

Aus der Radiologischen Klinik, Abteilung für Neuroradiologie,
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
- Direktor: Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Reith -

Die Rolle kortikaler und subkortikaler Strukturen bei der Initiierung und Pro-
duktion artikulatorisch differenzierter
CV-Silbenwiederholungen
Eine fMRT- Studie

*Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der
Theoretischen Medizin*
der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES Saarlandes
2007

vorgelegt von: Priv.-Doz. Dr. Manfred Pützer
geb. am: 5. Oktober 1952 in Großrosseln

**„Alles Wissen und alle Vermehrung unseres Wissens endet nicht mit
einem Schlußpunkt, sondern mit Fragezeichen.
Ein Plus an Wissen bedeutet ein Plus an Fragestellungen, und jede von
ihnen wird immer wieder von neuen Fragestellungen abgelöst.“**

(Hermann Hesse)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Einleitung	V
1. <i>Einordnung und Konzeption der Arbeit</i>	
2. <i>Struktur der Arbeit</i>	IX
Kapitel I. Untersuchungsmethode und Produktionsaspekte	1
<i>Präambel</i>	
1. <i>Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)</i>	
1.1. Verfahren	
1.2. Datenbearbeitung.....	4
2. <i>Artikulatorische Gesten und akustische Ereignisse bei den Silbenproduktionen</i>	7
2.1. Silbenfolge /'tatata/	
2.2. Silbenfolge /'dadada/.....	9
2.3. Silbenfolge /'nanana/.....	11
Kapitel II. Funktionelle Neuroanatomie der Sprachproduktion	14
<i>Präambel</i>	
1. <i>Kortikale Regionen</i>	
1.1. Primäre Rindenzfelder	
1.2. Unimodale und multimodale Assoziationsareale.....	15
2. <i>Subkortikale Regionen (Basalganglien und Thalamus)</i>	16
2.1. Anatomische Gliederung der Basalganglien und ihre Verbindungen	
2.2. Anatomische Gliederung des Thalamus dorsalis und seine Verbindungen.....	18
3. <i>Mündliche Sprachproduktion</i>	19
3.1. Modelle zur Sprachproduktion und Sprachlokalisation	
3.2. Initiierung von Sprechbewegungen	22
3.3. Ausführung von Sprechbewegungen.....	23
4. <i>Modelle zur Rolle der Basalganglien und des Thalamus in der Sprachproduktion</i>	26
Kapitel III. Experimente zur Sprachproduktion	31
<i>Präambel</i>	
1. <i>Forschungssituation</i>	
2. <i>Studien</i>	32

II

Kapitel IV. fMRT-Experiment	42
<i>Präambel</i>	
<i>1. Material und Methode</i>	
1.1. Design des Experiments	
1.2. Probanden und Aufnahmevorgang.....	43
1.3. Stimulusmaterial	
1.4. fMRT- und MRT-Messungen.....	44
1.5. Datenauswertung	
1.6. Statistik.....	45
<i>2. Hypothesen</i>	
<i>3. Methodisch orientierte Fragestellungen zum Experiment</i>	46
<i>4. Ergebnisse</i>	49
<i>5. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse</i>	71
5.1. Aktivierungen in kortikalen Zentren.....	72
5.2. Aktivierungen in subkortikalen Zentren.....	74
5.3. Fokussierte Betrachtung der örtlichen Aktivierungen in den Basalganglien und im Thalamus.....	78
5.4. Hypothesenüberprüfung.....	83
5.5. Cerebrale Organisation bei sprechmotorischen Vorgängen.....	87
Kapitel V. Zusammenfassung und Diskussion	93
<i>1. Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	
<i>2. Diskussion der Erkenntnisse</i>	96
<i>3. Schlussfolgerungen und Ausblick</i>	99
Summary	101
<i>1. Findings</i>	
<i>2. Discussion of findings</i>	103
<i>3. Conclusions and outlook</i>	106
Literaturverzeichnis	108
Lebenslauf	123

Vorwort

Die Beschäftigung mit der in dieser Studie behandelten Thematik hängt unmittelbar mit Erkenntnissen und daraus erwachsenen Fragestellungen zusammen, die in meiner Habilitationsschrift formuliert werden. In dieser Schrift stellen instrumentell erfasste Phonationskorrelate zu organisch und funktionell bedingten Stimmstörungen sowie erfasste Korrelate zu Normalstimmen einen ersten Untersuchungsgegenstand dar. Darüber hinaus werden in der Arbeit auch sechzehn unter Morbus Parkinson oder multipler Sklerose leidende Patienten im Hinblick auf phonatorische und glottal-supraglottale Artikulationsleistungen betrachtet. Die Leistungen werden unter Elektrostimulation subkortikaler Hirnstrukturen bzw. unter Nichtstimulation erfasst. Bei den berücksichtigten Patienten sind neben ihrer Grunderkrankung in unterschiedlichem Ausmaß zusätzlich erworbene neurogene Stimm- und Sprechstörungen aufgetreten. Diese Störungen werden durch eine Schädigung des zentralen oder peripheren Nervensystems verursacht und zeigen sich u. a. in einer Beeinträchtigung der Steuerung und Ausführung von Phonations- und Sprechbewegungen. Der in der erwähnten Schrift unter Verwendung instrumentalphonetischer Methoden erbrachte Beitrag zur Quantifizierung gestörter glottal-supraglottaler Artikulationsabläufe ist dem Komplex der neuronalen Steuerung von Phonations- und Artikulationsverhalten unter den vorhandenen Bedingungen zuzurechnen. Innerhalb dieses Beitrags sind Phonations- und Artikulationscharakteristika erarbeitet worden, die mit den berücksichtigten instrumentalphonetischen Herangehensweisen *nicht* zusammenhängend erklärt werden konnten. Das hier vorgestellte fMRT-Experiment zur Sprachproduktion versteht sich als ein erster Beitrag zu diesem Desiderat. Im Experiment steht unter Berücksichtigung von Produktionsdaten gesunder Probanden die Rolle kortikaler und subkortikaler Strukturen (hier primär Basalganglien und Thalamus) bei der Initiierung und Ausführung von artikulatorisch differenzierten CV-Silbenproduktionen im Mittelpunkt des Interesses. Die Ergebnisse des Experimentes sollen unter anderem auch als Referenzbasis für geplante Folgeexperimente dienen, in denen unter Verwendung der fMRT ein Beitrag zur Erklärung der erworbenen neurogenen Stimm- und Sprechstörungen bei dem erwähnten Patientenkollektel angestrebt wird.

Nach gutem Brauch möchte ich an dieser Stelle an folgende Personen bzw. Arbeitsgruppen Worte des Dankes richten, ohne deren Hilfe die vorliegende Ar-

IV

beit nicht hätte entstehen können. Die Personen werden in alphabetischer Anordnung namentlich aufgeführt:

An Martin Backens für seine Hilfestellung bei der Durchführung der fMRT-Aufnahmen. Martin hat mich oftmals bei der Bewältigung technischer Tücken erfolgreich unterstützt.

An Bill Barry für die weit über eine Dekade von Jahren reichende fruchtbare und lehrreiche Zusammenarbeit. Bill hat mich auch bei der Verfolgung der hier vorgestellten Problematik motivierend begleitet. Darüber hinaus hat er mein Vorhaben durch die Diskussion der mit dem Experiment zusammenhängenden sprachproduktionsbezogenen Implikationen nutzbringend bereichert.

An Christoph Krick, ohne dessen Einsatz bei der Erstellung des fMRT-Experimentes und ohne dessen Hilfe bei seiner Durchführung sowie bei seiner statistischen Auswertung die Studie nicht hätte angefertigt werden können. Christoph hatte immer ein offenes Ohr bei Problemstellungen. Mit seinem didaktischen Geschick hat er mir neue und zunächst fremde Aufgabenstellungen nicht als unlösbar, sondern als lösbar präsentiert.

An Wolfgang Reith für seine Bereitschaft, die Arbeit als Erstberichtersteller in die Fakultät zu bringen.

An meine Frau Rita und an meine beiden Söhne Stefan und Thomas für das Verständnis, das sie mir bei der Fertigstellung der Arbeit wie schon so oft wieder einmal entgegengebracht haben. Ohne die Unterstützung meiner Familie hätten die Unternehmungen der letzten Jahre nicht durchgeführt werden können.

An Ingmar Steiner für die „muttersprachliche Unterstützung“ bei der Erstellung der Summary.

An das Team der Ärzte und Ärztinnen sowie an das Team der medizinisch-technischen AssistentInnen in der radiologischen Klinik der Universitätskliniken des Saarlandes. Beide Teams haben mir bei manchen Anfangsschwierigkeiten während der Durchführung der fMRT-Aufnahmen Hilfestellung geleistet.

Und schließlich seien Worte des Dankes an meine *Probanden* gerichtet, ohne deren Einsatz und Geduld die Durchführung des Experimentes nicht möglich gewesen wäre.

Einleitung

1. Einordnung und Konzeption der Arbeit

Die vorliegende Arbeit liefert einmal einen Beitrag zur neuronalen Architektur des Initiierungsprozesses von Sprechbewegungen.¹ Zum andern werden in ihr aber auch cerebrale Aktivitäten während der Produktion sprachlicher Äußerungen dargestellt. Somit gehört die Studie zum Themenkreis der Sprachproduktion.

Die bestehenden linguistischen Bereiche, die beim Prozess der Sprachproduktion (und Sprachperzeption) eine Rolle spielen, werden durch die verschiedenen Disziplinen innerhalb der Sprachwissenschaft (Phonetik, Phonologie, Morphologie, Syntax, Semantik, Pragmatik) widergespiegelt. Sie können als Kernbereiche der Linguistik betrachtet werden (z. B. Bohlinger, 1975; Grewendorf et al., 1993). Neben diesen Kernbereichen existieren aber auch *interdisziplinäre* Ansätze in der Linguistik. Diese betreffen die Neuro- und Psycholinguistik sowie die Sozio- und Patholinguistik. Fragestellungen, die das Verhältnis von Sprache und Gehirn berühren, sind vor allem für Neuro- und Psycholinguisten interessant (Franceschini et al., 2004; Frese, 2004).

Neben einem Untersuchungsschwerpunkt, der zeitliche Unterschiede bei sprachlichen Prozessen im menschlichen Gehirn betrifft, besteht ein weiterer aktueller Forschungsschwerpunkt in der Frage nach der *Lokalisation* von Sprache im Gehirn. Bei der Beantwortung dieser Frage sind auf der Basis klinischer Befunde und zahlreicher Untersuchungen bereits zuverlässige Ergebnisse vorhanden. Es wird bisher heute zunächst allgemein angenommen, dass bei Rechtshändern vor allem die linke Hemisphäre des Gehirns bei der Sprachverarbeitung von Bedeutung ist. Innerhalb dieser Hirnhälfte sind primär der Frontallappen (Broca-Region, BA 44 & 45)² und der Temporallappen (Wernicke-Region, BA 22) an der Bewältigung dieser Aufgabe beteiligt. Bei einer differenzierteren Betrachtung bezüglich der Verarbeitung einzelner Teilspekte der Sprache wie der Phonologie, der Syntax oder der Semantik gehen

¹ Der Prozess des Handlungsantriebs (Motivation), der Planung und der Programmierung von Bewegungsprogrammen für auszuführende Sprechbewegungen wird in der vorliegenden Arbeit unter dem Begriff der „*Initiierung*“ zusammengefasst.

² Die heterogene Verteilung unterschiedlicher Neuronentypen auf einzelne Rindenfelder und die daraus resultierenden Variationen der kortikalen Schichtmuster veranlassten Brodmann (1909), Vogt und Vogt (1925) und von Economo und Koskinas (v. Economo & Koskinas, 1925; von Economo, 1927), die Hirnrinde in verschiedene zytoarchitektonische Felder aufzuteilen. Da die Hirnkarte von Brodmann etwas einfacher ist als die von v. Economo, wird sie heute vor allem verwendet, um bestimmte Rindengebiete zu kennzeichnen. Für die Kennzeichnung einzelner Areale wird in der vorliegenden Arbeit die Abkürzung BA (= Brodmann-Areal) verwendet.

die Meinungen jedoch *erheblich* auseinander. Folglich sind diesbezüglich in der Literatur divergierende Angaben zu finden.

Aspekte der Sprachverarbeitung können zur Zeit unter Verwendung unterschiedlicher Untersuchungsmethoden konkretisiert werden. Lokalisationen lassen sich mit Methoden wie der funktionellen Kernspintomographie (fMRT) oder der Positronenemissionstomographie (PET) herausfinden. Unter ihrer Verwendung werden in jeweils unterschiedlicher Weise die mit einer zerebralen Aktivierung verbundenen Vorgänge gemessen (Rugg, 1999; Ziegler, 2005). Da der Blutfluss bei einer Rekrutierung der für die Bewegungsvorgänge relevanten spezifischen Gehirnareale mit Verzögerung eintritt, ist die zeitliche Auflösung bei diesen beiden Methoden *nicht* sehr zufriedenstellend. Eine einzelne PET-Messung dauert zwischen 40 Sekunden und 2 Minuten. Die fMRT erreicht hingegen eine höhere zeitliche Auflösung (Thompson, 2001).

Bei elektrophysiologischen Methoden wie der Elektroenzephalographie (EEG) oder der Magnetenzephalographie (MEG) ist die zeitliche Auflösung im Vergleich zu den bildgebenden Verfahren höher. Jedoch lassen diese beiden Methoden wiederum im Gegensatz zu den erwähnten bildgebenden Verfahren nur *grobe* räumliche Aussagen zu.

In der Neuro- und Psycholinguistik ist die Unterscheidung zwischen *Sprachproduktion* und *Sprachperzeption* wichtig, obwohl diese Differenzierung in linguistischen Theorien relativ selten explizit gemacht wird. In Modellen der Sprachverarbeitung werden sprachproduktionsbezogene Vorstellungen meist *separat* von sprachperzeptionsbezogenen Vorstellungen entwickelt. Eine Begründung dafür kann zahlreichen Patientenstudien entnommen werden. So gibt es einerseits Aphasiker, die beispielsweise nur beim Sprechen, nicht aber beim Verstehen von Wörtern oder Sätzen Schwierigkeiten haben. Andererseits kann auch eine Umkehrung dieser Situation vorhanden sein bzw. kann es auch vorkommen, dass aphasische Patienten mit beiden Prozeduren Schwierigkeiten haben (Schwartz et al., 1980). Schließlich lassen sich bezüglich der Kontrastierung von Produktions- und Perzeptionsprozessen im gesunden Gehirn jedoch wenig Aussagen machen. Dies mag darin begründet liegen, dass unter Verwendung bildgebender Verfahren (fMRT, PET) die Anzahl von Experimenten zur Sprachproduktion weit *hinter* der Anzahl der Experimente zur Sprachperzeption liegt.

Ein Grund dafür ist einmal in der vorhandenen Problematik der Bewegungsartefakte bei Produktionsexperimenten zu sehen. Zum andern besteht eine Be-

gründung in der nicht immer einfach zu treffenden Entscheidung bezüglich des Experimentdesigns (z. B. Frese, 2004).

In der vorliegenden Arbeit wird diesem Missverhältnis zwischen den Experimentansätzen durch ein weiteres *produktionsbezogenes* fMRT-Experiment begegnet. Dieses Experiment soll Aufschluss über cerebrale Zusammenhänge bei der *Initiierung* und *Produktion* von artikulatorisch differenzierten CV-Silbenwiederholungen geben.

Hierbei soll (a) eine Antwort auf Fragen bezüglich der *Rekrutierung* kortikaler und im Besonderen subkortikaler Gehirnstrukturen (Basalganglien und Thalamus) bei der Bewältigung der beiden Prozesse gegeben werden. Darüber hinaus interessiert mit Bezug auf die unterschiedlichen physiologischen Anforderungen bei den phonatorisch-artikulatorischen Bewegungsabläufen (b) die Möglichkeit einer komplexitätsbezogenen Differenzierung der CV-Silbenproduktionen bei beiden Prozessen anhand der cerebralen Aktivierung. Schließlich wird (c) die Möglichkeit einer lateralitätsbezogenen Differenzierung beider Prozesse anhand kortikaler und subkortikaler Aktivierungstendenzen ebenfalls verfolgt.

Bei den Fragestellungen steht auch die Rolle der Basalganglienstrukturen und des Thalamus sowie ihre Einbindung in übergeordnete Schaltkreise im Mittelpunkt des Interesses. Einer der wichtigsten Schaltkreise führt in zwei Varianten vom Kortex über das Corpus striatum zum Globus pallidus und von dort aus über den Thalamus zurück zum Kortex (Kortiko-striato-pallido-thalamo-kortikale Bahn). Diese Fokussierung auf die subkortikalen Zentren der Basalganglien und des Thalamus ergibt sich einmal aus in der Literatur zu findenden *unterschiedlichen* Angaben bezüglich der Relevanz dieser Strukturen bzw. bezüglich ihres Stellenwertes bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen (z. B. Ziegler, 1997 & 2005; Brown & Feldman, 2003; Kent, 2004; Ackermann et al., 2005; Riecker et al., 2005). Zum andern erwächst sie aus dem Interesse an der Ursache und den Zusammenhängen einer intensiveren Ausprägung bzw. eines erstmaligen Auftretens dysarthrophonischer Symptome bei Patienten, die sich einer stereotaktischen Elektrodenimplantation in den Nucleus subthalamicus (Patienten mit M. Parkinson) bzw. in den Nucleus ventralis intermedius des Thalamus (Patienten mit multipler Sklerose) unterzogen haben.

Unter Verwendung instrumentalphonetischer Methoden sind die Auswirkungen der Elektrostimulation dieser subkortikalen Hirnstrukturen auf die Phonation und glottal-supraglottale Artikulation vom Verfasser der vorliegenden Ar-

beit in seiner Habilitationsschrift (Pützer, 2005) sowie zusammen mit Koautoren in mehreren Studien untersucht worden (Moringlane et al., 2004a & 2004b; Pützer et al., 2003a, 2003b, 2006 & 2007).

