5.3.1 Diskussion der Ergebnisse der Kapitel 4.2.1 und 4.2.2: Ergebnisse der Gegenüberstellung /'dadada/ und /'nanana/

Für den Kontrast /'dadada/ > /'nanana/ ließen sich keine aktiven Areale zugunsten der Silbenfolge /'dadada/ berechnen, was bedeutet, dass die Lautbildung von /'dadada/ keine Mehraktivierung im Gehirn gegenüber /'nanana/ generieren kann. Würde man nur diesen Vergleich zur Beurteilung heranziehen, so wäre unklar, ob dies daran liegt, dass sich für /'dadada/ aufgrund der geringeren motorischen Komplexität keine Mehraktivierung nachweisen lässt oder ob der Versuch tatsächlich nicht gelungen ist und sich Aktivitätsunterschiede zwischen den einzelnen Silbenfolgen nicht nachweisen ließen.

Für den Kontrast /'nanana/ > /'dadada/ konnte allerdings eindeutige Mehraktivierung nachgewiesen werden. Somit ist die eine Kernfrage, ob sich Unterschiede nachweisen lassen, an diesem Punkt positiv zu beantworten. Es ist demnach bestätigt, dass die Artikulation von /'nanana/ vermehrt neuronale Aktivität generiert und diese sich auch bildlich anhand der getätigten fMRI-Aufnahmen darstellen lässt.

Insgesamt ließen sich in allen, mittels erwähnter ROI-Maske untersuchten Arealen Mehraktivierungen nachweisen. Die größte Mehraktivierung zeigt sich in Bereich des IFG der linken Hemisphäre, in der Region, in der sich auch das motorische Sprachzentrum (Broca-Areal) befindet, sowie in der angrenzenden anterioren Inselrindenregion der linken Hemisphäre. Auch wenn die Rolle des Broca-Areales für Sprachproduktion in der Literatur noch nicht vollständig geklärt ist, spricht Aktivität in diesem Bereich dafür, dass die motorische Arbeit, die für die Produktion von /'nanana/ verrichtet werden muss, komplexer ist als die für /'dadada/, bzw. dass die Arbeit für /'nanana/ in mehreren Gehirnregionen generiert wird. Neben der klassischen Vermutung, dass das Broca-Areal für die Motorik sämtlicher Artikulation zuständig ist, gibt es weiterhin auch andere Vermutungen. Flinker behauptet, dass dieses Areal nur während der Initiierung von Sprache aktiv ist und im Sinne eines Koordinators fungiert, um alle Informationen, die es während der Initiierung gibt, für die letztliche motorische Ausführung vorzubereiten. Während der Exekutionsphase sei das Broca-Areal jedoch nicht aktiv. Die Ergebnisse dieser Studie unterstützen Flinkers Vermutung allerdings nicht, denn in diesem Versuch war das Broca-Areal auch während der Exekution aktiv. Welche Funktion das Broca-Areal haben mag, das konnte und sollte nicht Gegenstand

dieser Arbeit sein und deshalb nicht geklärt werden. Eine Begründung für Aktivität, welche sich im Bereich der Inselrinde unter anderem auch für diesen Kontrast abzeichnet, kann ebenfalls nicht abschließend gegeben werden und sollte in weiteren Untersuchungen jedoch geklärt werden. Allerdings ergab sich in diesem Areal Aktivität für beinahe alle Kontraste, weswegen diese Region auch mit in die ROI-Maske aufgenommen wurde. Mögliche Gründe wurden bereits in Kapitel 5.1 genannt, wobei der Hauptgrund eine mögliche Eigenschaft als Verbindungsstück zwischen dem Wernicke- und dem Broca- Sprachzentrum sein kann (Ardila 2016). Weitere Aktivitäten ließen sich beidseitig im Bereich des Motorkortex und des SMA nachweisen. Außerdem ergab sich auch Aktivität im Bereich des rechtsseitigen IFG, welcher Funktion hinsichtlich der Inhibitionskontrolle während des Sprechens haben soll (Neef 2016). Beachtenswert ist die Region mit Mehraktivierung im Bereich des Motorkortex. Dieses aktive Areal deckt sich mit dem Areal, für welches es die Vermutung gibt, zuständig für motorische Bewegungen im Bereich der Larynx zu sein (Brown 2008). Dies stimmt mit der Behauptung überein, dass die Produktion von /'nanana/ im Vergleich zu /'dadada/ einen laryngealen Anteil in der Produktion hat, dessen Bewegungen innerhalb dieses Bereiches des Motorkortex geplant werden. Dass diese Region für diese Silbenfolge aktiv ist, jedoch für die Silbenfolge /'dadada/ nicht, da für deren Produktion lediglich eine supraglottale Bewegung reicht, spricht für eine Bestätigung der Ausführungen Pützers über die motorischen Produktionen der einzelnen Silbenfolgen und somit auch dafür, dass sich diese motorischen Unterschiede in der neuronalen Aktivierung widerspiegeln. Die in einer zusätzlichen motorischen Komponente des Gehirns, dem SMA, für /'nanana/ vermehrt nachgewiesene Aktivität unterstreicht weiter eine erhöhte Komplexität in Motorik und neuronaler Ansteuerung dieser Silbenfolge. Das SMA soll nicht nur Zuständigkeit zur Planung und Initiierung bei der Wiederholung von Silbenfolgen haben, sondern auch Aufgaben während der motorischen Ausführung der Artikulation (Brendel 2010). Aus diesem Grund ist dieser Bereich während lauter Aussprache aktiv.

Zusätzlich ist für diesen Kontrast eine Mehraktivierung im Bereich des linken Gyrus postcentralis, also der primär somatosensiblen Rinde, zu erkennen. Dieses aktive Areal befindet sich weiter kranial innerhalb des Kortex, nach dem Prinzip des Homunculus im Bereich des Rumpfes. Aktivität in diesem Bereich könnte durch eine vermehrte Ausatemtätigkeit begründet sein, welche die Produktion der Silbenfolge /'nanana/ erst ermöglicht. Aktivität innerhalb der somatosensiblen Rinde würde in diesem Fall für eine

erhöhte Rückmeldung über die Bewegung beziehungsweise der Lage des Brustkorbes im Sinne der Propriozeption an die Großhirnrinde sprechen, was eine Grundvoraussetzung für den korrekten Ablauf motorischer Arbeiten ist (Kell 2014). Dabei ist auffällig, dass sich dieser Unterschied in der Aktivierung lediglich einseitig in der linken Hemisphäre ergibt, welche die Arbeit für die rechte Körperhälfte widerspiegelt. Eine Begründung für diese Auffälligkeit kann im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht gegeben werden. Kell hat in seiner Arbeit ebenfalls eine Linkslateralisierung der somatosensorischen Kortizes beschrieben.

5.3.2 Diskussion der Ergebnisse der Kapitel 4.2.3 und 4.2.4: Ergebnisse der Gegenüberstellung /'dadada/ und /'tatata/

Die Berechnungen für diesen Kontrast ergaben keine Mehraktivierung zugunsten der Silbenfolge /'dadada/. Es lässt sich in Zusammenschau mit den Ergebnissen für den Kontrast /'dadada/ vs. /'nanana/ (vgl. Kapitel 5.3.1), für welchen sich ebenfalls keine Mehraktivierung für /'dadada/ ergab, feststellen, dass /'dadada/ ohne Mehraktivierung gegenüber allen anderen Silbenfolgen des Experiments bleibt. Damit konnte die Behauptung aus Kapitel 5.2 - die geringere Aktivität für /'dadada/ im Vergleich zu den beiden anderen Silbenfolgen – belegt werden, welche sich dort bereits aus der Gegenüberstellung der einzelnen Silbenfolgen gegen die Baseline abgezeichnet hat. Die neuronalen Aktivitäten für die Produktion dieser Silbenfolge gehen also nicht über die der anderen beiden Silbenfolgen hinaus. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass all jene Regionen, in denen während der Produktion von /'dadada/ Aktivität nachgewiesen wurde, für die Produktion von /'nanana/ und /'tatata/ ebenfalls aktiv sind. Somit kann ein erster Schritt in Richtung der Behauptung, die unterschiedliche neuronale Aktivität für die einzelnen Silbenfolgen lasse sich auf die unterschiedliche Komplexität der Produktion der einzelnen Silbenfolgen zurückführen, erbracht werden.

Bei Analyse des umgekehrten Kontrasts, /'tatata/ vs. /'dadada/, konnten Unterschiede zugunsten /'tatata/ dargestellt werden. Diese befinden sich innerhalb der ROI- Maske beidseits im Bereich des IFG, weiterhin im rechten Gyrus praezentralis und auch im Gyrus

postzentralis. Somit ist für diesen Kontrast, ebenso wie bei /'nanana/ vs. /'dadada/ Mehraktivierung im Bereich des motorischen Sprachzentrums nachgewiesen. Das aktive Areal im Bereich des Motorkortex dagegen lässt auch für diesen Kontrast Rückschlüsse auf eine vermehrte motorische Arbeit im Bereich des laryngealen Motorkortex zu (Brown 2008). Diese Erkenntnis unterstützt die Behauptung, dass /'tatata/ im Gegensatz zur Produktion von /'dadada/ laryngeale Anteile in der Artikulation miteinschließt. Somit weisen diese Mehraktivierungen ebenfalls auf eine erhöhte Komplexität der Produktion der Silbenfolge /'tatata/ hin. Der aktive Bereich in der Region des Gyrus postcentralis für diesen Kontrast entspricht der Region, welche für die Verarbeitung der Somatosensorik aus dem Bereich des Larynx zuständig ist (Miyajj 2014). Die Übereinstimmung mit der Studie von Miyajj, in welcher sich diese Region genau auf den Bereich der Stimmlippen bezieht, passt zu der Anfangsannahme dieser Arbeit, dass für /'tatata/ Bewegungen im Bereich der Stimmlippe ablaufen, die Artikulation von /'dadada/ hingegen nur supraglottisch. Aus dieser Annahme heraus und unter Einbezug der Studie von Miyajj scheint sich auch hier darzustellen, dass sich die Unterschiede, die sich zwischen den einzelnen Silbenfolgen nachweisen und darstellen lassen, aufgrund der unterschiedlichen motorischen Anforderungen und den damit unterschiedliche Komplexitäten heraus ergeben. Auch die bereits erwähnte Aufgabe, Fehler in der eigenen Sprachproduktion zu erkennen und das Signal zur Verbesserung zu geben, welche dem sensorischen Kortex zugesprochen wird (Behroozmand 2015), kann bei der Aktivität in diesem Bereich eine Rolle spielen.