Neben diesen subkortikalen Arealen werden kortikale Regionen ebenfalls in die Diskussion mit einbezogen. Eine Begründung für die Berücksichtigung kortikaler und subkortikaler Strukturen ist darin zu sehen, dass sich in der neurobiologischen Grundlagenforschung zur Funktions- und Lokalisationslehre des Gehirns in den letzten 20 Jahren dank einer Vielzahl neuer technischer Verfahren eine Wandlung vollzogen hat. Sie beinhaltet das Konzept der Überwindung der anatomisch dominierten Struktur-Funktionszuweisung. An ihre Stelle tritt die *neuronale Netzwerkkonzeption*. Dabei wird deutlich, dass gerade höhere Funktionen wie beispielsweise *Sprache* oder *Kognition* nicht immer *streng* einem einzelnen Ort im Gehirn zugewiesen werden können. Vielmehr werden einzelne Komponenten dieser komplexen Funktionen von verschiedenen Teilen des Gehirns gesteuert. Folglich ist es notwendig, auch bei einem Untersuchungsansatz mit einer Schwerpunktsetzung komplementär vorhandene Ergebnisse in die Diskussion mit einfließen zu lassen.

In dem hier präsentierten Experiment werden die *beiden* bei der Sprachproduktion relevanten Artikulationssysteme (Phonationssystem und System der glottal-supraglottalen Artikulation) bezüglich der von ihnen gestellten Anforderungen an cerebrale Strukturen bei der *Initiierung* und *Ausführung* von Sprechbewegungen berücksichtigt. Die glottal-supraglottalen Artikulationsabläufe werden anhand von phonatorisch bzw. artikulatorisch unterschiedlichen Einzelsilbenwiederholungen untersucht, die sich aus Plosiv-Vokalkombinationen (/ˈtatata/, /ˈdadada/) bzw. aus einer Nasal-Vokal-kombination (/ˈnanana/) zusammensetzen.³ Der dargestellte Hinweis auf unterschiedliche phonatorisch-artikulatorische Bewegungsabläufe bei den Silbenproduktionen impliziert den Verweis auf das von Koordination und muskulärer Feinabstimmung geprägte Zusammenspiel laryngaler und supralaryngaler Artikulatoren. Dieses Zusam-

³ Bei den Plosiv-Vokalkombinationen sind (a) die glottale Geste des Öffnens und Schließens der Stimmritze (Abduktions- und Adduktionsgeste) und (b) die oralen (supraglottalen) Gesten für die Konsonanten- bzw. Vokalbildung betroffen. Bei der Nasal-Vokalkombination sind nur die oralen (supraglottalen) Gesten für die Konsonanten- bzw. Vokalbildung relevant. Die Stimmlippen bleiben bei der Produktion dieser Lautfolge in Adduktionsposition und sorgen durch ihr periodisches Schwingen für eine stimmhafte Anregung. Folglich findet während dieser Silbenproduktion beim phonatorischen System keine Artikulationsalternation in Form einer glottalen Abduktions- und Adduktionsgeste statt. Die Alternation ist aber supraglottal durch das Heben und Senken des Velums sowie durch die Veränderung der Zungenposition bei der Nasal-Vokalartikulation vorhanden.

menspiel wird zunächst durch neuronale Prozesse initiiert bzw. programmiert und dann schließlich wiederum durch neuronale Prozesse ausgeführt.

Das phonetische Interesse an dieser cerebralen Leistung der Ausführung wird durch die Möglichkeit ihrer Objektivierbarkeit anhand von oft in der phonetischen Forschung berücksichtigten akustischen sowie elektrophysiologischen Signalen motiviert (z. B. Schultz-Coulon & Klingholz, 1988; Marasek, 1997; Pützer & Marasek, 2000; Pützer, 2001; Pützer et al., 2001; Pützer et al., 2003a & 2003b; Moringlane et al., 2004a & 2004b; Pützer, 2005; Pützer & Wokurek, 2006; Pützer et al., 2006; Pützer, 2007; Pützer & Barry, 2007; Pützer et al., 2007). Diese stellen als Produkt der sie erzeugenden Erfolgsorgane (Larynx; supraglottale Sprechwerkzeuge) das Endprodukt der cerebralen Aktivität dar.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass in dem hier vorgestellten fMRT-Experiment eine Orientierung an unterschiedlichen artikulatorischen Gegebenheiten erfolgt, die bei der instrumentalphonetischen Bearbeitung des Sprachsignals einen Untersuchungsgegenstand darstellen. Die kortikale und subkortikale Verarbeitung dieser unterschiedlichen artikulatorischen Gegebenheiten beim Initiierungs- und Produktionsprozess steht dabei im Mittelpunkt des Interesses. Als Untersuchungsgegenstand dienen im Experiment artikulatorisch differenzierte CV-Silbenproduktion von gesunden Probanden. Die Ergebnisse des Experimentes sollen folglich einen ersten Beitrag zur Bewertung des „neuronalen Hintergrundes“ bei (patho)physiologischem Phonations- und Artikulationsverhalten liefern, das unter Verwendung instrumentalphonetischer Methoden objektiviert werden kann.

2. Struktur der Arbeit

Die Arbeit ist in *fünf* Kapitel untergliedert. Im *ersten Kapitel* wird zunächst auf das hämodynamische Verfahren der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) eingegangen. Danach werden die dem Experimentansatz zugrundeliegenden Produktionsaspekte zur glottal-supraglottalen Artikulation vorgestellt und mit Bezug zu ihren artikulatorischen Anforderungen an die beiden Artikulationssysteme charakterisiert. Dabei wird auch auf die aus den Artikulationsbewegungen resultierenden akustischen Ereignisse eingegangen.

Das *Kapitel II* beschäftigt sich mit Gesichtspunkten der funktionellen Neuroanatomie der Sprachproduktion. Dabei werden zunächst die an der Sprachproduktion beteiligten kortikalen und subkortikalen Areale behandelt. Dann wird auf Aspekte der mündlichen Sprachproduktion eingegangen. Schließlich sind

in der letzten Sektion des Kapitels sprachproduktionsbezogene Modelle zur Rolle der Basalganglien und des Thalamus Gegenstand der Betrachtung.

Im *Kapitel III* werden für das Experiment relevante Forschungsansätze der letzten Jahre anhand von exemplarischen Darstellungen bereits durchgeführter fMRT-Experimente bzw. anhand von Experimenten zur neuronalen Architektur von Sprechbewegungen dargelegt. Eine Präzisierung des in Anbetracht bisheriger Konzeptionalisierungen für die Arbeit relevanten Ansatzes schließt den Gliederungspunkt.

Das *Kapitel IV* ist der Darstellung des durchgeführten fMRT-Experimentes gewidmet. In ihm werden die kortikalen und subkortikalen cerebralen Strukturen mit Fokus auf die Rolle der Basalganglien und des Thalamus bei der Initiierung und Ausführung artikulatorisch differenzierter CV-Silbenwiederholungen auf der Grundlage der Ergebnisse dargelegt und diskutiert.

Das letzte Kapitel (*Kapitel V*) beinhaltet eine Zusammenfassung zu den aus der Arbeit hervorgegangenen Ergebnissen sowie die Diskussion der auf ihrer Grundlage gewonnenen Erkenntnisse. Schlussfolgerungen und ein Ausblick schließen dieses Kapitel.

Kapitel I. Untersuchungsmethode und Produktionsaspekte

Präambel

In diesem Kapitel wird zunächst auf das hämodynamische Verfahren der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) und auf die Bearbeitung des mit ihm gewonnenen Datenmaterials eingegangen. Es handelt sich bei diesem Verfahren um ein bildgebendes Verfahren, das die Identifikation und Abbildung von an sensorischen, motorischen und kognitiven Aufgaben beteiligten Hirnarealen möglich macht (Klose et al., 1999). Unter Verwendung dieses Verfahrens können somit auch Hirnaktivitäten im Zusammenhang mit sprachlichen Aufgabenstellungen gemessen werden. Die Methode hat in den letzten 10 Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Der Grund dafür besteht darin, dass es durch sie möglich wird, das Gehirn sowohl von gesunden als auch von kranken Personen zu untersuchen (Cabeza & Nyberg, 2000). Durch die Untersuchung an gesunden Probanden gelingt es, von Läsionsstudien herrührende Hypothesen auf ihr Zutreffen am gesunden Gehirn zu überprüfen (Frese, 2004). Die erzielten Ergebnisse unter der Verwendung der Methode kommen auf Grund der engen Verbindung zwischen der Aktivität der Neuronen und dem Blutfluss zustande. Es ist seit langem bekannt, dass aktive Neuronengruppen mit mehr Blut versorgt werden als inaktive Neuronengruppen (Raichle, 1987). Diese Veränderungen der Blutversorgung macht sich die Methode durch Messungen zum regionalen cerebralen Blutfluss während der Bewältigung verschiedener (sprachlicher) Aufgaben zunutze.

In einem zweiten Schritt werden in dem vorliegenden Kapitel die für die Arbeit relevanten Produktionsaspekte zur glottal-supraglottalen Artikulation behandelt. Dabei werden zunächst die artikulatorischen Zusammenhänge bei der Produktion der berücksichtigten CV-Silbenfolgen aus phonetischer Sicht dargestellt. Dann werden die daraus resultierenden akustischen Ereignisse erläutert. Beides geschieht anhand von schematischen Darstellungen der glottalen bzw. oralen Artikulationsgesten mit Bezug zum Oszillogramm sowie anhand von weiteren Visualisierungen des akustischen Signals (Sonagramm).

1. Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

1.1. Verfahren

Seit den 50er Jahren ist die Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance = NMR) als eine weitverbreitete Methode zur nichtinvasiven Strukturanalyse in der Physik und Chemie bekannt. Zu Beginn der 80er Jahre ist die Methode auf

Grund von Innovationen in der Mathematik, Physik und Computertechnologie auch für den medizinischen Bereich nutzbar gemacht worden (Braus & Henn, 2002). Durch eine Verbesserung der Hardware und der Pulssequenzen ist es mit Beginn der 90er Jahre unter Verwendung der Magnetresonanztomographie möglich geworden, Fragestellungen zur Physiologie, Biochemie und Funktion des zentralen Nervensystems anzugehen (Gadian, 1995). Seit 1991 kann unter Berücksichtigung der fMRT das menschliche Gehirn untersucht werden. Im Gegensatz zur Positronenemissionstomographie (PET) kann bei ihrer Verwendung auf eine Injizierung von Isotopen verzichtet werden. Die fMRT geht von körpereigenen Signalen aus. Sie basiert auf dem biologischen Phänomen der regionalen Blutflussveränderung (z. B. Ramsey, 2000). Somit nutzt die fMRT-Technik die physiologischen Mechanismen der neurovaskulären Kopplung zur indirekten Lokalisation von Hirnarealen mit verstärkter Aktivität. Diese verstärkte Aktivität verlangt eine Veränderung des regionalen cerebralen Blutflusses. Er wird im Vergleich zum Sauerstoffverbrauch überproportional gesteigert. Unter Verwendung dieser Methode werden also die physikalischen und biologischen Eigenschaften des Blutes als ein „natürliches Kontrastmittel“ genutzt.

Mit der unterschiedlichen Blutversorgung von der normalen bis zur erhöhten Versorgung verändern sich die magnetischen Eigenschaften des Blutes. Das sauerstoffreiche arterielle Blut enthält mehr Oxyhämoglobin. Sauerstoffarmes Blut hingegen mehr Desoxyhämoglobin. Desoxyhämoglobin ist paramagnetisch. Paramagnetische Substanzen werden in einem starken magnetischen Feld magnetisiert und stören damit die magnetische Flussdichte. Dies hat eine Abnahme des Signals zur Folge. Oxyhämoglobin ist hingegen eine diamagnetische Substanz. Sie weist keine Magnetfelder auf. Bei einer normalen Blutversorgung im Ruhezustand ist das Verhältnis von Oxyhämoglobin und Desoxyhämoglobin ausgeglichen. Wenn die Blutversorgung steigt, dann verändert sich das Verhältnis der beiden Substanzen zugunsten des Oxyhämoglobins in den Kapillargefäßen des aktivierten Hirngewebes. Jetzt wird das magnetische Feld nicht gestört. Die physiologische Erklärung für die Entstehung dieses sog. *BOLD-Effektes* (blood oxygenation level dependent-effect) liegt in der Erhöhung des regionalen cerebralen Blutflusses während neuronaler Aktivität (Ogawa et al., 1993). Er beruht also auf unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von oxygeniertem und desoxygeniertem Hämoglobin im Blut und bewirkt im MR-Bild Helligkeitsveränderungen von durchblutetem Gewebe in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt. Der Effekt tritt auf Grund der langsamen

Geschwindigkeit und Nichtlinearität der hämodynamischen Veränderungen erst nach 3 bis 8 Sekunden nach Präsentation der Stimuli auf (Turner et al., 1991; Friston et al., 1995). Er wurde 1991 erstmalig von Kwong et al. zum Nachweis funktionell aktivierter Hirnareale des Menschen bei visueller Stimulation ausgenutzt. Da bei transient ansteigender Durchblutung zwar in gleichem Maße der Glukoseumsatz, nicht jedoch der Sauerstoffverbrauch ansteigt, nimmt auf der *venösen* Seite die cerebrale Blutoxygenierung zu. Das bedeutet also, dass vermehrt mit Sauerstoff angereichertes Blut in den kleinen abführenden Venen nahe der aktivierten Neuronen vorhanden ist. Diese Zunahme entspricht einer Abnahme des paramagnetischen Desoxyhämoglobins in diesen Venen und damit einem Signalanstieg in dem regional aktivierten Hirnareal (Bandettini et al., 1992; Rosen & Savoy, 1998; Moonen & Bandettini, 2000; Toga & Mazziotta, 2000). Der Signalanstieg wird durch eine verlängerte T2*-Dephasierung der Protonenspins bedingt. Die Signalunterschiede sind allerdings gering. Deshalb müssen die Bilder nachbearbeitet und statistisch ausgewertet werden. So sind kleinere Unterschiede erfassbar.⁴

Die Messungen bei der fMRT werden anhand der Atomkernausrichtung ausgeführt, woher auch die Bezeichnung Kernspintomographie rührt. Dazu wird die Versuchsperson einem starken Magnetfeld ausgesetzt, das meist zwischen 1,5 und 3 Tesla liegt (z. B. Frese, 2004). Durch hochfrequente Rf-Impulse (Radiofrequenzimpulse) werden die Kerne kurzfristig aus ihrer Balance gebracht und sie rotieren. Schaltet man die Radiowellen aus, so springen die Atome wieder in die Richtung zurück, die ihnen von dem starken Magnetfeld vorgegeben wird. Dabei geben sie einen Teil der elektromagnetischen Energie ab, die sie vorher aufgenommen haben. Diese Energie wird von einer hochempfindlichen

⁴ Diese Darlegungen werden in der jüngsten Literatur von einigen Autoren diskutiert. So sehen beispielsweise Logothetis et al. (2001) den Zusammenhang zwischen Energiebedarf des Gewebes und der resultierenden hämodynamischen Antwort weitaus komplexer. Sie sind der Meinung, dass sowohl neuronale Aktivität und der Energiemetabolismus als auch *Synapsenaktivität* und die *Glukoseaufnahme* eng miteinander verknüpfte Prozesse sind. Ihre Untersuchungen haben gezeigt, dass 80-90% des gesamten kortikalen Glukosebedarfs für die Energieanforderungen der glutamatergen Neurone entfallen. Daraus schließen die Autoren, dass der größere Teil der hämodynamischen Signalveränderungen die energetisch aufwendigen *Synapsenaktivitäten* reflektiert und *nicht*, wie bisher angenommen, den direkten, lokalen Energiebedarf des Gehirns.

Zur Steuerung des cerebralen Blutflusses machen Attwell & Iadecola (2002) in ihrer Untersuchung ebenfalls differenziertere Angaben. Aus ihren Ausführungen ist zu folgern, dass die hämodynamische Antwort ähnlich wie bei Logothetis et al. (2001) durch von Neurotransmittern gesteuerte Signalgebungsprozesse gelenkt wird. Ihrer Meinung nach wird die Energie aber nicht für präsynaptische Aktivität, sondern für postsynaptische Strömungen und Aktionspotentiale benötigt. Also werde, so die Autoren, die hämodynamische Antwort *nicht* durch Signale ausgelöst, welche durch einen Energiedefizit des Gewebes entstehen, sondern durch *neuronale Verarbeitungsprozesse*.

Empfangsspule gemessen und auf ihren Ursprungsort zurückgeführt. Um die Signalerhöhungen der betroffenen Hirnregion messen zu können, wird auf T2*-gewichtete Messsequenzen zurückgegriffen. Anhand dieser Sequenzen wird die Zeit gemessen, die die Atomkerne brauchen, um sich in ihre vom Magnetfeld ausgerichtete Position zurückzuformieren. (hier Relaxation aus der Quermagnetisierung; vgl. Moonen & Bandettini, 2000). Die Sequenzen sind häufig *Echo-Planar-Sequenzen* (Echo-Planar Imaging = EPI). Sie haben den Vorteil, dass zahlreiche Schichten des Gehirns in sehr kurzer Zeit aufgenommen werden können. Diese Pulssequenzen mit geringer Bildverzerrung verkürzen die Untersuchungszeit pro Schicht von früher 30 bis 50 Sekunden auf bis zu 40 ms. Damit lassen sich Blutflussveränderungen von weniger als 4 mm³ messen. Das Erfassen dynamischer Prozesse im zentralen Nervensystem ist somit in einer relativ hohen örtlichen Auflösung möglich. Areale zwischen 1 bis 3 mm können genau zugewiesen werden. Dadurch ist im Vergleich mit elektrophysiologischen Methoden eine sehr *genaue Lokalisierungsmöglichkeit* gegeben. Ein Nachteil bei der Methode besteht darin, dass gegenüber zeitlichen Abläufen eine relativ geringe Aussagekraft vorhanden ist.