5.3.3 Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 4.2.5 und 4.2.6: Ergebnisse der Gegenüberstellung /'nanana/ und /'tatata/

Für den Kontrast /'nanana/ > /'tatata/ konnten Mehraktivierungen berechnet werden. Diese befinden sich im Bereich des linken IFG, des SMA und in Teilen der linken Insula. Das weist darauf hin, dass die Produktion von /'nanana/ eine Komplexität innehat, welche die von /'tatata/ in bestimmten Bereichen übersteigt. Vor dem Versuch der Erklärung für diese Mehraktivierung muss zunächst festgehalten werden, dass die Kernfrage der Arbeit positiv beantwortet werden kann. Auch für diesen Kontrast lassen sich in beide Richtungen

Mehraktivierungen nachweisen. Hiermit wurde endgültig bestätigt, dass sich minimale motorische Unterschiede in der Produktion von Sprache bildlich anhand fMRI- Messungen nachweisen lassen.

Im Folgenden soll erörtert werden, warum für /'nanana/ Mehraktivität vorhanden sein könnte. Basierend auf der Grundannahme, dass hinsichtlich der reinen motorischen Ausführung /'tatata/ die komplexeste Silbenfolge ist, da hierbei am meisten Bewegungsänderungen sowohl auf glottaler Ebene als auch im Mund- und Nasenraum geschehen, ergibt sich die Vermutung, dass sich die erhöhte Komplexität für /'nanana/ in einem anderen Bereich befinden muss. Dies muss sich einem Bereich, welcher sich nicht direkt auf die motorische Umsetzung der Artikulation dieser Silbenfolge bezieht, möglicherweise einem Areal, dessen Aktivität sich beispielsweise durch den semantischen Hintergrund, der in Kapitel 5.2 bereits für /'nanana/ vermutet wurde, heraus ergeben. Aber auch andere Gründe sind vorstellbar. Worin die Mehraktivität tatsächlich begründet ist, kann in dieser Studie nicht näher dargestellt werden, sollte aber in kommenden Studien untersucht werden, da sich die Annahme ergibt, dass für die Komplexität von Artikulation nicht nur die motorische Generierung des Lautes an sich relevant ist, sondern auch weitere, bisher nicht berücksichtigte Aspekte, welche für die Komplexität von Artikulation verantwortlich sind.

Gerade die Mehraktivierungen im Bereich des motorischen Sprachzentrums deuten eher darauf hin, dass sich diese Unterschiede doch aus der motorischen Ausführung der Artikulation heraus ergeben. Ebenfalls für erhöhte Komplexität in der motorischen Ausführung von /'nanana/ spricht auch die Mehraktivierung im Bereich des SMA und der Insula. Eine Aktivität im Bereich der Insula könnte auch hier wieder als Verbindungsglied zwischen Sprachverständnis und Sprachartikulation spielen, wie es schon zuvor für andere Kontraste angenommen wurde (Ardila 2016). Aktivität im Bereich des SMA weist auf eine komplexe Planung und Ausführung für /'nanana/ hin. Da die exakten Funktionen dieser Bereiche gerade in Hinblick auf Sprachgenerierung noch nicht endgültig bewiesen sind, kann nicht abschließend behauptet werden, in welchen Bereichen die Komplexität von /'nanana/ die von /'tatata/ übersteigt, in denen die berechneten Mehraktivierungen im Gehirn hervorgerufen werde. Der Nachweis von Mehraktivierung an sich konnte aber gezeigt werden.

Für den konträren Kontrast, /'tatata/ vs. /'nanana/, konnten ebenfalls aktive Areale dargestellt werden. Neben Aktivität im Bereich der Insula waren weiterhin zwei aktive Regionen im Bereich des Motorkortex nachweisbar. Das größere dieser beiden, weiter kranial, befindet sich auch für diesen Kontrast einmal mehr in der vermuteten Region des laryngealen Kortex. Die zweite, kleinere aktive Region zeigt Aktivität in dem Bereich, in welchem sich der Ort der motorischen Kontrolle über die Zunge befinden könnte (Brown 2008). Die nachgewiesene Aktivität in diesen beiden Regionen passt ebenfalls zur Theorie, dass für die Artikulation von /'tatata/ im Vergleich zu den anderen beiden Silbenfolgen die komplexeste Arbeit im Larynx zu verrichten ist. Selbiges gilt auch für die Zunge. Somit lässt sich durch die Ergebnisse dieses Kontrastes in Verbindung mit Browns Arbeit nachweisen, dass sich die unterschiedlichen neuronalen Aktivitäten, die sich in den fMRI- Messungen nachweisen lassen, aus den unterschiedlichen motorischen Komplexitäten der motorischen Arbeit heraus ergeben.

Mit der Annahme, dass jeder Artikulator, welcher für die Produktion einer Silbenfolge benötigt wird, einzeln direkt aus dem Gehirn angesteuert wird, kommt man in der Umkehr zu dem Schluss, dass die Artikulation komplexerer Silbenfolgen vermehrt Gehirnaktivität aufweisen muss. Es gibt demzufolge eine mengenmäßige Korrelation zwischen der Menge an zu aktivierenden Körperpartien in der Peripherie und den neuronal aktiven Arealen im Gehirn. Diese Theorie konnte durch die Gegenüberstellung /'tatata/ vs. /'nanana/ bestätigt werden, indem gezeigt wurde, dass die Artikulatoren, welche für /'tatata/ zusätzlich bewegt werden müssen, aus dem Gehirn direkt angesteuert werden. Daraus lässt sich folgern, dass eine komplexere Produktion mehrere benötigte Artikulatoren und damit eine vermehrte neuronale Aktivität im Gehirn bedingen. Die Unterschiede, die sich zwischen Artikulationen der Silbenfolgen darstellen, sind eindeutig durch die unterschiedlichen Komplexitäten in der Aussprache der jeweiligen CV- Silbenfolgen begründet.