1.2. Datenbearbeitung

1.2.1. Computerprogramm

Für die Auswertung der funktionellen Daten gibt es verschiedene Computerprogramme wie z. B. die Programme „*Brain Voyager*“ und „*Analysis of Functional Neuroimages*“ (AFNI). Ein weiteres oft benutztes Programm ist das sog. *Statistical Parametric Mapping* (SPM) (Friston et al., 1995). Es ermöglicht, Aktivierungsbilder aus einem fMRT-Experiment zu erhalten. Besonders nützlich an diesem Programm ist, dass es jeden Bildpunkt durch statistische Tests berechnet. Dadurch wird die Möglichkeit geboten, Hirnregionen zu identifizieren, die eine signifikante Aktivierung innerhalb der experimentbezogenen Fragestellungen aufweisen.

Die Daten eines Experiments werden in verschiedenen Schritten bearbeitet. Zuerst werden geringfügige Bewegungen des Probanden zwischen den Messungen ausgeglichen. Dabei werden die auf Bewegungen zurückzuführenden Voxel (Volumenelemente) minimiert.⁵ Nach einer zeitlichen Korrektur der Schichtfolgen erfolgt daraufhin eine stereotaktische Normalisierung in einen einheitlichen Referenzraum, wodurch der Vergleich der Gehirne verschiedener

⁵ Ein Voxel ist der kleinste definierbare Punkt innerhalb eines Volumens. Es gibt die Auflösung bei der Erfassung eines Volumens an.

Probanden und somit eine Gruppenanalyse möglich ist. In diesem Verarbeitungsschritt werden die Daten der verschiedenen Bilder unter Verwendung eines Gaußschen Filters „geglättet“. Schließlich wird in einem nächsten Schritt die statistische Analyse unter Rückgriff auf ein allgemeines lineares Modell (general linear model, GLM) vollzogen. Dieses Modell wird verwendet, um eindimensionale Tests für jedes Voxel anwenden zu können (*t*-Statistiken). Das Ergebnis der statistischen Tests für jedes Voxel ist die *statistical parametric map* (SPM).

Wenn man Aussagen über Gemeinsamkeiten der anatomischen Lokalisation des Blutflusses machen will, muss eine *Gruppenstudie* durchgeführt werden. Dafür ist die Koregistrierung der funktionellen und anatomischen Daten vonnöten. Bei dieser Analyse müssen des Weiteren die individuellen Unterschiede in der Form und Größe des Gehirns beachtet werden. Hierzu werden die Daten der einzelnen Probanden auf ein standardisiertes Hirnbild übertragen (Klose et al., 1999). Diese standardisierte Vorlage wird meist anhand des stereotaktischen Atlases von Talairach & Tournoux (1988 & 1993) angegeben. Mit Hilfe dieses sog. „Referenzgehirns“ ist es möglich, jeden Punkt in dem dreidimensionalen Koordinatensystem zuzuordnen.⁶

Bei einer Gruppenstudie sind zum einen Aussagen zu den Probanden der Gruppe wichtig. Zum andern kann aber auch die Aussagekraft einer Studie über die untersuchte Gruppe hinaus von Wichtigkeit sein. Zu den beiden genannten Fragestellungen stehen zwei Analysearten zur Verfügung.

Mit der ersten Analyseart, der *Fixed-Effects Analysis* (FFX), können *nur* Aussagen über die an der Gruppe *beteiligten Probanden* getroffen werden. Wenn man Fallstudien darstellen will, greift man auf diese Analyseart zurück. Bei der Analyseart wird davon ausgegangen, dass jede Versuchsperson gleichen Anteil an der beobachteten Aktivierung hat. Folglich kann die intersubjektive Variabilität vernachlässigt werden. Es lassen sich also Aussagen über Aktivierungen einzelner Personen machen, die sich aber nicht auf die gesamte Population zurückführen lassen. Bei der Fixed-Effect-Analyse wird jede Versuchsperson gleichermaßen gewichtet. Das bedeutet, dass ein extremer „Ausreißer“ die gleiche Gewichtung in der Berechnung erhält wie eine Versuchsperson, de-

⁶ Bei einer tomographischen Bildaufnahme besteht jedes Schnittbild in dem von Talairach & Tournoux entwickelten stereotaktischen Koordinatensystem (= Talairach-Raum) aus Bildpunkten von gleicher Größe und Form in einer orthogonalen Punktmatrix. Ein Bildpunkt dieser Matrix wird als Pixel (= picture element) bezeichnet. Überführt man die Schnittbilder in ein orthogonales, dreidimensionales Koordinatensystem, so spricht man von einem Voxel; vgl. Fußnote 2.

ren Daten sich im Mittelfeld der betrachteten Probanden befinden. Die Analyseart ist deshalb für Gruppenanalysen ungeeignet.

Die zweite Analyseart besteht in der *Random-Effects Analysis* (RFX). Bei Verwendung dieser Analyseart können gültige Aussagen *über die analysierte Gruppe hinaus* getroffen werden, da hier davon ausgegangen werden kann, dass man eine zufällige Auswahl aus einer größeren Population untersucht (Penny & Holmes, 2003). Die Methode beinhaltet neben einer intraindividuellen auch eine interindividuelle Betrachtung. Das heißt, es wird auch untersucht, inwieweit sich die Daten zwischen den Probanden unterscheiden. Bei einer Probandenanzahl von mindestens 12 Personen wird meist die RFX-Analyse angewandt. Dabei werden zunächst die Bilddaten jedes Teilnehmers auf ein Bild gemittelt. Dieses Bild geht in die Gruppenanalyse ein, indem ein GLM für jeden Probanden spezifiziert wird. Danach steht die Definition der interessierenden Effekte an, die jeweils Kontrastbilder erzeugen. Diese Kontrastbilder werden wiederum in ein GLM übertragen, das einen t-Test anwendbar macht. Es wird dann die für die Gruppe durchschnittliche Aktivierung errechnet und diese wird in einem standardisierten Gehirn abgebildet. Die individuellen Aktivierungsunterschiede werden somit zugunsten der Aussagen über die Gruppe als sekundär betrachtet. Mit der RFX-Methode können also allgemeingültige Vermutungen über die Lokalisation bestimmter Prozesse im Gehirn angestellt werden.

1.2.2. Subtraktionsmethode

Eine weit verbreitete Methode der Datenauswertung ist die sog. Subtraktionsmethode oder kognitive Subtraktion (z. B. Posner & Raichle, 1996; Raichle, 1998). Sie findet bei dem hier vorgestellten bildgebenden Verfahren der fMRT Anwendung.

Innerhalb dieser Methode geht man davon aus, dass ein kognitiver Prozess zu einer bereits existierenden Menge von kognitiven Prozessen hinzuzufügen ist, ohne dass diese Menge beeinflusst wird. Die unter zwei verschiedenen Bedingungen (z. B. Ruhebedingung vs. Aktivierungsbedingung) erzeugten Bilder werden durch einen Subtraktionsvorgang voneinander abgegrenzt. Das heißt, dass das gemittelte Bild unter Ruhebedingungen von dem gemittelten Bild unter Aktivierungsbedingungen abgezogen wird. Dadurch wird ein Differenzbild erzeugt. In diesem Bild ist der Unterschied zwischen beiden Bedingungen enthalten und im Idealfall isoliert. Die beschriebene Methode ist besonders empfindlich gegenüber Bewegungsartefakten.

Im Fall des in der vorliegenden Arbeit dargelegten fMRT-Experimentes besteht die zu bewältigende Aufgabe in der Produktion artikulatorisch unterschiedlich definierter CV-Silben. Hierbei interessieren Aktivierungen in den kortikalen sowie in den subkortikalen Arealen (Basalganglien, Thalamus, Cerebellum u. a.) (a) bei der Initiierung und (b) bei der Ausführung dieser Aufgaben.

Folglich stehen zum einen *zwei* Aktivierungsbedingungen einer Ruhebedingung (Baseline) gegenüber. Zum andern ist eine Aktivierungsbedingung (Initiierung von Sprechbewegungen) gegenüber einer anderen Aktivierungsbedingung (Ausführung von Sprechbewegungen) mit Bezug auf hämodynamische Korrelate (auch *vice versa*) zu kontrastieren.

2. Artikulatorische Gesten und akustische Ereignisse bei den Silbenproduktionen

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.

2.1. Silbenfolge /tatata/

Bei der Artikulation dieser Silbenfolge wird zunächst eine orale (supraglottale) Schließungs- und Öffnungsgeste für den dental-alveolaren Fortisplosiven sowie für die sich anschließende Vokalproduktion verlangt. Durch diese Produktionsabschnitte wird das zyklische Vorhandensein der KV-Silbe bedingt.

Eine zweite Geste betrifft die Stimmlippenschwingungen während der Vokalproduktion. Diese können auch (ab der zweiten Silbe) in den oralen Verschluss bei der Produktion des Plosiven von dem vorausgehenden Vokal herrührend hineinreichen (perseveratorische Stimmhaftigkeit).

In Abbildung II.1 werden die beiden artikulatorischen Gesten (Glottale Geste; Orale Geste) mit Bezug zum akustischen Signal konkretisiert. Zudem wird ihre synchrone Abfolge innerhalb eines Silbenzyklus verdeutlicht.

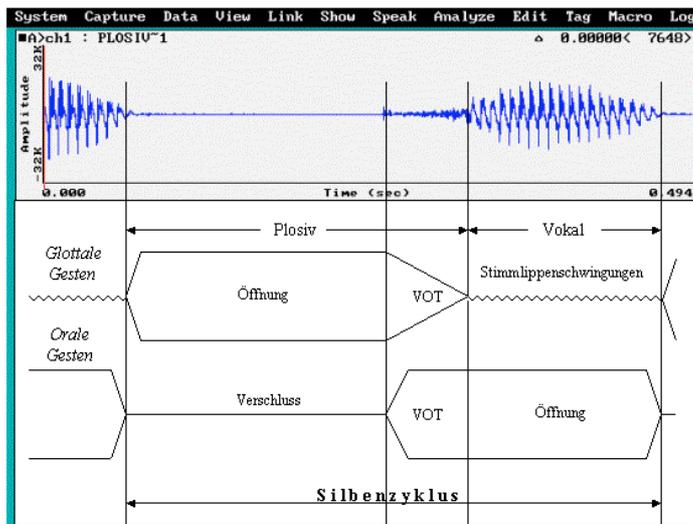


Abbildung II.1: Phonatorische und artikulatorische Gesten zur Plosiv-Vokal-Produktion für die /ta/-Silbe.

Aus der Abbildung ist zu ersehen, dass die orale Schließung mit einer exakt synchronisierten glottalen Öffnung einhergeht. Es ist kaum perseveratorische Stimmhaftigkeit aus dem vorangehenden Vokal im Verschluss vorhanden. Der supraglottale (intraorale) Druckaufbau erfolgt schnell und regelrecht. Nach der oralen Lösung des Verschlusses und der parallel einsetzenden Adduktionsgeste der Stimmlippen führt der Druckabfall zu einer gut definierten VOT-Dauer sowie zu einer regelrechten Dauer des nachfolgenden Vokals.

In der Abbildung II.2 werden die durch die Artikulationsgesten erzeugten akustischen Ereignisse anhand von Visualisierungen durch das Oszillogramm und durch das synchron vorhandene Sonagramm sowie die Signalabschnitte dargestellt, die bei der Produktion der /ta/-Silbe vorhanden sind.

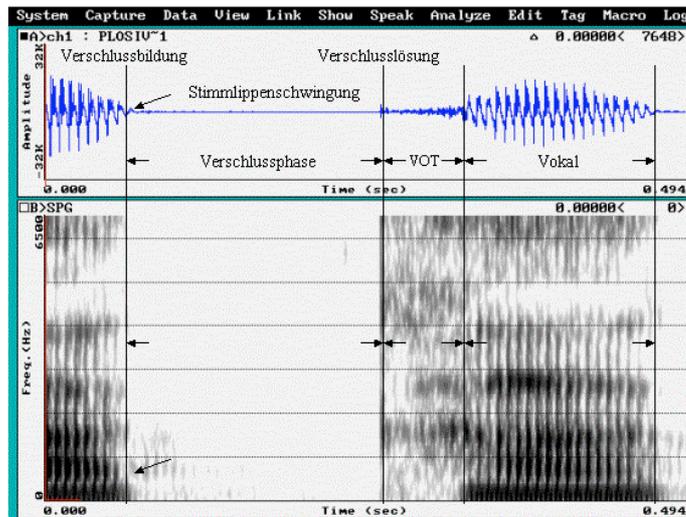


Abbildung II.2: Signalabschnitte zur Plosiv-Vokal-Produktion für die /ta/-Silbe.

Mit der Verschlussbildung für den Plosiven erfolgt ein abrupter Abfall der spektralen Energie. Die nachfolgende Verschlussphase zeichnet sich durch eine „akustische Stille“ in allen Frequenzbereichen des Spektrums aus. Sie ist länger als bei einem stimmhaften Plosiven (siehe Abbildung II.3 unten). Die Verschlusslösung (burst) hat einen plötzlichen sprunghaften Anstieg der spektralen Energie in einem bestimmten Frequenzbereich zur Folge. Der Anstieg wird durch die Artikulationsstelle der Plosiven bestimmt. Generell wird bei stimmlosen Plosiven hinter dem Verschluss ein starker Druck aufgebaut, so dass die Verschlusslösung hohe Intensität zur Folge hat. Zudem folgt der Lösung eine Aspirationsphase unterschiedlicher Dauer (etwa zwischen 40 und 80 ms). Danach setzen die Stimmlippenschwingungen für den nachfolgenden Vokal ein. Die Zeit von der Verschlusslösung bis zum Einsetzen der Stimmlippenschwingungen wird als Stimmansatzzeit (VOT) bezeichnet.

2.2. Silbenfolge /'dadada/

Bei der Artikulation dieser Silbenfolge wird ebenfalls zunächst eine orale (supraglottale) Schließungs- und Öffnungsgeste für den dentalen Lenisplosiven sowie für die sich anschließende Vokalproduktion verlangt. Durch diese Produktionsabschnitte wird wiederum das zyklische Vorhandensein der KV-Silbe bedingt.

Ein zweite Geste betrifft die Stimmlippenschwingungen während der Plosiv- und Vokalproduktion. Diese sind auf Grund der intervokalischen Position des Plosiven (ab der zweiten Silbe) auch während des oralen Verschlusses vorhan-

den und können wiederum als perseveratorische Stimmhaftigkeit gedeutet werden. In der Abbildung II.3 wird der Silbenzyklus schematisch mit Bezug zum Oszillogramm dargestellt.

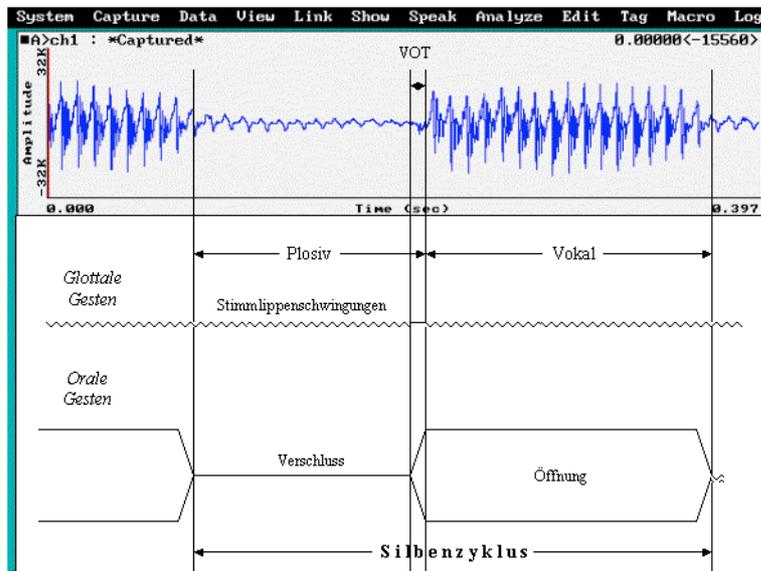


Abbildung II.3: Phonatorische und artikulatorische Gesten zur Plosiv-Vokal-Produktion für die /da/-Silbe.

Aus der Abbildung ist nun zu ersehen, dass die orale Schließung nicht mit einer exakt synchronisierten glottalen Öffnung einhergeht. Es ist vielmehr durchgängig im Verschluss perseveratorische Stimmhaftigkeit aus dem vorangehenden Vokal vorhanden. Der supraglottale (intraorale) Druckaufbau erfolgt deshalb in geringerem Ausmaß. Folglich führt jetzt der Druckabfall nach der oralen Lösung des Verschlusses zu einer gering definierten VOT-Dauer. Die Stimmlippen sind noch in Phonationsstellung.

In der Abbildung II.4 werden die durch die Artikulationsgesten erzeugten akustischen Ereignisse (anhand von Visualisierungen durch das Oszillogramm sowie durch das synchron vorhandene Sonagramm) und die Signalabschnitte dargestellt, die bei der Produktion der /da/-Silbe vorhanden sind.

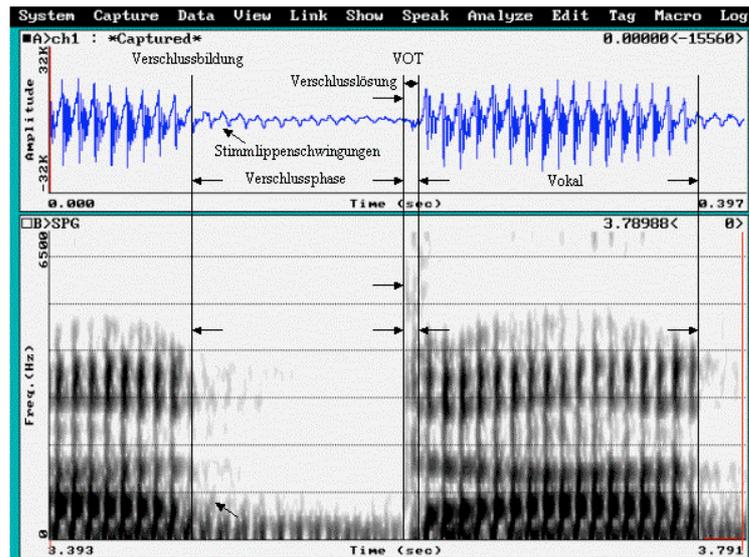


Abbildung II.4: Signalabschnitte zur Plosiv-Vokal-Produktion für die /da/-Silbe.

Mit der Verschlussbildung für den stimmhaften Plosiven erfolgt ebenfalls ein Abfall der spektralen Energie. Die nachfolgende Verschlussphase zeichnet sich hier aber durch den im unteren Frequenzbereich des Spektrums vorhandenen Stimmtön (voice bar) aus. Die Stimmlippen schwingen so lange weiter, bis der Luftdruck im Mundraum groß genug ist, die Phonation zu stoppen oder aber der Verschluss gelöst wird. Die Verschlussphase ist kürzer als bei einem stimmlosen Plosiven. Die Verschlusslösung ist mit einer Dauer von bis zu 20 ms wesentlich schwächer. Da die Stimmlippen noch in Phonationsstellung sind, sorgt ihr Oszillieren jetzt sofort für eine konstante Amplitude bei der nachfolgende Vokalproduktion.

2.3. Silbenfolge /'nanana /

Bei der Artikulation dieser Silbenfolge wird analog zu den beiden Plosiv-Vokal-Kombinationen zunächst eine orale (supraglottale) Schließungs- und Öffnungsgeste für den dentalen Nasalen sowie für die sich anschließende Vokalproduktion verlangt. Durch diese Produktionsabschnitte wird wiederum das zyklische Vorhandensein der KV-Silbe bedingt.

Ein zweite Geste besteht in der Velumalternation. Nasale sind wie Plosive durch einen totalen oralen Verschluss gekennzeichnet. Die Absenkung des Velums, die teilweise schon vor der oralen Verschlussbildung einsetzt, bewirkt die Zuschaltung des Nasenraums als zusätzlichen Resonanzraum. Mit der Lö-

sung des oralen Verschlusses erfolgt der Verschluss des Nasenraums durch ein Anheben des Velums für die nachfolgende Vokalproduktion. Während der oralen Verschlussphase für den Nasalen schwingen die Stimmlippen wie bei dem nachfolgenden Vokal ohne Unterbrechung. Diese Kombinationen der artikulatorischen Gesten sind aus der Abbildung II.5 zu ersehen.

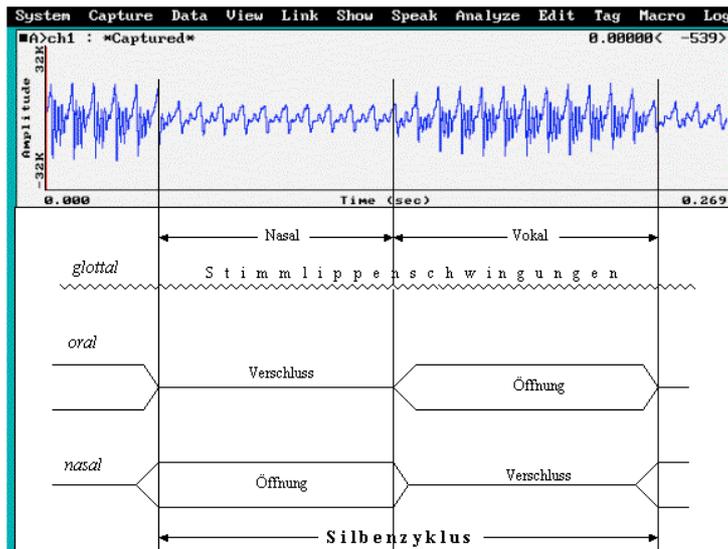


Abbildung II.5: Phonatorische und artikulatorische Gesten zur Nasal-Vokal-Produktion für die /na/-Silbe.

Die akustischen Ereignisse und die Signalabschnitte für diese Silbenfolge werden in der Abbildung II.6 dargestellt.

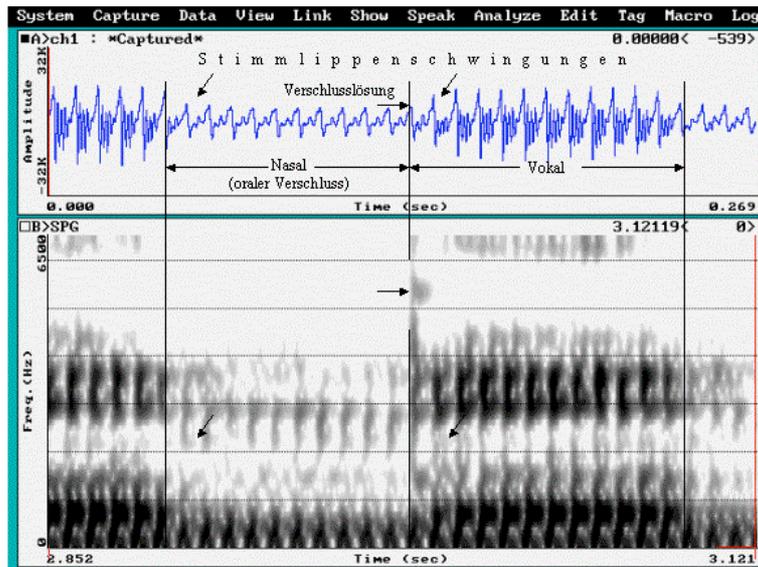


Abbildung II.6: Signalabschnitte zur Nasal-Vokal-Produktion für die /na/-Silbe.

Während der oralen Verschlussphase für die Nasalproduktion bilden sich im Vokaltrakt auf Grund des zugeschalteten Nasenraumes sog. Antiresonanzen aus, die Teile des Spektrums sehr stark dämpfen. Sie sind besonders in Vokallumgebung gut erkennbar und werden durch einen starken Energieabfall im Spektrum zu Beginn des Nasals repräsentiert. Am Ende des vorausgehenden Vokals erfolgt ein starker Amplitudenabfall und ein abrupter Wechsel der Formantstruktur. Als Hauptansatzrohr fungieren der Rachen- und der Nasaltrakt. Dadurch wird eine erste Resonanz bei etwa 250 Hz aufgewiesen, und die höheren Frequenzen werden stark gedämpft. Da der pulmonale Luftstrom während des oralen Verschlusses durch die Nase entweichen kann, entsteht kein intraoraler Überdruck und somit auch kein Geräusch bei der oralen Verschlusslösung hin zur nachfolgenden Vokalproduktion. Vor dem oralen Verschluss für die Nasalproduktion sowie nach der oralen Öffnung für die nachfolgende Vokalproduktion ist bei dem vorausgehenden bzw. bei dem nachfolgenden Vokal eine Abschwächung der Resonanzfrequenzen im Sonagramm zu erkennen.

Kapitel II. Funktionelle Neuroanatomie der Sprachproduktion

Präambel

In einem ersten Schritt werden in diesem Kapitel die primären Rindengebiete sowie die uni- bzw. multimodalen Assoziationsareale des Kortex in ihrer Funktionalität besprochen. Nach dieser Besprechung erfolgt in einem zweiten Schritt zunächst die anatomische Gliederung der Basalganglien sowie diejenige des Thalamus mit der Darstellung ihrer wichtigsten afferenten und efferenten Verbindungen.

Dann wird auf Aspekte der mündlichen Sprachproduktion eingegangen. Dabei wird einerseits eine Darlegung der Sprachproduktionsmodelle von Levelt und Deacon vollzogen. Zum anderen werden in der Literatur zu findende Darstellungen zur Initiierung sowie zur Ausführung von Sprechbewegungen zusammengefasst präsentiert. Dabei wird auch auf die nervale Versorgung der wichtigsten Muskeln der beiden Artikulationssysteme (Phonationssystem und System der glottal-supraglottalen Artikulation) kurz eingegangen.

Anschließend werden in einem letzten Schritt neuere Modelle zur Rolle subkortikaler Strukturen (Basalganglien und Thalamus) in der Sprachproduktion vorgestellt und diskutiert.

1. Kortikale Regionen

Der Kortex lässt sich unter funktionellen Gesichtspunkten in primäre Rindengebiete sowie unimodale und multimodale Assoziationsareale untergliedern (vgl. z. B. Rohen, 2001; Bähr & Frotscher, 2003).

1.1. Primäre Rindengebiete

Primäre Rindengebiete markieren einerseits die Endpunkte verschiedener sensibler und sensorischer Bahnen im Zentralen Nervensystem (rezeptive Primärgebiete), zum anderen existiert in ihnen auch ein motorisches Gebiet, das motorische Impulse über die Pyramidenbahn unmittelbar in Bewegung umsetzen kann.

Die primäre somatosensible Rinde (BA 3, 2, 1) entspricht etwa dem Gyrus postcentralis des Parietallappens sowie Anteilen des Gyrus präcentralis. Die Rinde erstreckt sich von der Dorsalfläche über die Mantelkante und nimmt an der Medianseite den posterioren Anteil des Lobulus paracentralis ein. Sie erhält ihre Afferenzen vom Nucleus ventralis posterolateralis und posteromedialis des Thalamus und ist für die Wahrnehmung von Schmerz- und Temperatur-

reizen sowie von Impulsen der Oberflächen- und Tiefensensibilität vor allem aus der kontralateralen Körperhälfte zuständig.

Die primäre motorische Rinde (BA 4) entspricht in etwa dem Gyrus präcentralis des Frontallappens. Sie erstreckt sich vor dem Sulcus centralis bis zum anterioren Anteil des Lobulus paracentralis an der Medianseite der Hemisphäre. Dieses Areal gilt als der Ursprungsort der Willkürmotorik, da es motorische Impulse über seine Verbindungen zu den Vorderhornzellen im Rückenmark zur Ausführung bringen kann. Das Areal erhält auch verschiedene afferente Zuflüsse, vor allem vom Nucleus ventrooralis posterior des Thalamus, von den supplementärmotorisch bzw. prämotorischen Arealen (BA 6 & 8) sowie von den somatosensiblen Regionen.

1.2. Unimodale und multimodale Assoziationsareale

Unimodale Assoziationsareale grenzen an die primären Rindenfelder des Kortex an. Hier finden generell erste Interpretationen der in den primären Rindenfeldern wahrgenommenen Sinnesreize statt. Die Informationen werden mit früher gespeicherten Informationen verglichen und damit in ihrer Bedeutung erkannt. Der somatosensible Assoziationskortex liegt direkt hinter dem primären somatosensiblen Kortex im BA 5; der auditorische Assoziationskortex im Bereich des Gyrus temporalis superior (BA 22). Die erwähnten Kortexareale erhalten keine direkten Afferenzen vom Thalamus, sondern sind über Assoziationsfasern mit den primären Rindenfeldern verbunden.

Die multimodalen Assoziationsareale sind zu keinem bestimmten Primärfeld mehr zuzuordnen. Sie stehen vielmehr mit zahlreichen Hirnarealen afferent und efferent in Verbindung und verarbeiten Informationen verschiedener sensorischer und sensibler Modalitäten. Den größten Raum nimmt hier der multimodale Teil des Frontallappens ein (etwa 20 % des Neokortex). Ein weiteres wichtiges kortikales Gebiet ist dabei der posteriore Parietallappen. Er ist für die Integration somatosensibler und visueller Eindrücke zuständig.

Im Frontallappen können neben dem bereits erwähnten primären Motorkortex das prämotorische Areal (BA 6) sowie die präfrontalen Regionen als ein ausgedehntes Gebiet multimodaler Assoziationsareale untergliedert werden (Bähr & Frotscher, 2003).⁷ Dem primären Motorkortex und dem prämotorischen Kortex wird ein funktionales System zur Planung und Kontrolle von Bewegungen zugesprochen. Nach der Planung und Selektion von Bewegungspro-

⁷ Andere Autoren wie z. B. Rohen (2001) unterteilen diese rostral des primärmotorischen Kortex (BA 4) gelegenen Areale in einen supplementärmotorischen Kortex (SMA, in BA 6) und einen prämotorischen Kortex (BA 8; vgl. z. B. Rohen, 2001: 104).

grammen im prämotorischen Kortex erfolgt deren Ausführung im motorischen Kortexareal. Man vermutet, dass in der prämotorischen Rinde im Zusammenwirken mit dem Kleinhirn und den Basalganglien eine Speicherung früher erlernter motorischer Abläufe stattfindet. Diese sog. „motorischen Engramme“ können dann bei Bedarf abgerufen werden. Neben dieser Leistung wird dieser Kortexregion die Planung und Initiierung von Augenbewegungen durch die frontalen Augenfelder (BA 8) zugesprochen. Dem präfrontalen Kortex werden funktionell hauptsächlich kognitive Aufgaben und die Steuerung des Verhaltens zugeordnet.

2. Subkortikale Regionen (Basalganglien und Thalamus)

2.1. Anatomische Gliederung der Basalganglien und ihre Verbindungen

Die Basalganglien sind subkortikal gelegene Kerngebiete innerhalb der weißen Substanz des Telencephalons (Endhirn), die aus dem Ganglienhügel des Keimlings (ventraler Anteil des Telencephalonbläschens) hervorgegangen sind und funktionell zusammengehören. (vgl. z. B. Nieuwenhuys et al., 1991; Afifi et al., 1995; Orrison; 1998; Bähr & Frotscher, 2003). Sie bilden das Herzstück einer Reihe weiterer zentralnervöser Strukturen, die neben dem Pyramidenbahnsystem an Bewegungsinitiation- und modulation beteiligt sind. Als „akzessorisch motorische Zentren“ sind sie lange Zeit dem pyramidalen System untergeordnet worden. Diesem System wurde vor allem die Steuerung der Motorik zugeschrieben, weil es die schnellste Verbindung zwischen motorischem Kortex und den motorischen Hirnnervenkernen (Tractus corticonuclearis), den großen Alpha-Vorderhornzellen sowie den Gamma-Motorzellen herstellt (Tractus corticospinalis).

Die dem pyramidalen System untergeordneten Strukturen wurden und werden noch mancherorts zum „extrapyramidalen System“ zusammengefasst. Dieser Begriff wird heute weitgehend als irreführend betrachtet, da das pyramidale und das extrapyramidale System nicht zwei verschiedene Systeme repräsentieren. Sie stellen vielmehr Untereinheiten eines gemeinsamen (motorischen) Systems dar. Beide Systeme sind somit sowohl funktionell als auch strukturell eng miteinander verbunden.

Zu den Basalganglien zählen im Allgemeinen der *Nucleus caudatus* (Schweifkern), das *Putamen* (Schalenkern) sowie Teile des *Globus pallidus* (Pars interna und Pars externa). Zudem werden entwicklungsgeschichtlich auch das *Clastrum* (seine Funktion ist nicht genau bekannt) und das *Corpus amygdaloideum* zu diesen Kernmassen gerechnet (Bähr & Frotscher, 2003). Beide

Strukturen haben jedoch keine direkte funktionelle Verbindung zu den Basalganglien. Der Nucleus caudatus und das Putamen stehen durch streifenförmige Zellbrücken miteinander in Verbindung. Deshalb haben sie den Namen *Corpus striatum* erhalten. Putamen und Globus pallidus werden zusammen auch als *Nucleus lentiformis* (Linsenkern) bezeichnet.

Der *Nucleus caudatus* folgt in seinem Verlauf dem Seitenventrikel (Bähr & Frotscher, 2003). Der Kopf bildet die laterale Wand dieses Ventrikels. Das sich verjüngende Schweifende befindet sich am Dach des Unterhorns im Schläfenlappen und reicht rostral bis an das Corpus amygdaloideum heran. In ihren rostralen Anteilen gehen Nucleus caudatus und Putamen ineinander über.

Das *Putamen* umgibt schalenförmig den Globus pallidus (Pallidum), den es rostral und caudal überlagert. Die Capsula externa trennt das Putamen lateral vom Claustrum. Medial wird es durch eine dünne Faserschicht (Lamina medullaris medialis) vom Pallidum abgegrenzt.

Als drittes Hauptkerngebiet der Basalganglien ist der *Globus pallidus* anzusehen. Er setzt sich aus einem inneren (Pars interna = Globus pallidus medialis) und einem äußeren (Pars externa = Globus pallidus lateralis) Glied zusammen. Mit den Basalganglien stehen einige Kerne des Mittelhirns in enger Verbindung. Es sind dies die *Substantia nigra* sowie der *Nucleus ruber* (Verbindungen zum Corpus striatum). Ferner besteht eine Verbindung des *Nucleus subthalamicus* des Zwischenhirns zum Globus pallidus.

Das Corpus striatum erhält zahlreiche *Afferenzen* von ausgedehnten Gebieten des Kortex, wobei die motorischen Anteile des Frontallappens (Areale 4 und 6) insbesondere daran beteiligt sind. Ob Verbindungen vom Corpus striatum zum Kortex bestehen, ist nicht gesichert. Weitere Punkt-zu-Punkt-Afferenzen erhält es vom Nucleus centromedianus des Thalamus. Hierüber werden Impulse aus dem Cerebellum (und von der *Formatio reticularis*) an das Striatum vermittelt. Aus der *Substantia nigra* kommen Afferenzen, deren Ausfall motorische Störungen bei M. Parkinson verursachen.

Der Globus pallidus erhält seine Hauptafferenzen aus dem Corpus striatum. Von der Hirnrinde selbst kommen Impulse zur *Substantia nigra*, zum Nucleus ruber und zum Nucleus subthalamicus.

Efferenzen verlaufen vom Corpus striatum zum Globus pallidus (Pars interna und Pars externa) sowie zur *Substantia nigra*. Vom Globus pallidus ziehen die meisten efferenten Fasern zum Thalamus. Von ihm aus besteht eine Rückkopplungsschleife zum Kortex.

Die Basalganglien sind also innerhalb des motorischen Systems durch afferente und efferente Verbindungen Bestandteile komplexer Schaltkreise, die den motorischen Kortex erregend oder hemmend beeinflussen. Welche dieser Verbindungen bei welchen sprachverarbeitenden Prozessen eine Rolle spielen, wird bisher in der Literatur unterschiedlich diskutiert.