5.4 Zusammenfassung aller diskutierten Ergebnisse

Aus den diskutierten Ergebnissen lässt sich einerseits schließen, dass Unterschiede, die in der motorischen Ausführung der Silbenfolgen bestehen, mit Unterschieden in der neuronalen Aktivität im Gehirn korrelieren und andererseits, dass diese Unterschiede in der unterschiedlichen Komplexität der Artikulation der Silbenfolgen begründet sind. Zur Übersicht soll an dieser Stelle mittels einer Tabelle dargestellt werden, welche Ergebnisse sich für die Aktivitäten der einzelnen Silbenfolgen zueinander ergeben haben und welche Schlussfolgerungen daraus gezogen werden können (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4: Zusammenfassung der Mehraktivierungen der einzelnen Silbenfolgen gegeneinander

		<u>Aktivitätsnachweis für den jeweiligen Kontrast:</u>	<u>Schlussfolgerung aus den Ergebnissen:</u>
<u>Berechnete Kontraste:</u> Rechnungen jeweils in beide Richtungen	/'dadada/ vs. /'nanana/	Keine Mehraktivierung für /'dadada/, Mehraktivierung für /'nanana/	/'nanana/ höhere Komplexität als /'dadada/
	/'dadada/ vs. /'tatata/	Keine Mehraktivierung für /'dadada/, Mehraktivierung für /'tatata/	/'tatata/ höhere Komplexität als /'dadada/
	/'nanana/ vs. /'tatata/	Mehraktivierung für Rechnung in beide Richtungen	Beide mit unterschiedlicher Komplexität, die sich in verschiedenen Bereichen übersteigen

Nicht abschließend geklärt werden konnte, welche der für diese Studie herangezogenen Silbenfolgen die motorisch komplexeste ist. Dass /'dadada/ als die am wenigsten komplexeste Silbenfolge in Frage kommt, wurde sowohl durch die theoretische als auch die bildgebende Untersuchung für diese Silbenfolge bestätigt. Diese Silbenfolge hat sowohl die geringste Komplexität hinsichtlich der Motorik während der Aussprache, als auch die geringste neuronale Aktivität. Sowohl /'nanana/ als auch /'tatata/ weisen gegenüber /'dadada/ vermehrt Aktivität auf. Welche der Silbenfolgen /'nanana/ und /'tatata/ die größere Komplexität hat, lässt sich jedoch nicht eindeutig nachweisen. Dies liegt daran, dass sich in den Ergebnissen für beide Silbenfolgen Mehraktivierungen in unterschiedlichen kortikalen Arealen darstellen lassen.

Grundlegend ist, dass die rein motorische Arbeit im Bereich des Mund- Nasen- und Rachenraumes für die Silbenfolge /'tatata/ komplexer ist als für /'nanana/, daher lassen sich Mehraktivierungen vor allem im Bereich des Motorkortex für /'tatata/ nachweisen. Es ergaben sich aber noch weitere Unterschiede innerhalb weiterer Regionen. Aktivitäten in den jeweiligen Gebieten unterstreichen jedoch die Annahme, dass unterschiedliche Ansprüche an die motorische Ausführung der Artikulation unterschiedliche neuronale Aktivitäten hervorrufen, da all diese Areale mit Planung, Koordination und Ausführung von Willkürmotorik in Verbindung gebracht werden. Ein möglicher Grund für die Mehraktivierungen zugunsten von /'nanana/ ist eine eventuelle, komplexere Anforderung an Bereiche des Körpers, die nicht dem direktem Sprachapparat entsprechen. Dies könnte beispielsweise die Atemmuskulatur betreffen, welche für die Ausatmung und die Anpassung des pulmonalen Luftflusses benötigt wird. Für diese Silbenfolge erscheint diese Anpassung besonders anspruchsvoll.

Um diese und weitere Annahmen untermauern zu können, sind weitere Studien mit dieser Themenstellung erforderlich. Dabei sollte geklärt werden, in welchen Arealen die Ursachen für die teilweise vermehrte Komplexität für die Produktion der Silbenfolge /'nanana/ begründet sind.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, herauszufinden, ob sich kleinste motorische Unterschiede während der Artikulation von vorgegebenen Silbenfolgen als neuronale Korrelate anhand von fMRI- Aufnahmen bildlich darstellen lassen, sowie weiter auch, ob diese Unterschiede sich dadurch ergeben, dass Silbenfolgen mit erhöhter, motorischer Komplexität in der Artikulation vermehrt Gehirnaktivität aufweisen im Vergleich zu weniger komplexen Silbenfolgen. Nachgewiesen werden konnte auf der einen Seite, dass sich kleinste Unterschiede in der Artikulation als neuronale Korrelate in fMRI- Aufnahmen darstellen lassen, und andererseits, dass sich für Silbenfolgen mit erhöhter Komplexität auch vermehrt Gehirnaktivität gegenüber Silbenfolgen mit geringerer Komplexität nachweisen lässt. Beide Kernfragen dieser Arbeit können eindeutig positiv beantwortet werden.