2.2. Anatomische Gliederung des Thalamus dorsalis und seine Verbindungen

Der Thalamus dorsalis ist ein großer Zellkomplex, der neben dem Epithalamus, dem Subthalamus und dem Hypothalamus einen der vier Anteile des Diencephalons (Zwischenhirn) darstellt (vgl. z. B. Bähr & Frotscher, 2003; Rohen, 2001). Er befindet sich in jeder Hirnhälfte beiderseits vom dritten Ventrikel und besteht aus zahlreichen Kerngebieten mit unterschiedlicher Funktion. Der Thalamus dorsalis gilt als Umschaltstation für einen Großteil der afferenten Bahnen auf ihrem Weg zum Kortex. Darüber hinaus bestehen Verbindungen des Thalamus zu den Basalganglien, dem Cerebellum, dem Hirnstamm und den motorischen Kortexarealen. Auf diese Weise ist er in die Motorik eingebunden. Beim Thalamus dorsalis handelt es sich nicht um einen einheitlichen Zellkomplex. Er besteht vielmehr aus zahlreichen Kerngebieten (Nuclei), die unterschiedliche Afferenzen und Efferenzen haben. Rechter und linker Thalamus lassen sich jeweils in drei größere Zellgruppen unterteilen. Es sind dies die *Nuclei anteriores*, die *Nuclei ventrolaterales* und die *Nuclei mediales*.

Die *Nuclei ventrolaterales* werden wiederum in eine ventrale Kerngruppe (Nuclei ventrales) und in eine laterale Kerngruppe (Nuclei laterales) gegliedert. Zu den Nuclei ventrales zählen der VA (Nucleus ventralis anterior), der VL (Nucleus ventralis lateralis), der VPL (Nucleus ventralis posterolateralis) sowie der VPM (Nucleus ventralis posteromedialis).

Die *Nuclei laterales* bestehen aus einem Nucleus lateralis dorsalis und einem Nucleus lateralis posterior.

Zu den *Nuclei mediales* zählen der Nucleus centromedianus, die Nuclei intralaminares und der Nucleus medialis dorsalis.

Kaudal schließt sich als weiterer großer Zellkomplex das Pulvinar thalami mit dem darunter gelegenen Corpus geniculatum mediale und laterale an.

Die drei großen Zellgruppen sind auf Grund funktioneller Gesichtspunkte weiter unterteilt worden, so dass bis heute etwa 120 Untergruppen gezählt werden. Die *Hauptfunktionen* des Thalamus sind auf Grund der zahlreichen Kerngebiete sowie wegen zahlreicher efferenter und afferenter Verbindungen sehr kom-

plexer Natur. Der Thalamus ist zunächst die größte subkortikale *Sammelstelle* für alle Impulse der Außen- und Innenwelt. Dann ist er *Umschaltstation* für alle Impulse, die dem Großhirn (vom Hypothalamus, dem Cerebellum und dem Hirnstamm kommend) zufließen. Schließlich ist er auch ein wichtiges *Integrations- und Koordinationszentrum*, wo Afferenzen aus verschiedenen Körperteilen integriert und affektiv gefärbt werden. Durch seine Verbindung mit der Hirnrinde über Hin- und Rückprojektionen bekommt er auch von den motorischen Kortexarealen Rückmeldungen. Somit kann er auch (wie das Cerebellum) im Nebenschluss über die Basalganglien auf die *Motorik modifizierend* einwirken.

Welche dieser Verbindungen bei welchen sprachverarbeitenden Prozessen eine Rolle spielen, wird für den Thalamus ebenso wie für die Basalganglien bisher in der Literatur *unterschiedlich* diskutiert.

3. Mündliche Sprachproduktion

3.1. Modelle zur Sprachproduktion und Sprachlokalisation

Mit der Entwicklung nichtinvasiver Methoden der Hirnforschung ist die Möglichkeit geschaffen worden, die Funktionsweisen des gesamten Gehirns zu untersuchen. Dies bedeutet auch bezüglich der Entwicklung der Sprachproduktionsmodelle eine Weiterentwicklung (Frese, 2004). Die Modelle müssen nicht mehr nur auf Grund von Sprach- und Sprechstörungen bzw. auf der Basis von Sprechfehlern in der Spontansprache gesunder Sprecher erstellt werden. Dennoch bleibt zu erwähnen, dass fundamentale Erkenntnisse der Sprachforschung auf Patientenstudien zurückzuführen sind wie beispielsweise die Zuordnung von sprachlichen Funktionen zu bestimmten Gehirnregionen. Daher ist es auch nach wie vor angebracht, diese Forschungsrichtung in ihrer Wertigkeit zu würdigen. Zusätzlich zu den Erfahrungen mit Sprachstörungen, Sprechstörungen oder mit Versprechern führten Erkenntnisse aus Priming-Experimenten zu Modellkonzeptionen der Sprachproduktion (z. B. Levelt et al., 1991). Als allgemein anerkannt gilt dabei, dass der Sprachproduktionsprozess *drei* Verarbeitungsstufen hat. Hierbei handelt es sich um (a) die *Konzeptionalisierung*, (b) die *Formulierung* und (c) die *Artikulation* (Kempen & Hoenkamp, 1987).

In der Sprachproduktionsforschung zeichnen sich innerhalb der Modellkonzeptionen *zwei* Klassen ab.⁸ Zum einen handelt es sich um Modelle, bei denen

⁸ Übersichtsdarstellungen zu Sprachproduktionsmodellen geben z. B. Pechmann (1994) und Günther (1999). Zudem sind in Klabunde und von Stutterheim (1999) bzw. Wheeldon (2000) zahlreiche Beiträge zur Sprachproduktion zu finden.

einzelne *Module* postuliert werden. Zum andern werden Modellvorstellungen mit *interaktivem* Charakter präsentiert.

Die sog. *modularen Modelle* beinhalten einzelne Komponenten (Module), die autonom agieren und nur spezifische Leistungen erbringen können. Ihre Ergebnisse geben diese Module an die nachfolgenden Ebenen weiter. Es handelt sich hierbei also um eine lineare Verarbeitungsabfolge, bei der *keine* Rückkopplung zwischen den einzelnen Modulen vorkommt. Ein modulares Modell beruht auf der Annahme, dass eine Äußerung nicht vollständig konzeptualisiert ist, wenn sie formuliert wird, bzw. nicht vollständig formuliert ist, wenn sie artikuliert wird. Diese sog. inkrementelle Sprachverarbeitung beinhaltet die Vorstellung, dass Teile eines Satzes artikuliert werden können, während sich andere Teile noch in der Planung befinden (z. B. Fromkin, 1971; Garret, 1980; Levelt, 1989 & 1999; Dietrich, 1999).

Interaktive Modelle zeichnen sich hingegen durch *nichtautonome Verarbeitungsstufen* aus. Bei ihnen werden Informationen parallel verarbeitet (Frese, 2004). Die verschiedenen Ebenen der Verarbeitung sind dabei durch sog. Knoten miteinander verbunden und damit ein Teil eines gesamten Netzwerkes. Die einzelnen Ebenen sind hierarchisch aufgebaut und Prozesse können in ihnen gleichzeitig ablaufen. Auf jeder Stufe der Verarbeitung besteht die Möglichkeit einer Rückkopplung (feedback).

Neben anderen Autoren (z. B. Stemberger, 1985; Berg, 1988) stellt Dell (1986) ein interaktives Modell der Sprachproduktion vor. Ebenso wie Levelt (1989 & 1999) geht er darin von verschiedenen linguistischen Ebenen (semantische, syntaktische, morphologische und phonologische Ebene) aus, innerhalb derer generative Regeln wirken. Er entwickelt sein Modell jedoch nur am Teilprozess der phonologischen Enkodierung innerhalb der Sprachproduktion.

Im Gegensatz zu Dell stellt Levelt (1989 & 1999) ein ganzheitliches Modell auf, das sich nicht auf die Ausarbeitung eines Arbeitsschrittes beschränkt, sondern die Ebenen von der Konzeptionalisierung bis zur Artikulation darstellt (siehe auch Indefrey & Levelt, 2000):

Die *erste* Makrostufe im Sprachproduktionsprozess besteht folglich auch in seinem Modell in der *Konzeptionalisierung*. Innerhalb dieser prälinguistischen Stufe unterscheidet er zunächst die Makroplanung und die Mikroplanung für eine Äußerung. Ein wichtiger Bestandteil der Makroplanung ist die Linearisierung. Das heißt, der Sprecher legt die Reihenfolge der Informationen fest, und

die potentielle Aussage erhält so ihre erste inhaltliche Struktur. Während der Mikroplanung nimmt der Sprecher eine Perspektive ein. Diese besteht darin, die Sicht des Sprechers oder auch des Hörers darzustellen. Die Perspektive kann aber auch den zu beschreibenden Gegenstand betreffen.

Das Ergebnis dieser ersten Stufe stellt den Input für die *zweite* Makrostufe, die *Formulierung*, dar. Hier findet die Transformation der bis dahin nicht-sprachlichen Information in eine sprachliche Äußerung statt. Dabei wird der Formulierungsprozess von Levelt in zwei Teilprozesse unterteilt: (1) die grammatische und (2) die morphophonologische Enkodierung.

(1) Die grammatische Enkodierung ist ihrerseits wiederum in zwei Teilprozesse unterteilt: (a) die Aktivierung von Lemmata und (b) der Aufbau einer syntaktischen Struktur. Aktivierte Lemmata senden Anweisungen, die die syntaktischen Prozeduren in Gang setzen. Die syntaktischen Prozeduren suchen dabei nach einem Lemma, das als Kopf einer Phrase fungieren kann. Ist ein solches Lemma gefunden worden, dann wird nach weiteren Lemmata gesucht, mit denen eventuelle Lücken der Phrase gefüllt werden können. Zieleinheit dieser beiden Schritte ist die Oberflächenstruktur, die zum großen Teil lexikalisch veranlasst ist. (2) Die Oberflächenstruktur bildet den Input für den nächsten Verarbeitungsschritt, die morpho-phonologische Enkodierung. Sie markiert den Eingang in das phonetisch/phonologische System. Hier werden die lexikalischen Einheiten (Morpheme) phonologisch spezifiziert und syntaktisch richtig aneinandergereiht.

Die *dritte* Makrostufe der *Artikulation* besteht aus dem Prozess, wo entsprechende Programme aktiviert werden, die für die Koordination der Sprechmuskulatur sorgen. Dadurch kann eine Äußerung akustisch realisiert werden.

Neben dem Sprachproduktionsmodell von Levelt mit Aussagen über die einzelnen Prozessschritte beinhaltet das *Sprachlokalisationsmodell* von Deacon (1992 & 1997) Vermutungen zur räumlichen Einordnung von Sprachproduktionsprozessen. Der Autor geht in seinem physiologischen Modell von einem grob eingeteilten Netzwerk im Gehirn aus. Die verschiedenen Hirnregionen sieht er hierarchisch und parallel angeordnet. Dabei erkennt er der anterioren Sprachregion eine funktionelle und myeloarchitektonische Modularität in rostro-kaudaler Richtung zu. Innerhalb dieses Konzeptes umfassen die beiden kaudal gelegenen Komponenten das Repräsentationsareal der orofazialen und laryngalen Muskulatur sowie den angrenzenden prämotorischen Kortex. Diese Strukturen sollen für die Innervation der am Sprechen beteiligten Muskulatur (Motorkortex, Modul 1) und für die Organisation und Koordination komplexer

motorischer Bewegungsabläufe (prämotorischer Kortex, Modul 2) verantwortlich sein. Die beiden Module 1 und 2 weisen hinsichtlich ihrer Faserarchitektur reziproke Verbindungen mit den somatosensorischen parietalen Repräsentationsarealen des Gesichts und der Mundhöhle sowie mit anderen prämotorischen Regionen einschließlich des supplementärmotorischen Kortex auf. Die beiden rostral gelegenen Komponenten haben reziproke Verbindungen zum dorsolateralen präfrontalen Kortex und der Wernicke-Region (Modul 3) bzw. zu der anterioren cingulären Rinde und zu temporalen Assoziationsarealen (Modul 4). Somit umfasst das Modell von Deacon *vier* funktionell distinktive Module der anterioren Sprachregion, die in separate Netzwerke eingebunden sind. Die Erkenntnisse zu seinen Einteilungen basieren auf Studien mit elektrischer Stimulation. Innerhalb dieser Studien kam es unter Stimulation beispielsweise zu Störungen der Benennung von Gegenständen und zu Einschränkungen der allgemeinen grammatischen Fähigkeiten oder zu Sprachverzögerungen bzw. Sprachausfällen.

3.2. Initiierung von Sprechbewegungen

In neueren Lehrbüchern wird eine Beteiligung prämotorischer bzw. supplementärmotorischer Kortexareale (BA 6 und 8) an Prozessen der Generierung von Bewegungsprogrammen und der Initiierung von Sprechbewegungen herausgestellt (z. B. Bähr & Frotscher, 2003; Ziegler, 2005). Diese rostral des primär-motorischen Kortex (Gyrus präcentralis) gelegenen Rindenareale der linken Hemisphäre sind bisher als Speicher für sprechmotorische Programmrou-tinen angesehen worden. Läsionen in dieser Region galten als Ursache für Artikulationsstörungen (bei Broca-Aphasikern). Die meisten fMRT-Studien zeigen auch bei der mündlichen Produktion von Wörtern Aktivierungen in diesem Bereich (z. B. Price et al., 2000). Neurophysiologische Befunde deuten weiter darauf hin, dass im primär-motorischen Kortexareal (BA 4; Gyrus präcentralis) eine Integration motorischer Funktionen zu größeren Einheiten stattfindet (Roland & Zilles, 1996). Zudem wird angenommen, dass innerhalb der groben topographischen Repräsentationen (von Gesicht, Arm, Bein, Zunge, Larynx etc.) auf dem Homunculus die Beziehungen zwischen einzelnen Muskelgruppen und Zellpopulationen nicht eindeutig sind (Sanes et al., 1995). An verschiedenen Stellen auf der Oberfläche des motorischen Gesichtskortex sind zum Teil sehr komplexe motorische Aktivitäten von Zunge, Lippen und Kiefer auslösbar.

Neben diesem System wird ein zweites nichtmotorisches System mit Feldern des vorderen cingulären Kortex ebenfalls mit der Initiierung und dem Sprechtrieb in Verbindung gebracht (BA 24, 25 & 32). Bei dortigen Läsionen wird das Syndrom des akinetischen Mutismus beobachtet, das auch beim Sprechen von einer Aufhebung der Willkürmotorik gekennzeichnet ist. Bei zurückkehrendem Sprechtrieb ist eine leise und monotone Stimme zu finden. Manchmal wird auch von Stottern berichtet (Ziegler, 2002).

Schließlich weisen neuere Studien (z. B. Riecker et al., 2000) bei sog. stillem innerem Sprechen auf eine Aktivierung des Motorkortex hin. Bei lautlichem (offenem) Artikulieren wird in dieser Arbeit die Aktivierung in der linken Hemisphäre im Vergleich zum stillen (inneren) Sprechen als stärker charakterisiert.

3.3. Ausführung von Sprechbewegungen

Die Ausführung von Sprechbewegungen wird verschiedenen Regionen zugesprochen. Dabei sind zunächst der primärmotorische Kortex und kortikonukleäre Projektionen zu nennen. Areale, die für die am Sprechen beteiligten Organe verantwortlich sind, liegen im unteren Abschnitt der Präzentralregion nahe der sylvischen Furche (z. B. Fox et al., 2001; Grafton et al., 1991). Bei dem Versuch, die Areale für Lippen, Zunge, Unterkiefer und Kehlkopf zu lokalisieren, muss jedoch mit einer hohen *interindividuellen Varianz* gerechnet werden. Der motorische Gesichtskortex wird als Ausgangspunkt der direkten Verbindung zu den Hirnnervenkernen im Hirnstamm (Tractus corticonuclearis) betrachtet. Die absteigenden kortikonukleären Bahnen führen von den prärolandischen Rindengebieten in einem Faserbündel durch die innere Kapsel und verlassen auf der Höhe des Mittelhirns die Hauptmasse der Pyramidenbahn. Dort gelangen sie in einem mehr dorsalen Verlauf zu den motorischen Hirnnervenkernen. Diese werden teils gekreuzt, teils ungekreuzt erreicht. Ein Teil der Projektionen wird über die *Formatio reticularis* – ein ausgedehntes Netzwerk von Interneuronen im Bereich des gesamten Hirnstamms (Medulla oblongata, Pons und Mesencephalon) – umgeschaltet und zu nahezu allen Hirnnervenkernen gesendet. Dadurch wird wahrscheinlich zur Koordination der fazio-linguo-laryngealen Muskelkontraktionen beigetragen. Die *Formatio reticularis* ist auch wichtig bei der Integration von Bewegungsfunktionen zur Koordination der laryngealen Muskulatur (Kuriki et al., 1999). Die Bedeutung dieses Zentrums für supraglottale Artikulation ist noch nicht endgültig aufgeklärt (Ziegler, 2005).

Neuere Studien unterstreichen die Bedeutung des sensomotorischen Kortex, der Basalganglien, des Thalamus und des inferioren Cerebellums für die Ausführung von Sprechbewegungen (z. B. Riecker et al., 2005; Ackermann et al., 2005).

Für die motorische Steuerung der Phonation bzw. Artikulation sind *primär* zwei Hirnnervensysteme (Vagus X und Hypoglossus XII) verantwortlich (z. B. Bähr & Frotscher, 2003). Die Äste des N. vagus (X) sind für die motorische Versorgung des Kehlkopfes zuständig. Hierbei innerviert als ein Ast der N. laryngeus superior den einzigen außerhalb des Kehlkopfgerüsts liegenden M. cricothyroideus (äußerer Kehlkopfmuskel für die Grobspannung). Dem N. laryngeus inferior (N. recurrens) obliegt als ein anderer Ast die Versorgung der inneren Kehlkopfmuskulatur (M. transversus, M. vocalis, M. lateralis, M. posticus). Der N. recurrens unterläuft links die Aorta und rechts die A. subclavia und führt zufällig verteilt Fasern sowohl für die Schließer der Glottis als auch für den Öffner (M. posticus).

Zum andern sorgt der primär für die Zungenmotorik zuständige N. hypoglossus (XII) für die Innervation der bei den Artikulationsbewegungen der Zunge relevanten Muskeln (M. styloglossus, M. hyoglossus; M. genioglossus).

Neben den Hirnnerven X und XII sind weitere Hirnnerven an der Versorgung der Sprech- und Stimmuskulatur beteiligt. Äste des N. trigeminus (V) innervieren dabei die Muskulatur des Unterkiefers, Äste des N. facialis (VII) die orofaziale Muskulatur. Die Muskulatur des Rachens, des Kehlkopfes und des Gaumensegels wird auch von Ästen des N. glossopharyngeus (IX) und des N. accessorius (XI) innerviert (Ziegler, 2005).

Die Atmung wird über Thorakalnerven mit Kernen im Rückenmark vollzogen. Retikuläre Kerngebiete dorsal der Oliva inferior kontrollieren die Atmung. Die Hirnnervenkerne selbst bilden sprechmotorische Zentren des Hirnstamms (Nucleus trigeminus, facialis, ambiguus, hypoglossus). Afferente sensorische Informationen aus den Sprechorganen werden auch hier „umgeschaltet“. Rezeptoren der Haut und der Schleimhäute registrieren taktile Reize und den intraoralen Druck. Die propriozeptiven Reize über Spannung, Position und Länge der Muskulatur gehen über den Trigeminus (V). Von dort verlaufen sie über das Kleinhirn und den Thalamus in die sensorischen Rindenareale (Gyrus postcentralis, BA 1, 2, 3).

Neben diesem absteigenden System sind die *Basalganglien* und der *Thalamus* mit efferenten und afferenten Verbindungen Bestandteile komplexer Schaltkreise (vgl. auch Sektion 2.1. und 2.2. oben). Für die Sprechmotorik ist eine

Schleifenbahn (motorische Basalganglienschleife) von Bedeutung, die von den motorischen Kortextarealen über das Striatum (Putamen und Nucleus caudatus) zum ventrolateralen Thalamus (verschiedene Nuclei) zurück auf den supplementärmotorischen Kortex (BA 6) und den dorsolateralen primärmotorischen Kortex (BA 4) projiziert. Diesem System wird primär eine Wichtigkeit bei der *Ausführung automatisierter motorischer Programme* in der neuesten Literatur zuerkannt (Ziegler, 2005). Innerhalb dieser Schleifenbahn gibt es eine sog. direkte Projektionsbahn und eine sog. indirekte Projektionsbahn. Die direkte Bahn verläuft über das Striatum zum internen Pallidumglied (Globus pallidus medialis). Von dort über den Thalamus zum Kortex zurück. Die indirekte Bahn verläuft über das Striatum zum externen Pallidumglied (Globus pallidus lateralis), von dort zum Nucleus subthalamicus und dann über das interne Pallidumglied via Thalamus zum Kortex zurück (Ziegler, 1997).

Eine weitere wichtige Funktion bei der Ausführung von Sprechbewegungen wird dem *Kleinhirn*⁹ zugeschrieben (z. B. Riecker et al., 2005). Es ist ein zentrales Organ für die Feinabstimmung der Motorik (z. B. Lindblom, 1968 & 1983; Perkell, 1969 & 1980; McNeilage 1970; McNeilage & Ladefoged, 1976; Ghez, 1991). Das Kleinhirn integriert afferente Informationen aus der Peripherie mit efferenten Information aus dem motorischen Kortex. Die Informationen werden über den Hirnstamm und den Thalamus auf motorische Kortextareale zurückprojiziert. Hierbei ist das Cerebrocerebellum als einer der drei Kleinhirnabschnitte für die Sprechbewegungen wichtig (z. B. Gentil, 1990; Murphy et al., 1997; Ackermann et al., 1997; Wildgruber et al., 1998; Wise et al., 1999; Ackermann & Hertrich, 2000; Indefrey & Levelt, 2000; Dogil et al., 2002). Es erhält Efferenzen bei geplanten sprechmotorischen Willkürbewegungen über den Pons aus den Motorkortextebenen (BA 4 & 6) und Afferenzen über die Trigemuskernkerne aus der sprechmotorischen Peripherie (Kiefer, Zunge, Larynx etc.). Es kann somit modifizierend und korrigierend auf motorische Bewegungsimpulse einwirken. Danach werden Afferenzen über eine Hirnstamm- und Thalamusneuronenschleife in die motorischen Regionen des Kortex zurückgeführt. Von dort aus werden motorische Befehle über die Pyramidenbahn zu den Hirnnervenkernen und von dort zu den motorischen Endplatten der Sprechorgane projiziert. Wahrscheinlich werden die Ablaufschemata

⁹ Das Kleinhirn ist in drei Abschnitte (Vestibulo-, Spino-, Cerebrocerebellum) aufzuteilen. Den einzelnen Abschnitten kommen bei der Koordination der Motorik jeweils unterschiedliche Aufgaben zu: Das Vestibulocerebellum sorgt dafür, dass bei jeder Haltung und Bewegung das Gleichgewicht erhalten bleibt. Das Spinocerebellum dient der Kontrolle des Muskeltonus. Es gewährleistet ein reibungsloses Zusammenspiel antagonistischer Muskelgruppen beim Gehen und Stehen. Das *Cerebrocerebellum* ist mit einer *präzisen* und *zeitgerechten* Ausführung aller zielmotorischen Aktivitäten betraut.

im Kleinhirn gespeichert und wie in einem Computer abgerufen (Bähr & Frotscher, 2003).

Auf dem Hintergrund dieser Modellvorstellungen ist auch die Frage nach der relativen Beteiligung der *Basalganglien* und des *Thalamus* bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen umso interessanter zu bewerten. Durch das vorliegende fMRT-Experiment soll ein weiterer Beitrag zur Beantwortung dieser Frage anhand von phonatorisch-artikulatorisch differenzierten CV-Silbenwiederholungen geleistet werden.

4. Modelle zur Rolle der Basalganglien und des Thalamus in der Sprachproduktion

Die für die sprachverarbeitenden Prozesse zuständigen Gehirnstrukturen sind nach lange vorherrschender Lehrmeinung in der sprachdominanten Großhirnhemisphäre zu finden (Ziegler, 1997). Hier stellen vor allem die perisylvischen Kortexareale einen Großteil der Neuronenverbände zur Bewältigung dieser Aufgabe. Den tiefer gelegenen Strukturen wie den Basalganglien, dem Thalamus und dem Cerebellum werden innerhalb dieser Konzepte generell eher *Kontroll-* bzw. *Modifikationsaufgaben* bei den sprechmotorischen Funktionen zugerechnet. Evidenz dafür geben zahlreiche Studien, die von Dysarthrien bei unterschiedlichen Erkrankungen mit thalamo-striataler oder cerebellärer Beteiligung berichten.

Im Unterschied zum Thalamus ist die Rolle der Basalganglien bei der Sprachverarbeitung nicht unumstritten. Zwar gibt es auch über die thalamischen Funktion in der Sprachproduktion unterschiedliche Modellvorstellungen. Einigkeit besteht aber darüber, dass Läsionen thalamischer Kerne schwergradige und anhaltende sprachliche Ausfälle verursachen können. Die meisten Modelle schreiben dem Thalamus eine Rolle bei der selektiven Aktivierung sprachspezifischer Kortexareale zu. Seine sprechmotorischen Funktionen lassen sich aus seiner Einbindung in die kortiko-striato-thalamo-kortikale und in die cerebello-thalamo-kortikale motorische Schleife ableiten (z. B. Bähr & Frotscher, 2003). Innerhalb dieser motorischen Schleife transferiert er Informationen aus der Substantia nigra, dem Globus pallidus und dem Cerebellum zu den supplementärmotorischen, prämotorischen, motorischen und somatosensorischen Arealen des Kortex (z. B. Herrero et al., 2002). Alle thalamischen motorischen Neurone werden dabei aktiv, bevor die eigentliche motorische Bewegung beginnt. Neben der Integration des Thalamus in motorische Aspekte der Sprachproduktion wird auch die Möglichkeit seiner Beteiligung an kognitiven

sprachlichen Aspekten diskutiert (Johnson & Ojemann, 2000). Innerhalb dieser Vorstellung haben die verschiedenen Teile des Thalamus unterschiedliche Rollen.

Eine Beteiligung der Basalganglien am Sprachproduktionsprozess wird hingegen zum Beispiel in neuroradiologischen Aktivierungsstudien zur cerebralen Organisation der Sprachproduktion bei Gesunden bis noch vor einigen Jahren nur *selten* dokumentiert. Auch in Übersichtsarbeiten zu bildgebenden Verfahren (PET; fMRT) werden in den ersten Jahren ihrer Nutzung selten Studien erwähnt, die eine spezifische Beteiligung dieser Kernmassen hervorheben (Petersen & Fiez, 1993; Liotti et al., 1994; Ackermann et al., 1996). Eine dieser seltenen Studien ist von Eulitz et al. (1994). Die Autoren berichten in ihrer kombinierten PET- und MEG-Untersuchung von erhöhtem Blutfluss im linken Putamen bei der Generierung von Verben. Ebenfalls von relevanter Aktivität des linken Putamens berichten Klein et al. (1994), wenn sie PET-Aktivierungsmuster bilingualer Probanden beim Nachsprechen in der Erst- und Zweitsprache vergleichen. In ihren Ergebnissen sehen sie einen Hinweis auf eine Beteiligung des Putamens der sprachdominanten Hemisphäre an Artikulationsprozessen, die *weniger automatisiert* sind als die muttersprachliche Artikulation. Somit steht diese Interpretation im Widerspruch zur Auffassung, wonach die Basalganglien v. a. an der *Kontrolle* automatisierter motorischer Vorgänge beteiligt sind und dabei komplexe Bewegungssequenzen regulieren bzw. modifizieren und so für einen reibungslosen Bewegungsablauf sorgen (Bradshaw & Mattingley, 1995).

Die gängigen neurolinguistischen Modelle zur Rolle der Basalganglien und des Thalamus in der Sprachproduktion orientieren sich an aphasischen Symptomen nach *Läsionen* dieser tiefen Kerne, deren Zustandekommen sich grundsätzlich durch unterschiedliche Mechanismen erklären lässt (Ziegler, 1997). Bei den Modellvorstellungen wird einmal den Basalganglien selbst oder den mit dem Striatum verknüpften Schaltkreisen wie dem Thalamus mit seiner Punkt-zu-Punkt-Afferenz eine unmittelbare Beteiligung an sprachverarbeitenden Funktionen zugesprochen (z. B. Wallesch & Papagno, 1988; Damasio et al., 1982).

Zum andern werden die Basalganglienschaltkreise als Teil eines kognitiven und verhaltenssteuernden Systems betrachtet, dessen Schädigung zu einer nicht primär linguistisch bedingten Beeinträchtigung sprachlicher Funktionen führt (Kent, 2004). Spontane Sprache kann beispielsweise auch im Zusam-

menhang mit einer Antriebsstörung bzw. Willensschwäche (Abulie) reduziert sein (Caplan, 1990).

Ein weiterer Erklärungsansatz für das Zustandekommen aphasischer Symptome nach Läsionen besteht in der Annahme, dass Läsionen der Basalganglien (und des umgebenden Marklagers) die Verbindungsbahnen zwischen kortikalen Zentren unterbrechen. Diese von Alexander und seinen Mitarbeitern (Mega & Alexander, 1994) entwickelte Vorstellung erkennt den Basalganglien *keine* unmittelbare sprachverarbeitende Rolle zu.

Schließlich existiert ein Modell, das eine funktionell relevante kortikale Minderaktivierung auf Grund subkortikaler Läsionen annimmt. Die kortikale Minderaktivierung kann dabei einen Wegfall der selektiven Aktivierung sprachrelevanter Kortexareale auf Grund einer *striatalen* oder *thalamischen* Funktionsstörung anzeigen. Dieses Modell wird aus den Ergebnissen von Studien mit funktionellen bildverarbeitenden Verfahren hergeleitet (z. B. Metter, et al., 1988; Demeurisse et al., 1990).

Eine zusätzliche Vorstellung erkennt dem Basalgangliensystem keine Rolle beim Zustandekommen aphasischer Symptome zu (z. B. Weiller et al., 1993; Nadeau & Crosson, 1997). Die Aphasie bleibt nach diesem Modell ein rein kortikales Syndrom.

Neben diesen grundlegenden Erklärungsansätzen gibt es zwei weitere *differenziertere* Modelle zur subkortikalen Beteiligung (Basalganglien und Thalamus) an sprachverarbeitenden Funktionen, die unter anderen Modellen als die populärsten angesehen werden können (Ziegler, 1997; Murdoch, 2001).

Das *erste* Modell wurde von Crosson zunächst 1985 und dann in einer etwas modifizierten Form wiederum 1992 formuliert (Crosson, 1985 & 1992).

Innerhalb dieses Modells wird angenommen, dass vor einer „Freigabe“ einer Äußerung zur Produktion diese auf einer semantischen und einer phonologischen Ebene in den posterioren Spracharealen via Feedback-Schleifen über den Fasciculus arcuatus (phonologisches Monitoring) und das Pulvinar thalami (semantisches Monitoring) überprüft werden muss. Nach der Überprüfung kann sie an die motorischen Ausführungsfunktionen weitergeleitet werden. Der Autor spricht dem *Caput nuclei caudati* diesen sog. „Freigabemechanismus“ („response release mechanism“) für sprachliche Äußerungen durch erhöhten inhibitorischen Einfluss auf den medialen *Globus pallidus* zu. Dadurch wird dessen inhibitorische Wirkung auf die *ventralen Thalamuskern*e gemindert, was zu einer Verstärkung der Exzitation der vorderen Sprachareale und damit zur Initiierung der Äußerung führt.

Das *zweite* differenziertere Modell wurde von *Wallesch & Papagno* (1988) formuliert. Es geht davon aus, dass bei einer Produktion von Wörtern auf kortikaler Ebene mehrere miteinander konkurrierende Alternativen parallel aktiviert werden. Die der Situation angemessenste „Antwort“ wird durch einen *Selektionsprozess* gefunden (lexikalisches Entscheidungsmodell). Nach dieser Theorie sind die kortiko-striato-thalamo-kortikalen Schaltkreise besonders gut dazu geeignet, die Selektion durchzuführen und dabei über die ventralen Kerne des dominanten *Thalamus* nicht relevante „Wortkandidaten“ zu blockieren. Bei Läsionen im *Pallidum* ist die Selektion nicht mehr regelrecht möglich. Diese Läsionen führen nach dem Modell zu einer Disinhibition thalamischer Aktivität und damit zu einer ungezielten Inhibition lexikalischer Alternativen. Damit kann eine Erklärung des reduzierten sprachlichen Outputs bei vielen subkortikalen Syndromen geliefert werden. Läsionen auf der Ebene des *Thalamus* führen hingegen innerhalb dieser Vorstellungen zu Fehlinhibitionen lexikalischer Kandidaten und damit zu semantischen Paraphasien.

Neben diesen Modellvorstellungen sind weitere Erklärungsversuche zur Rolle der subkortikalen Strukturen beim Sprachproduktionsprozess auch in Studien neueren Datums zu finden.

So erkennt zum Beispiel *Murdoch* (2004) innerhalb der subkortikalen Mechanismen für die Kontrolle von Sprechbewegungen den Basalganglien „input-“ und „output-Strukturen“ zu. Demnach erhalten sie einmal „input“ vom cerebralen Kortex und produzieren zum andern in „output-Funktion“ über den *Thalamus* zurück zum Kortex. Innerhalb dieser Vorstellung haben die Basalganglien also in erster Linie die Funktion der *Informationsweiterleitung* zum Motorkortex.

Andere neuere Untersuchungen revidieren diesen Eindruck und erkennen den subkortikalen Strukturen Zugang zu weiteren im Frontallappen gelegenen Strukturen zu (*Middleton & Strick*, 2000). In Anbetracht dieser Vorstellungen kann die Anatomie der Basalganglien und des *Thalamus* durch das Vorhandensein multipler Verbindungsschleifen zum Kortex charakterisiert werden, die alle der „Grundroute“ vom Kortex zum Striatum und dann zum *Globus pallidus* bzw. von der *Substantia nigra* zum *Thalamus* und dann wieder zum Kortex folgen.

Die verschiedenen Modellvorstellungen und Erklärungsversuche zu den subkortikalen Mechanismen bei der Sprachproduktion erkennen zum einen den beiden Zellkomplexen der Basalganglien und des *Thalamus* offensichtlich je nach Sichtweise eine unterschiedliche Relevanz bei der Bewältigung dieser

Prozesse zu. Zum andern geht ihre Beteiligung daran je nach Standpunkt auch mit der Vorstellung einer differierenden Intensität einher.

Kapitel III. Experimente zur Sprachproduktion

Präambel

In diesem Kapitel werden vor allem mit bildgebenden Verfahren (PET, fMRT) erstellte aktuelle bzw. nur einige Jahre zurückliegende Studien besprochen. Sie haben größtenteils Aspekte der Sprachproduktion zum Untersuchungsgegenstand. Diese Aspekte haben zum einen für die vorliegende Arbeit unmittelbare Relevanz. Zum andern liegen sie im Umfeld der hier behandelten Thematik. Die Einordnung, Interpretation und Diskussion der aktuellen Ergebnisse des in der Arbeit präsentierten Experiments erfolgt deshalb auch auf der Grundlage dieser kurz besprochenen Studien. Abhandlungen, in denen mit elektrophysiologischen Methoden gearbeitet wurde, werden dabei nur punktuell berücksichtigt.