Es sind allerdings weitere Untersuchungen erforderlich, um auf diesen Erkenntnissen aufbauend neue Diagnostik- und Behandlungsoptionen generieren zu können. Es ist bereits bekannt, dass sich nach einem Apoplex im zeitlichen Verlauf eine Reorganisation der Sprachfunktionen im Gehirn einstellt (Saur 2010). Durch eine Weiterentwicklung des vorliegenden Studiendesigns könnte beispielsweise expliziter untersucht werden, in welchen Bereichen des Gehirnes sich diese Reorganisation besonders entwickelt hat und in welchen Bereichen noch Bedarf des motorischen Trainings nötig ist. Somit könnte sich ein besseres Verständnis zu komplexen Krankheitsbildern, beispielsweise bei Patienten mit Zustand nach Apoplexien mit Aphasien, neurodegenerativen Erkrankungen oder Stottern, ergeben.

7. Literaturverzeichnis

1. Alario, F.X. et al.: The role of the supplementary motor area (SMA) in word production. *Brain Research*, März 2006, 1076: 129-143
2. Ardila, A. et al.: How Localized are Language Brain Areas? A Review of Brodmann Areas Involvement in Oral Language. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 2016, 31: 112-122
3. Awad, M. et al.: A Common System for the Comprehension and Production of Narrative Speech. *The Journal of Neuroscience*, Oktober 2007, 27: 11455-11464
4. Barbas, H.: Specialized Elements of Orbitofrontal Cortex in Primates. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 2007, 1121:10-32
5. Behroozmand, R. et al.: Sensory-Motor Networks Involved in Speech Production and Motor Control: An fMRI Study. *Neuroimage*, April 2015, 109: 418-428
6. Brendel, B. et al.: The contribution of mesiofrontal cortex to the preparation and execution of repetitive syllable productions: An fMRI study. *Neuroimage*, April 2010, 50: 1219-1230
7. Broca, P.: Remarque sur le siege de la faculté du langage articulé, suivie d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bulletin de la société anatomique de Paris*, 1861, 36: 330-335
8. Brown, S. et al.: A Larynx Area in the Human Motor Cortex. *Cerebral Cortex*, April 2008, 18: 837-845
9. Clark, L.: Differential effects of insular and ventromedial prefrontal cortex lesions on risky decision-making. *Brain*, Mai 2008, 131: 1311-1322
10. Crosson, B.: Subcortical functions in language: a working model. *Brain Lang*, Juli 1985, 25(2): 257-292
11. D'Argembeau, A. et al.: Neural correlates of envisioning emotional events in the near and far future. *Neuroimage*, März 2008, 40: 398-407
12. Flinker, A. et al.: Redefining the role of Broca's area in speech. *PNAS*, März 2015, 9: 2871-2875
13. Ford, A. A. et al.: Broca's area and its striatal and thalamic connections: a diffusion-MRI tractography study. *Frontiers in Neuroanatomy*, Mai 2013, 7/6: 1-12
14. Geranmayeh, F. et al.: Overlapping Networks Engaged during Spoken Language Production and Its Cognitive Control. *The Journal of Neuroscience*, Juni 2014, 34: 8728-8740
15. Haarmann, H.: *Weltgeschichte der Sprachen – Von der Frühzeit des Menschen bis zur Gegenwart*, Verlag C. H. Beck, 2. Auflage, 2010
16. Hartwigsen, G. et al.: Increased Facilitatory Connectivity from the Pre-SMA to the Left Dorsal Premotor Cortex during Pseudoword Repetition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2013, 5/4: 580-594
17. Kell, C.A.: Funktionelle Bildgebung physiologischer und pathologischer Sprachproduktion. *Nervenarzt*, 2014, 85: 701-707
18. Ketteler, D. et al.: The subcortical role of language processing. High level linguistic features such as ambiguity-resolution and the human brain; an fMRI study. *NeuroImage*, Februar 2008, 39: 2002-2009
19. Koch, X.: Zur Rolle kortikaler und subkortikaler Strukturen bei der Initiierung und Produktion segmentell und suprasegmental differierender CV-Silbenwiederholungen: Eine multimethodische Studie unter Verwendung akustischer, elektrophysiologischer und durch

funktionelle Bildgebung generierter Daten, Institut für Phonetik, Universität des Saarlandes, 2012

20. Miyajj, H. et al.: Neuromagnetic detection of the laryngeal area: Sensory-evoked fields to air-puff stimulation. *NeuroImage*, 2014, 88: 162-169
21. Mohanty, A.: Differential engagement of anterior cingulate cortex subdivisions for cognitive and emotional function. *Psychophysiology*, 2007, 44: 343-351
22. Murdoch, B. E.: Subcortical Brain Mechanisms in Speech and Language. *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 2001, 53: 233-251
23. Neef, N. et al.: Left posterior-dorsal area 44 couples with parietal areas to promote speech fluency, while right area 44 activity promotes the stopping of motor responses. *NeuroImage*, 2016, 142: 628-644
24. Ogawa, S. et al.: Brain magnetic resonance imaging with contrast dependant on blood oxygenation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Dezember 1990, 87: 9868-9872
25. Ogawa, S. et al.: Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Juli 1992, 89: 5951-5955
26. Oh, A. et al.: The role of the insula in speech and language processing. *Brain Lang*, 2014, 103: 96-103
27. Orfanidou, E. et al.: Neural response suppression predicts repetition priming of spoken words and pseudowords. *Journal of Cognitive Neuroscience*, August 2006, 18: 1237-1252
28. Pfeifer, J.: Mirroring others' emotions relates to empathy and interpersonal competence in children. *Neuroimage* Februar, 2008, 39: 2076-2085
29. Poldrack, R. et al.: Striatal activation during acquisition of a cognitive skill. *Neuropsychology*, Oktober 1999, 13: 564-574
30. Pützer, M.: Die Rolle kortikaler und subkortikaler Strukturen bei der Initiierung und Produktion artikulatorisch differenzierter CV-Silbenproduktionen. Eine fMRT-Studie. Dissertation. Medizinische Fakultät der Universität des Saarlandes. Homburg, 2008
31. Riecker, A. et al.: fMRI reveals two distinct cerebral networks subserving speech motor control. *Neurology*, 2005, 64: 700–706
32. Roth, G.: Entstehen und Funktion von Bewußtsein. *Deutsches Ärzteblatt*, 1999, 9: 1957-1961
33. Saur, D.: Bildgebung der Aphasien. *Nervenarzt*, 2010, 81: 1429-1427
34. Schneider-Stickler B. W. et Bigenzahn W.: *Stimmdiagnostik – Ein Leitfaden für die Praxis*. Springer Verlag, 2. Auflage, 2013
35. Simmonds, A. et al.: Sensory-Motor Integration during Speech Production Localizes to Both Left and Right Planum Temporale. *The Journal of Neuroscience*, September 2014, 34: 12963-12972
36. Sladky, R. et al.: Slice-timing effects and their correction in functional MRI. *Neuroimage*, September 2011, 58: 588-594
37. Sugiura, M.: Cortical Representations of Personally Familiar Objects and Places: Functional Organization of the Human Posterior Cingulate Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Februar 2005, 17: 183-198
38. Trepel, M.: *Neuroanatomie – Struktur und Funktion*. Urban & Fischer, Elsevier GmbH München, Auflage 5: 229/230, 2012
39. Vogel, R.: *Phonetik und Phonologie: Silbenphonologie und Metrische Phonologie*. Universität Bielefeld, Fakultät für Linguistik und Literaturwissenschaft, WS 2007/08

40. Wallesch C.W. et Papagno C.: Subcortical aphasia; in Rose FC, Whurr R, Wyke MA (eds): Aphasia. London, Whurr, 1988: 256–287
41. Wildgruber, D. et al.: Untersuchungen zur zerebralen Organisation der Sprachproduktion mittels fMRT. Klinische Neuroradiologie, September 1999, 3: 118-133

Sonstige Referenzen (nach Reihenfolge im Text sortiert):

42. Vgl. Universitätsklinikum des Saarlandes: Neuroradiologie: http://www.uniklinikum-saarland.de/einrichtungen/kliniken_institute/radiologie/neuroradiologie/ [Stand: 04.11.2018, 14.27 Uhr]
43. Vgl. The FIL Methods group: SPM8: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm8/> [Stand: 04.11.2018, 14.26 Uhr]
44. Vgl. Siedentopf, C.: fMRI easy by CM Siedentopf: funktionelle Magnetresonanztomographie: <http://www.fmri-easy.de/start1.htm> [Stand: 04.11.2018, 14:27]
45. Vgl. Mayer, J.: Funktionen bestimmter Nervenkernegruppen, <http://www2.ims.uni-stuttgart.de/sgtutorial/hirnfunktionen.html>, 2014 [Stand: 04.11.2018, 14.28 Uhr]

8. Abkürzungsverzeichnis

Abb	= Abbildung
BOLD	= blood oxygenation level dependent, sinngemäß: vom Blutsauerstofflevel abhängig
EPI	= Echo Planar Imaging
fMRI	= functional magnetic resonance imaging
FWE- korrigiert	= familywise error rate- korrigiert
IFG	= Inferior Frontal Gyrus, deutsch: Gyrus frontalis inferior
MNI	= Montreal Neurological Institute
MRI	= magnetic resonance imaging
MRT	= Magnetresonanztomographie
PET	= Positronen-Emissions-Tomographie
ROI	= Region of Interest
sd	= Standardabweichung
SMA	= Supplementär Motorisches Areal
Uncorr	= uncorrected, deutsch: unkorrigiert
vs	= versus

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Subtraktionsmethode am Beispiel von PET - Bildern (Siedentopf, CM. Stand 2015)	22
Abbildung 2: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster der Exekutionen /'nanana/ > /'dadada/	25
Abbildung 3: Volume-Render mit aktiven Sections für /'nanana/ > /'dadada/ als Beispiel.....	26
Abbildung 4: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster aller Exekutionen	28
Abbildung 5: Aktive Areale aller Exekutionen mit Darstellung aktiver Sections: Fokus auf den linken Motorkortex.....	29
Abbildung 6: Aktive Areale aller Exekutionen mit Darstellung aktiver Sections: Fokus auf das SMA...30	
Abbildung 7: Aktive Areale aller Exekutionen mit Darstellung aktiver Sections: Fokus auf die linke Kleinhirnhälfte.....	31
Abbildung 8: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'dadada/ > Baseline, Seite 1	33
Abbildung 9: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'dadada/ > Baseline, Seite 2	34
Abbildung 10: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana/ > Baseline, Seite 1	36
Abbildung 11: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana/ > Baseline, Seite 2	37
Abbildung 12: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > Baseline: Fokus auf die Basalganglien	38
Abbildung 13: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'tatata/ > Baseline	39
Abbildung 14: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/	41
Abbildung 15: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/: Fokus auf den linken IFG und die anteriore Insula	42
Abbildung 16: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/: Fokus auf den rechten Gyrus praecentralis.....	43
Abbildung 17: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'dadada/: Fokus auf das SMA	44
Abbildung 18: Tabellarische Darstellung der Aktivierungscluster für die Bedingung /'tatata/ > /'dadada/	46
Abbildung 19: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'dadada/: Fokus auf den linken IFG (Broca).....	47
Abbildung 20: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'dadada/: Fokus auf den rechten Gyrus postcentralis.....	48
Abbildung 21: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/.....	49
Abbildung 22: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/: Fokus auf den linken IFG.....	50