1. Forschungssituation

In zahlreichen Abhandlungen mit bildgebenden Verfahren wie der PET oder der fMRT konnte nachgewiesen werden, dass sich verschiedene linguistische Aspekte der Sprache auch in neurotopologischen Unterschieden widerspiegeln. Auf Grund der stark ansteigenden Anzahl an Studien zur Sprachverarbeitung unter Verwendung dieser Verfahren existieren bereits Veröffentlichungen, die einen Überblick über die verschiedenen Erkenntnisse innerhalb der Hirnforschung anbieten (z. B. Cabeza & Nyberg, 1997 & 2000). Cabeza und Nyberg fassen in beiden Publikationen PET-Experimente und in der neueren Publikation aus dem Jahre 2000 zusätzlich fMRT-Experimente mit gesunden Probanden zur funktionellen Neuroanatomie kognitiver Funktionen zusammen. Dabei kommen sie auf eine Anzahl von 275 Studien. Zur Sprachverarbeitung nahmen sie 31 Studien in ihre Auswahl mit auf. In all diesen Arbeiten ist von vorwiegenden Aktivierungen im Frontallappen, im und um das Broca-Areal in der linken Hemisphäre sowie bilateral entlang der Sylvischen Furche im Temporallappen die Rede.

In einem weiteren Überblicksartikel zur funktionellen Organisation von Sprachverarbeitung wird bei Martin (2003) herausgestellt, dass verschiedene frontale Regionen auf die Verarbeitung phonologischer, semantischer und syntaktischer Informationen spezialisiert sind. In diesen Bereichen werden auch verschiedene Funktionen ausgeführt. Temporale und parietale Regionen sind nach der Meinung des Autors hingegen für routiniert ablaufende Funktionen verantwortlich.

Die Anzahl der Studien zur funktionellen Neuroanatomie des Sprechens (und des Sprachverstehens) ist seit dem Jahr 2000 wiederum beträchtlich angestiegen. Somit kann eine Darstellung der Forschungssituation *keinen* Anspruch auf auch nur *annähernde* Vollständigkeit erheben.

2. Studien

Die im Folgenden angeführten Studien spezifizieren v. a. Aspekte der Sprachverarbeitung bzw. versuchen Areale zu konkretisieren, die im Zusammenhang mit dieser Verarbeitung stehen. Es sind Studien, die zum einen pathologisches Geschehen bei der Sprachproduktion betreffen, zum andern ihre Ergebnisse von gesunden Probanden herleiten.

So gehen **Markovic et al. (1996)** in ihrer Studie der Frage der somatotopischen Organisation des menschlichen Globus pallidus (GP) nach. Während einer stereotaktisch durchgeführten Pallidotomie untersuchen sie die funktionale Distribution der (medialen) Globus-pallidus-Neuronen bei 31 Parkinsonpatienten. Sie identifizieren dabei somatotopische Zellverbände, die ihre Entladungsrate bezüglich der Bewegungen verändern: Orofacial verbundene Verbände finden sie in der caudo-ventralen Region. Den unteren Extremitäten verbundene Verbände hingegen in der dorso-rostralen Region und armverbundene Verbände zwischen diesen beiden Teilen des medialen Globus pallidus. Diese Ergebnisse unterstützen eine partielle somatotopische Organisation des menschlichen GP.

Wise et al. (1999) bestimmen in ihrer Studie unter Verwendung der PET Gehirnareale, die bei der Artikulation verschiedener Sprechaufgaben relevant sind. Bei der Datenerhebung wird auf 12 gesunde Probanden zurückgegriffen. Es zeigt sich für die Autoren, dass Einzelwortwiederholungen nicht das Broca-Areal aktivieren, sondern andere linkslaterale Regionen. Es handelt sich dabei um die anteriore Inselregion, um eine Region im lateralen prämotorischen Kortex und um eine Region im posterioren Pallidum. Als Ergebnis ihrer Studie halten die Autoren fest, dass die artikulatorische *Planung* primär der linken anterioren Inselregion und dem lateralen prämotorischen Kortex zufalle und *nicht* vom Broca-Areal ausgehe. Zudem könne angenommen werden, dass das *linke* Basalgangliensystem für die Sprachproduktion dominant ist, obwohl die in Sprache involvierten Muskeln ihre motorischen Befehle von beiden cerebralen Hemisphären bekommen.

Andere Autoren wie z. B. **Riecker et al. (2000)** oder **Ackermann et al. (2004)** machen in ihren Studien die linke anteriore Inselregion (mit der rechten Hälfte

des Cerebellums) ebenfalls für die Koordination der Artikulations- und Phonationsmuskulatur bei der Produktion von Segmenten verantwortlich. Die in der rechten Hemisphäre gelegene Inselregion sei hingegen für Intonationskonturen bei den verbalen Äußerungen sowie für die Kontrolle der Vokaltraktmuskulatur beim Singen zuständig. In der Studie von Riecker et al. (2000) wird zudem herausgestellt, dass die Verarbeitung des sog. inneren Sprechens fast identisch mit der lautlichen (offenen) Artikulation sei. Die Autoren können auch bei innerem Sprechen eine Aktivierung des Motorkortex messen. Bei lautlichem (offenem) Artikulieren ist diese Aktivierung in der linken Hemisphäre im Vergleich zum stillen (inneren) Sprechen stärker. Zusätzlich und im Gegensatz zur stillen Bedingung berichten die Verfasser von einer rechtshemisphärischen Aktivierung des Motorkortex bei lautlichem Artikulieren.

Kent et al. (2000) berücksichtigen in ihrer Abhandlung Erkenntnisse, die auf Grund dysarthrischer Störungen bei der Sprachproduktion gewonnen werden. Sie stellen dabei zunächst die Hypothese auf, dass sowohl die Basalganglien als auch das Cerebellum zur Entwicklung und Aufrechterhaltung von Modellen zuständig sind, die zur Bewegungsvorbereitung und -ausführung flüssiger Sprache relevant sind. Eine weitere Hypothese der Autoren konkretisiert die Annahme, dass diese beiden Zentren auch an der sensorischen Information für die Planung und Ausführung von Sprechbewegungen beteiligt sind.

Die von Kent et al. den Basalganglien zuerkannte Rolle bei der Planung und Ausführung von Sprechbewegungen wird von **Maillard et al. (2000)** in ihrer fMRT-Studie in Bezug auf die somatotopische Organisation dieser Hirnregion aufgegriffen. Die Autoren untersuchen die Basalganglienstrukturen bei 6 Rechtshändern. Dabei stellen sie ihren Probanden auf akustischem Wege Aufgaben für die rechte Hand, den Fuß und das Gesicht. Als Ergebnis zeigen sich überlappende Aktivierungen entlang des linken Nucleus lentiformis für Hand-, Fuß- und Gesichtsrepräsentationen. Die Zentren dieser unterschiedlichen Körperteile können innerhalb des Nucleus lentiformis im Globus pallidus medialis in Form eines dreieckigen Musters objektiviert werden. Die Autoren vermuten deshalb auch bei den Basalganglienstrukturen ein unterschiedliches Organisationskonzept für die einzelnen Körperteile wie es beispielsweise im Gyrus präcentralis vorhanden ist.

In ihrer fMRT-Studie präsentieren **Palmer et al. (2001)** Wortstämme (z. B. Cou) mit 3 Buchstaben visuell. Zehn Versuchspersonen hatten die Aufgabe, daraus ein Wort zu generieren (z.B. Cousin) und es sich zunächst selbst zu sagen. Dabei bewegten sie die Lippen nicht. Dann sagten sie das Wort einmal

laut unter drei verschiedenen zeitlichen Präsentationsraten. Als Ergebnis zeigt sich, dass die aktivierten Regionen unter beiden Bedingungen (bei innerem und lautem Sprechen) gleich sind. Die Stärke der Aktivierung ist allerdings größer bei der Produktion der Wörter als bei deren Initiierung. Ebenso ist sie größer bei einer schnelleren Sprechrate.

Wildgruber et al. (2001) untersuchen in ihrer fMRT-Studie die unterschiedlichen Beiträge des Motorkortex, der Basalganglien und des Cerebellums zur Kontrolle beim Sprechen. Ihre Versuchspersonen vollzogen zunächst eine gedankliche Wiederholung der Silbe /ta/ in drei unterschiedlichen Sprechraten (2,5, 4,0 und 5,5 Hz). Als Ergebnis halten die Autoren zunächst eine positive Korrelation der Größe der hämodynamischen Antwort mit der Produktionsfrequenz fest. Bei den Basalganglien können sie zudem bei den beiden niedrigeren Frequenzen mehr Aktivität innerhalb des linken Putamens im Vergleich zu der 5,5 Hz Bedingung messen. Im Kontrast dazu ist die Antwort des Cerebellums eher eingeschränkt bei den schnellen Konditionen (4,0 und 5,5 Hz). In der caudalen Region zeigte sich aber ein Anstieg bei 5,5 Hz im Vergleich zu 4,0 Hz. Die Ergebnisse deuten auf eine unterschiedliche Beteiligung der kortikalen und subkortikalen Regionen bei der Kontrolle von Sprechbewegungen hin.

In einer neueren Studie liefern **Dogil et al. (2002)** einen Überblick über die experimentellen Ansätze im Zusammenhang mit neuroanatomischen Korrelaten bei der Sprachproduktion. Die Experimente zeigen, dass das erwartete breite sprachmotorische Netzwerk, bestehend aus supplementärmotorischem Areal (SMA), Motorkortex und Cerebellum nur bei der Planung und Ausführung *einfacher* artikulatorischer Bewegungen aktiv ist. Bei *komplexerer* Ausführung gibt es eine größere Fokussierung. Weiter ist festgestellt worden, dass die *Ausführung* nur die *linke Insel* aktiviert, während die artikulatorische *Planung* dies *nicht* tut. Ebenso zeigt sich bezüglich der Prosodie, dass die Größe der prosodischen Gestalt für die Aktivierung unterschiedlicher kortikaler Bereiche verantwortlich ist. Für syntaktische Prozesse der Sprachproduktion sind neben Brocas Areal auch Wernickes Areal und das Cerebellum aktiv.

Zudem legen **Dogil et al. (2003)** eine Arbeit zum Sprechnetzwerk im menschlichen Gehirn vor. In ihr vergleichen sie in einem ersten fMRT-Experiment Aktivierungen bei lautierendem Sprechen mit Aktivierungen bei nicht-lautierendem innerem Sprechen und Singen. Das Ergebnis des Experiments zeigt, dass der Sprechvorgang von mehreren miteinander kooperierenden Bereichen gesteuert wird. Diese Bereiche sind im motorischen Kortex, im supplementär-

motorischen Areal, in Teilen des Cerebellums, in Teilen des inferioren Frontallappens sowie in der linken vorderen Insel zu finden. Für die Autoren spielen die vorderen Teile der linken Insula eine entscheidende Rolle bei der Vorbereitung, Durchführung und Verifikation des Sprechvorgangs. Die Insula wird als „zentraler Prozessor“ für den Sprechvorgang angesehen. Dieses Ergebnis gibt den Autoren Evidenz dafür, dass das Syndrom der Sprechapraxie an eine Läsion der linken vorderen Inselregion gebunden ist. In einem zweiten Experiment widmen sich die Autoren in derselben Arbeit der Sprechproduktionsrate und der damit zusammenhängenden hämodynamischen Aktivierung. Auf der Grundlage der Datengewinnung bei innerem Sprechen können sie am motorischen Kortex einen linearen Zusammenhang von hämodynamischer Aktivierung und Silbenfrequenz nachweisen. Für das Putamen stellen sie im Rahmen der höchsten Repetitionsfrequenz eine im Vergleich zu den anderen Frequenzen reduzierte Aktivierung heraus. Deshalb scheint dieser Abschnitt der Basalganglien nach Meinung der Autoren eher an der Kontrolle langsamer Artikulationsbewegungen beteiligt zu sein.

Crosson et al. (2003) erkennen in ihrer fMRT-Studie den Basalganglienstrukturen eine Rolle bei der Wortgeneration zu. Hierbei wird v. a. den linksseitigen Strukturen diese Generation zugeschrieben. Den rechtsseitigen Strukturen rechnen die Autoren eher die Aufgabe einer rechtsseitigen frontalen Aktivitätsunterdrückung zu. Dadurch würden störende Einflüsse für die Sprachproduktion aus diesen Gebieten verhindert.

Gerardin et al. (2003) untersuchen in ihrer Studie die Repräsentation des Fußes, der Hand, des Gesichts und des Auges im Striatum. Neben Finger- und Zehenstreckungen werden von ihren Probanden auch Lippenkontraktionen vollzogen. Die Autoren finden für die Fuß-, Hand- und Gesichtsbewegungen vor allem im Putamen Aktivität mit somatotoper Organisation: Das Fußareal befindet sich dorsal, das Gesichtsareal mehr ventral und medial und das Handareal liegt dazwischen. Neben dieser groben Differenzierung sind auch Überlappungen vorhanden. Sie sind für die Hand und das Gesicht prominenter als für den Fuß und das Gesicht bzw. den Fuß und die Hand. Die ipsi- und kontralateralen Areale sind für die Hand nicht identisch, was eine partielle Trennung der ipsi- und kontralateralen striatalen sensomotorischen Projektionen vermuten lässt. Die Ergebnisse belegen die somatotopische Organisation des menschlichen Striatums. Sie hängen mit der Topographie der kortikostriatalen Projektionen zusammen, die bei nichthumanen Primaten beschrieben werden.

In einem Aufsatz von **Chainay et al. (2004)** wird unter Verwendung der fMRT ebenfalls Evidenz dafür gegeben, dass der supplementärmotorische Kortex (SMA) ebenso wie die Basalganglien, das Cerebellum und der primärmotorische Kortex somatotop organisiert ist und dort ebenfalls eine Landmarke für Körperteile vorhanden ist.

Whelan et al. (2004) betrachten die Auswirkungen der bilateralen posteroven-tralen Pallidotomie auf sprachliche Funktionen in ihrer Studie. Dazu werden 6 Personen mit M. Parkinson vor und nach der OP untersucht. Die Daten werden mit den Daten von 16 gesunden Kontrollpersonen verglichen. Die Ergebnisse sind bei der Gruppenbetrachtung nicht signifikant unterschiedlich zur Kontrollgruppe, allerdings aber bei der Individualbetrachtung. Die Rolle des Globus pallidus internus bei lexikalisch-semantischen Leistungen kann von den Autoren nachgewiesen werden.

In der fMRT-Studie von **Frese (2004)** zu neuroanatomischen Korrelaten syntaktischer Konstituentenanalysen wird u. a. auch der Vergleich zwischen innerem und lautem (offenem) Sprechen überprüft. Hierbei steht die Frage an, ob sich Unterschiede in den aktivierten Gehirnarealen unter beiden Bedingungen zeigen, oder ob sich die Areale weitgehend überschneiden. Die Autorin kommt zu dem Ergebnis, dass die Regionen überlappen. Allerdings sind im Modus der inneren Artikulation weniger Areale beteiligt als im offenen Modus. Unterstützt wird dieses Ergebnis durch die fehlende Aktivierung im Kon-trast des inneren mit dem lauten Sprechen. Die Areale, die bei lautem Spre-chen im Vergleich zum Grundzustand (Baseline) aktiviert werden, sind bilate-ral das supplementärmotorische Areal (SMA), der motorische Kortex, der au-ditorische Kortex im superioren temporalen Gyrus, im Okzipitallappen und im Cerebellum. Wie in anderen Studien berichtet (z. B. Dogil et. al., 2002) kann jedoch von der Autorin keine erhöhte Blutversorgung der linken anterioren In-sula gefunden werden.

Gil Robles et al. (2005) beschäftigen sich in einer neueren Studie mit der Rol-le des Striatums im Zusammenhang mit der Sprachproduktion. Durch eine in-traoperative Elektrostimulation werden 11 Patienten untersucht. Die Autoren verfolgen dabei die Absicht, eine zu erwartende Aphasie zu vermeiden. Sie vermuten auf Grund der Ergebnisse zur Stimulation, dass zwei separate Basal-gangliensysteme existierten. Das eine System habe eine motorische Rolle und liege im Putamen, während das andere eine kognitive Rolle habe und im Nucleus caudatus zu finden sei.

In ihrer fMRT-Studie untersuchen **Riecker et al. (2005)** 8 gesunde Personen auf die Möglichkeit einer Unterscheidung cerebraler Netzwerke für die Motorkontrolle bei der Sprachproduktion. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass *zwei separate* Netzwerke bei der sprachlichen kortikalen und subkortikalen Motorkontrolle vorhanden sind. Das erste Netzwerk befindet sich im medialen und dorsolateralen prämotorischen Kortex, der vorderen Insel und im superioren Cerebellum. Das zweite Netzwerk betrifft den sensomotorischen Kortex, den Thalamus, die Basalganglien und das inferiore Cerebellum. Beide Netzwerke liefern Evidenz für zwei Ebenen der Motorkontrolle. Das erste Netzwerk steht für die *Vorbereitung* und das zweite Netzwerk für die *Ausführung* von Sprechbewegungen.

Ackermann et al. (2005) berichten in einem Vortrag auf der Wissenschaftlichen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie sowie dem 24. Kongress der Union Europäischer Phoniater über das gleiche Experiment.

Ziegler (2005) zeigt in seinem Beitrag im Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie von Wendler et al. (2005) unterschiedliche Gehirnareale für die Initiierung von Sprechbewegungen gegenüber ihrer Ausführung auf. Während seiner Meinung nach v. a. die prämotorischen Kortexareale, rostral des primärmotorischen Kortex gelegen, für die Initiierung sowie Felder des cingulären und des supplementärmotorischen Kortex (SMA) mit Funktionen des Sprechtriebs und der Initiierung von Sprechbewegungen in Verbindung zu bringen sind, sind der primärmotorische Kortex und die kortikonukleären Projektionen, die Hirnnervenkerne und die Hirnnerven sowie die Stammganglien und das Kleinhirn für die Ausführung von Sprechbewegungen verantwortlich zu machen.

Haslinger et al. (2005) beschäftigen sich in einer neuen fMRT-Studie mit reduzierter sensomotorischer Aktivität bei spasmodischer Dysphonie vom Adduktortyp. Die Daten werden mit denjenigen einer gesunden Kontrollgruppe verglichen. Auf Grund einzukalkulierender Artefakte bei der aktiven Sprachproduktion entschließen sie sich, Daten zur stummen Produktion zu verwerten. Ihr Ergebnis besteht in einer Reduktion der Aktivierung bei den primären sensomotorischen Kortizes (primärmotorisches Areal 4; SMA Areal 6; anteriores cingulärmotorisches Areal 24; primärsensorische Areale 1,2,3; parietale Areale 5, 7) bei Patienten nach Botoxinjektion. Dieses Ergebnis haben sie teilweise auch bei Flüsteraufgaben beobachtet. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Botoxinjektion die Reduktion der kortikalen Aktivierung nicht verhindern

kann. Durch dieses Ergebnis wird eine neuronale Basis für die Stimmstörung der spasmodischen Dysphonie angedeutet.