Abbildung 23: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/: Fokus auf die linke, anteriore Inselrindenregion	51
Abbildung 24: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'nanana/ > /'tatata/: Fokus auf das SMA	52
Abbildung 25: Tabellarische Darstellung aller Aktivierungscluster für die Bedingung /'tatata/ > /'nanana/	54
Abbildung 26: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'nanana/: Fokus auf den linken Motorkortex.....	55
Abbildung 27: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'nanana/: Fokus auf den linken Motorkortex, kaudaler Bereich.....	56
Abbildung 28: Aktive Areale mit Darstellung aktiver Sections für die Bedingung /'tatata/ > /'nanana/: Fokus auf die linksposteriore Inselrindenregion	57

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Alle möglichen Zeichenfolgen der Präsentation	17
Tabelle 2: Technische Einstellungen des Kernspintomographen für die Messungen	20
Tabelle 3: Darstellung der Mehraktivierungen der einzelnen Silbe gegenüber den anderen	58
Tabelle 4: Zusammenfassung der Mehraktivierungen der einzelnen Silbenfolgen gegeneinander	73

11. Danksagungen

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Reith für die Überlassung des Themas und die stets hilfreiche und motivierende Unterstützung während der Entstehung dieser Doktorarbeit.

Herrn Dr. Christoph Krick für seine betreuende Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Manfred Pützer für seine fachkundige und hilfreiche Unterstützung während der Entstehung der Dissertation, ebenso bei der Anfertigung der Messungen.

Allen teilnehmenden Probanden für die Unterstützung und die gespendete Zeit, ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Meinen geliebten Eltern Andrea Riedl und Dr. Bernhard Riedl sowie meinen Geschwistern Veronika und Leonhard Riedl und meiner liebsten Sainab für die Unterstützung, die Motivation und den Beistand über alle Phasen der Entstehung dieser Arbeit hinweg. Ohne Euch wäre das und alles andere nicht möglich gewesen.

Für das Korrekturlesen bei meinem liebsten Freund Josef Weinzierl und PD Dr. Monika Klinkhammer-Schalke.

12. Anhang

Koch, X. 2012: fMRT - Anleitung

A. fMRT-Vorabinstruktionen für die Versuchspersonen

Informationen und Anweisungen für Teilnehmer an der fMRT-Studie

1. Magnetresonanztomographie (MRT)

Mit Hilfe sogenannter bildgebender Verfahren wie der Kernspintomographie (MRT) lassen sich seit etwa 20 Jahren die anatomischen Strukturen ohne Strahlenbelastung für den Probanden/Patienten darstellen. Die MRT wird in der Klinik neben der sogenannten CT (Computertomographie) zur Diagnose von morphologischen (die Gewebstruktur betreffenden) Veränderungen eingesetzt. Diese Veränderungen können z.B. auf das Wachstum eines gut- oder bösartigen Tumors hinweisen.

2. Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) in der Neuroradiologie

Die fMRT wird unter anderem auch in der Neuroradiologie bei diagnostischen Fragestellungen wie z.B. bei einem Gefäßverschluss, vor allem aber auch in der Forschung eingesetzt. Mit dieser Methode kann die Aktivierung eines Hirnareals anhand seiner veränderten Durchblutung im Vergleich mit dem Ruhezustand nachgewiesen werden.

3. Warum diese Studie?

Die neuronale (das Gehirn betreffende) Steuerung unserer Sprechorgane (z.B. Kehlkopf, Zunge, Zäpfchen im Rachen, Lippen, Unterkiefer) bewirkt das Zusammenwirken verschiedener unterschiedlicher Muskeln und Muskelgruppen in einer sehr kurzen Zeit (Millisekundenbereich). Die komplizierten Mechanismen, die uns ermöglichen, ein Wort oder einen Satz zu produzieren, sind uns bei gesunden Sprechern noch lange nicht restlos bekannt. Somit ist es auch verständlich, dass die Störungen dieser Mechanismen auf Grund einer Krankheit ebenfalls noch viele Fragen aufwerfen.

4. Gegenstand der Studie

In diesem Experiment soll:

- a. die Initiierung
- b. die Ausführung von Sprechbewegungen bezüglich ihrer arealen und funktionalen Gestaltung im Gehirn untersucht werden.

Das bedeutet:

Zu a. Initiierung (= Denken): Wenn wir eine visuelle (sichtbare) oder akustische (hörbare) Aufforderung bekommen, etwas zu sagen, müssen wir in unserem Gehirn zunächst einen Ablaufplan für die einzelnen Bewegungen der Sprechorgane bereitstellen. Das heißt, dass wir zunächst daran denken, was wir sagen (produzieren) wollen. Bei diesem Vorgang werden für uns noch nicht restlos bekannte Gebiete (Areale) im Gehirn mehr durchblutet, als Gebiete, die nicht an diesem Planungs-/Initiierungsvorgang beteiligt sind. Welche Gebiete im Gehirn dies sind, soll durch das Experiment gezeigt werden.

Zu b. Ausführung (=Sprechen): Ebenso wie bei der Initiierung der Sprechbewegung sind auch die Teile des Gehirns, die für die tatsächliche Ausführung von Sprechbewegungen zuständig sind nicht vollständig bekannt. Welche Gebiete im Gehirn bei unterschiedlichen Anforderungen z.B. an den Kehlkopf oder an die Zunge mehr durchblutet werden, soll mit Hilfe des Experimentes belegt werden.

5. Stimuli (= sprachliche Aufgaben der Teilnehmer im MRT-Scanner)

Damit wir später Antworten auf die oben angerissenen Fragestellungen geben können, müssen die Teilnehmer des Experimentes sogenannte Stimuli im Kernspintomographen produzieren.

Diese Stimuli werden den Teilnehmern visuell (über einen Sinnesreiz, den sie mit den Augen aufnehmen) präsentiert – das heißt, Sie werden im Scanner diese Stimuli/Bilder über einen Spiegel sehen können.

3 Arten von Stimuli kommen in unserem Experiment vor:

- a. ein Stimulus (Bild), der Sie dazu auffordert „an nichts Spezifisches zu denken“
- b. verschiedene Stimuli (Bilder), die Sie dazu auffordern eine bestimmte (definierte) Silbenfolge zu initiieren (daran zu denken sie zu sprechen ohne Bewegungen mit Zunge, Kiefer oder Lippen auszuführen)
- c. ein Stimulus (Bild), der Sie dazu auffordert eine Silbenfolge zu sprechen (, an die sie vorher nach Aufforderung/Bild schon gedacht haben)

Damit wir die Sache gut in den Griff bekommen, bitten wir Sie, sich mit den weiter unten aufgeführten Stimuli (Kommandos/Bildern/Symbole) vertraut zu machen.

6. Sicherstellung der Verwertbarkeit der fMRT-Scans

Das größte praktische Problem unserer Studie ergibt sich daraus, dass schon geringe Bewegungen während der gesamten Aufnahme im Scanner zu unerwünschten Veränderungen der aufgezeichneten Signale führen. Deshalb bitten wir Sie während der ca. 30 Minuten im Scanner so ruhig wie Ihnen möglich ist zu liegen (besonders wichtig ist das Ruhighalten des Kopfes). Schlucken, Husten und starke Kopfbewegungen während des Sprechens der Stimuli sollten, auf ein Mindestmaß bzgl. Ausmaß und Frequenz reduziert werden. Aus eigener Erfahrung im Scanner wissen wir wie schwierig diese Bitte umzusetzen ist.

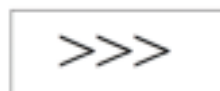
Folgendes wird nach einer Einführung mit der Erklärung der Symbole (7.) ein exemplarischer Experimentablauf demonstriert (8.). Sie können anschließend einen Selbsttest (9.) durchführen und dabei überprüfen, ob Sie die Kommandos/Bilder schon verinnerlicht haben.

Eine Messung dauert etwa maximal 40 Minuten. Danach wird für jeden Teilnehmer des Experimentes eine sogenannte „anatomische Landmarke“ seines/ihrer Gehirns erstellt (Dauer etwa 8 Minuten). Das bedeutet, dass wir mit Hilfe des Kernspintomographen ein genaues Bild von ihrem Gehirn machen.

7. Kommandos/Stimuli für das Experiment



= an nichts Spezifisches denken



= einen Stimulus sprechen



= nanana (keine Silbe besonders betont)



= **NA**nana (1. Silbe betont)



= nana**NA** (3. Silbe betont)



= dadada (keine Silbe besonders betont)



= **DA**dada (1. Silbe betont)



= dada**DA** (3. Silbe betont)



= tatata (keine Silbe besonders betont)


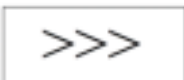

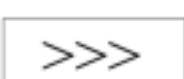


= **TA**tata (1. Silbe betont)




= tata**TA** (3. Silbe betont)

8. Beispielablauf

Bild 1		Sie denken an nichts Spezifisches.
Bild 2		Da Sie vorher an nichts Spezifisches gedacht haben, führen Sie auch keine Sprechbewegung aus.
Bild 3		Sie denken daran die Silbenfolge „nanana“ zu sprechen, ohne dabei ihre Sprechorgane zu bewegen.
Bild 4		Jetzt sprechen Sie die zuvor bereits initiierte Silbenfolge („nanana“ → keine Silbe besonders betont).

9. Selbsttest

A Sie sehen:  Was tun Sie?

- spreche **dadaDA**
- denke an Nichts
- denke daran **dadaDA** zu sprechen

B Das vorherige Bild war: 

DANN sehen Sie:

 Was tun Sie?

- spreche **TA**tata
- denke daran **TA**tata zu sprechen
- spreche tata

Auflösung des Selbsttests

A: Richtig ist Antwort c.

B: Richtig ist Antwort a.