Schließlich untersuchen **Delmaire et al. (2005)** die somatotopische Repräsentation im Striatum von Patienten mit Dystonie des rechten Arms. Dazu werden 14 Rechtshänder untersucht. Die Patienten führten eine Extension der rechten und linken Finger und Zehen sowie eine Kontraktion der Lippen aus. Die Ergebnisse zeigen eine sich verändernde alternierende somatotopische Organisation im linken Putamen. Der Grad der Erkrankung korreliert mit einer Minderaktivierung und Abnahme der Distanz zwischen der rechten Hand- und Lippenrepräsentation. Im rechten Putamen hat sich ipsilateral zu der betroffenen Hand die somatotopische Organisation nicht verändert. Der Grad der Erkrankung korreliert aber ebenfalls mit der reduzierten Distanz zwischen den Körperteilen. Offensichtlich besteht bei Dystonie eine geringere Differenzierung der normalerweise isolierten Gebiete im Putamen. Dies mag zu der weniger funktionalen Muskelaktivität bei dieser Art von Dystonie beitragen.

Olthoff et al. (2005) untersuchen in ihrer Studie die Stimmgebung unter Verwendung der fMRT. Hierzu wurden bei 11 gesunden Frauen 5 Telexperimente im typischen Blockdesign durchgeführt. Das Hauptexperiment betrifft die Phonation mit intonatorischen Fragen. Weitere Experimente differenzieren die auditorische Stimulation und die laryngale Motorik. Durch ihre Ergebnisse können die Autoren die somatotopische Gliederung des Zentralsulcus mit dem weit lateralen Zentrum der Larynxmotorik ebenfalls *nicht* bestätigen.

Shuster & Lemieux (2005) behandeln in ihrer Studie inneres und offenes Sprechen anhand von ein- und mehrsilbigen Wörtern unter Verwendung der fMRT. Sie interessieren sich dabei für die Rolle der linken Insel bei diesen beiden Aspekten der Sprachproduktion. Als Ergebnis halten sie fest, dass die linke Inselregion im Gegensatz zu einsilbigen bei mehrsilbigen Wörtern keinen BOLD-Effekt zeigt. Die linke Parietalregion zeigt hingegen bei mehrsilbigen Wörtern ein größeres Ausmaß an Aktivierung als bei einsilbigen. Dies steht in Einklang mit klinischen Studien, aus denen hervorgeht, dass Läsionen in diesem Gebiet zu Defiziten bei der Initiierung von Sprechbewegungen führen können. Trotz gewisser Gemeinsamkeiten zeigt sich, dass bei der Initiierung und Produktion nicht die gleiche hämodynamische Antwort zu finden ist. Der BOLD-Effekt war bei offenem Sprechen in denjenigen Regionen größer, die eine wichtige Rolle dabei spielen (linker prämotorischer Kortex, BA 6; linker primärmotorischer Kortex; linke Insel; linker superiorer Temporalgyrus).

In einer aktuellen Studie untersuchen **Monchi et al. (2006)** die Rolle der Basalganglien bei der Planung und Ausführung von Bewegungen unter Verwendung der fMRT. Sie testen dabei die Hypothese, dass der Nucleus caudatus primär in die Vorbereitung von neuen Handlungen involviert ist. Als Ergebnis halten die Autoren fest, dass signifikante Aktivierungen in den striatalen Strukturen (Nucleus caudatus und Putamen) nur bei Bedingungen vorhanden sind, in denen eine *kognitive Planung* zu einer Handlungsveränderung benötigt wird, während im Nucleus subthalamicus bei *allen* Handlungsveränderungen höhere Aktivität unabhängig von geplanten Handlungsveränderungen vorhanden ist. Sie kommen deshalb zum Schluss, dass die striatalen Strukturen besonders bei der Planung und Ausführung einer selbst generierten neuen Handlung wichtig sind, während der Nucleus subthalamicus bei einem neuen Motorprogramm benötigt wird, das unabhängig von einer eigenen Strategiewahl verlangt wird.

Watson & Montgomery (2006) messen in ihrer Studie unter Verwendung von Mikroelektroden die neurale Aktivität des Nucleus subthalamicus bei Satzproduktionswiederholungen und bei Silbenwiederholungen. Als Ergebnis halten sie fest, dass insgesamt die Veränderung der neuronalen Aktivität bei den Satz wiederholungen stärker ist. Sie schließen daraus, dass die Basalganglien bei der Generierung von aussagekräftigen Sätzen eine Rolle spielen und sie somit eine Funktion bei der Erstellung syntaktischer Strukturen für sich beanspruchen können.

In einer weiteren aktuellen fMRT-Studie berichten **Riecker et al. (2006)** von einer negativen linearen Beziehung zwischen der Frequenz der produzierten Silbenwiederholungen und der Aktivierungsintensität (höhere Frequenz bringt geringere Aktivierung) im Striatum. Daraus schließen die Autoren, dass die Basalganglien mit einer Minderung der Hämodynamik auf einen Anstieg der motorischen Anforderungen bei Wiederholungsbewegungen reagieren. Folglich kann bei den Basalganglienstrukturen von einer effizienten Organisation im Zusammenhang mit hochfrequenten Bewegungen ausgegangen werden. Aus diesem Hintergrund sehen die Autoren auch eine Erklärung dafür, dass striatale Dysfunktionen die Aufgabenbewältigung oraler Diadochokinese im Gegensatz zu anderen motorischen Störungen nicht beeinflussen, so dass z. B. bei Parkinsonismus eine zu findende unwillkürliche Beschleunigung des Sprechtempos erklärt werden kann.

Bohland & Günther (2006) berücksichtigen in ihrer umfangreichen Studie Stimuli mit unterschiedlicher Komplexität bezüglich der Silbenstruktur und

der zu produzierenden Silbensequenz. Sie stellen fest, dass die Komplexität der Aufgabenstellung mit einer Erweiterung des vorhandenen neuronalen Netzwerkes und einer Rekrutierung zusätzlicher cerebraler Strukturen einhergeht, die auch bei nichtsprachlichen motorischen Anforderungen herangezogen werden. Die Autoren nehmen an, dass der Erweiterung des Netzwerkes für die Organisation und Ausführung sprachlich komplexerer Produktion mechanistische Regeln zugrunde liegen.

Um das neurale Netzwerk bei der Sprachproduktion zu untersuchen, führen **Soros et al. (2006)** ebenfalls eine ereigniskorrelierte fMRT-Untersuchung durch. Ihre Probanden produzieren zunächst einen isolierten Vokal und vollziehen einfache orale Bewegungen. Darüber hinaus produzieren sie mono- und polysyllabische Äußerungen mit mehr Komplexität. Wie Bohland & Günther (2006) kommen sie zu dem Ergebnis, dass bei komplexeren sprachlichen Produktionen zusätzliche neurale Zentren aktiviert werden. Dadurch wird für sie eine größere Anforderung an die Koordination der Sprechbewegungen widerspiegelt.

Evidenz für Aktivität der Basalganglien während der Planung von Bewegungen und nicht während deren Ausführung geben **Elsinger et al. (2006)** in einer neuesten Studie. Die von ihren Probanden erbetenen motorischen Aufgaben bestanden in Fingerbewegungen. Anhand von Aktivitäten während der fMRT-Messungen können sie dem Striatum bei der internen Bewegungsplanung vor Implementierung von Bewegungsabläufen eine besondere Rolle zuerkennen.

Als Ergebnis dieser punktuellen Übersicht über Arbeiten der letzten 10 Jahre bleibt zu formulieren, dass (a) den kortikalen (sensomotorischen Zentren) und subkortikalen Strukturen (hier v. a. Basalganglien und Thalamus) *unterschiedliche* Aufgaben innerhalb des Sprachproduktionsprozesses zugesprochen werden und dass (b) bei einem Vergleich der Aktivierungsintensitäten bei der Initiierung von Sprechbewegungen mit denjenigen bei ihrer Ausführung von einer Tendenz der *Mehraktivierung* beim Prozess der *Ausführung* berichtet wird. Diese Tendenz hat sowohl für unterschiedliche kortikale als auch für unterschiedliche subkortikale Areale Gültigkeit.

In der vorliegenden Arbeit wird die Rolle dieser kortikalen und subkortikalen Strukturen bei den beiden Prozessen unter Verwendung artikulatorisch differenzierter Silbenproduktionen erneut unter die Lupe genommen. Dabei werden neben einem Vergleich der Aktivierungsintensitäten bei der Initiierung und

Produktion das Ausmaß der Aktivierungen bei beiden Prozessen in Bezug zu der den einzelnen Silbenproduktionen innewohnenden unterschiedlichen artikulatorischen Komplexität gesetzt. Hierbei wird also wie bei Soros et al. (2006) ein Augenmerk auf zusätzliche Aktivierungen im Zusammenhang mit Bewegungskomplexität gerichtet. Die Komplexität der artikulatorischen Aufgabe wird allerdings *nicht* durch das Hinzufügen weiterer Segmente bzw. komplexerer Äußerungen gestaltet. Es werden hier vielmehr die bei den verschiedenen CV-Silben vorhandenen unterschiedlichen artikulatorischen Anforderungen in ihren Auswirkungen auf hämodynamische Aktivierungsintensitäten betrachtet.

Die bei den beiden Prozessen der Initiierung und Produktion gewonnenen Ergebnisse zur neuronalen Aktivierung werden in der zusammenfassenden Diskussion zum Experiment unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel vorgestellten Arbeiten diskutiert.

Kapitel IV. fMRT-Experiment

Präambel

Das vorliegende fMRT-Experiment ist als Sprachproduktionsexperiment konzipiert. Wie bereits erwähnt (vgl. Einleitung, Sektion 1.) existieren im Vergleich zu Perzeptionsexperimenten relativ wenige Experimente zur Sprachproduktion, in denen die fMRT zur Anwendung kommt. Das liegt v. a. an Bewegungsartefakten, die bei sog. offenem (lautierendem) Sprechen auftreten können. Sie können eine Erschwernis der Interpretation der Ergebnisse mit sich bringen (z. B. Frese, 2004). Dennoch haben sich mit der Entwicklung der Untersuchungstechnik auch diese Schwierigkeiten verringert. So können z. B. durch die Verwendung von EPI-Sequenzen (vgl. Kap. I, Sektion 1.2.) die Datenaufnahmen eines einzelnen Bildes sehr schnell durchgeführt werden, so dass die Erfassung des BOLD-Effektes durch die Bewegungsartefakte nicht allzu sehr behindert wird (vgl. Kap. I, Sektion 1.1.). Dieser Ansatz wird auch in neueren Arbeiten mit zugrundeliegendem ereigniskorreliertem Design bestätigt. Die Arbeiten zeigen, dass neuronale Aktivierung und bewegungsbedingte Artefakte zu unterscheiden sind und auf diese Weise Experimente mit gesprochener Sprache durchführbar sind (z. B. Birn et al., 1998, 1999 & 2002; Palmer et al., 2001; Huang et al., 2001).

1. Material und Methode

1.1. Design des Experiments

Unter Verwendung der fMRT kommt in bildgebenden Studien entweder das *Blockdesign* oder das *ereigniskorrelierte Design* (event-related design) zur Anwendung. Wie der Name bereits sagt, werden beim Blockdesign die unterschiedlichen Aufgaben für die Versuchsperson blockweise gestellt, während beim ereigniskorrelierten Design eine zufällige Reihenfolge der Aufgabenstellung vorhanden ist. Als Gemeinsamkeit haben beide Designs eine Kontrollbedingung und eine Aufnahmebedingung. Die beiden Bedingungen müssen vorhanden sein, um Veränderungen des Blutflusses messen zu können. Innerhalb des ereigniskorrelierten Designs kann die zufällige Anordnung der Stimuli entweder durch kurze oder durch lange Pausen zwischen ihrer Präsentation gestaltet werden. Ein Vorteil des Blockdesigns besteht in seiner unkomplizierten Datenauswertung. Ein großer Nachteil dieser Designgestaltung ist jedoch darin zu sehen, dass sich die Versuchspersonen schnell an die vorhandene Aufgabenstellung gewöhnen können. Diese Gewöhnung geht in der Regel mit der

Entwicklung von Strategien zur effizienten Aufgabenbewältigung einher. So können Hirnaktivierungen verloren gehen, die bezüglich der Fragestellung relevant sein können. Anders ist es bei der zufälligen Präsentation der Stimuli. Bei dieser Vorgehensweise kann sich der Proband *nicht* auf die Aufgabenstellung einstellen. Jetzt muss sein Gehirn den kompletten Bearbeitungsprozess jedes Mal neu durchlaufen.

Dem in diesem Kapitel beschriebenen Experiment liegt das ereigniskorrelierte Design zugrunde.

1.2. Probanden und Aufnahmevorgang

An der Studie nahmen 12 rechtshändige Probanden (6 Männer und 6 Frauen) mit einer Altersverteilung von 43 bis 65 Jahre (Mittleres Alter 50; sd 7) teil. Diese Altersverteilung wurde im Hinblick auf geplante Folgeexperimente mit Patienten gewählt, bei denen die hier gewonnenen Daten als erste Referenzbasis dienen sollen (vgl. Kap. V, Sektion 3.). Die Versuchspersonen wurden vor dem Experiment ausführlich über seine Durchführung informiert. Keiner der Probanden hat zur Zeit der Aufnahme an neurologischen Erkrankungen gelitten. Während der Aufnahme lagen die Probanden horizontal in der Röhre des Kernspintomographen mit ihrem Kopf in einer Kopfspule eingebettet. Zur Dämmung des Scannerlärms trugen sie einen Kopfhörer. Dabei wurde ihr Kopf mit Hilfe von Polstern fixiert. Über einen Spiegel, der an der Kopfspule angebracht war, konnten sie die auf eine Leinwand projizierten Aufgabenstellungen sehen. Die Leinwand wurde am Eingang der Kernspinnröhre befestigt. Auf sie wurden die Aufgabenstellungen aus dem Regieraum mittels eines Beamers projiziert.

Der einzelne Aufnahmezyklus beinhaltete (a) die Anweisung zum Initiieren des Stimulus, (b) die Anweisung zum Warten (= Ruhezustand), (c) die Anweisung zum Produzieren des Stimulus und (d) wiederum die Anweisung zum Warten (= Ruhezustand). Darauf folgte der nächste Aufnahmezyklus mit derselben Struktur.

1.3. Stimulusmaterial

Das Stimulusmaterial bestand aus visuell dargebotenen Zeichen, mit denen die Probanden während der Aufnahme die im Folgenden dargelegten Aufgabenstellungen zu verbinden hatten. Die einzelnen Zeichen forderten sie eindeutig entweder (a) zum Warten, (b) zum Denken (Initiieren) über das, was sie im

Folgenden sprechen sollten oder (c) zum Sprechen (Produzieren) der Silbenfolge auf.

Die Probanden wurden angewiesen, die Silben mit einer mittleren Sprechproduktionsrate zu produzieren. Die Produktionsrate wurde ihnen vor Beginn des Experiments vorgesprochen.

Folgende Zeichen wurden als Kommandos für das Experiment verwandt:

>> bedeutete: „Warten“ (Ruhezustand, in dem nichts gemacht wurde = Baseline).

\° bedeutete: „An den Stimulus /'tatata/ denken.“

°° bedeutete: „An den Stimulus /'dadada/ denken.“

°/ bedeutete: „An den Stimulus /'nanana/ denken.“

bedeutete: „Sprechen des Stimulus, an den vorher gedacht wurde.“

Jeder Stimulus wurde in randomisierter Reihenfolge 30 Mal angeboten.

1.4. fMRT- und MRT-Messungen

Die fMRT- wurden mit einem 1.5 Tesla-Scanner durchgeführt (Siemens Vision, Siemens Erlangen). Messparameter: TE = 60 ms , TR = 2,69 s, 24 Schichten jeweils 5 mm Dicke, Abstand 1 mm; FA (Flip angle) = 90°, FOV (Field of view) = 240 x 240 mm, 64 x 64 Matrix; Voxelgröße = 3,75 x 3,75 mm, T2*-Echo-Planar-Imaging.

Zusätzlich zu den funktionell orientierten Aufnahmen wurden von allen Probanden in der gleichen Sitzung (mit demselben Scanner) anatomische T1-gewichtete MR-Aufnahmen mit sagittaler Schichtführung (MP-Rage, Auflösung 1,1719 mm³) angefertigt. Anhand dieser Aufnahmen konnte bestimmt werden, ob Gehirnanomalien bzw. neurologische Erkrankungen vorhanden waren. Dies traf für keinen der Probanden zu.

1.5. Datenauswertung

Für die Auswertung der mit der fMRT gewonnenen Daten existieren verschiedene Programme (vgl. Kap. I, Sektion 1.2.). Für dieses Experiment erfolgte die Analyse mit SPM99 (random-effects-Analyse). Nach der Durchführung der Bewegungskorrekturen wurde eine zeitliche Korrektur der Schichtfolgen vollzogen. Dann erfolgte die Normalisierung auf das MNI-Hirn (Ashburner & Friston, 1999) in einer Auflösung von 2x2x2 mm sowie eine Glättung mittels 8x8x8 mm Gaußfilter. Bei diesem im SPM99-Programm verwendeten standardisierten Gehirn handelt es sich um das vom „Montreal Neurological Institute“ entwickelte Gehirn (MNI-Template). Dieses Template ist allerdings im Ver-

gleich zu dem von Talairach & Tournoux (1988) verwendeten Template größer. Deshalb wurden die Koordinaten für die Präsentation der Ergebnisse des Experimentes auch in die Talairach-Koordinaten konvertiert.

Die Konvertierung erfolgte auf der folgenden web-Seite, auf der der Talairach Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) in elektronischer Form vorhanden ist: www.neurovia.umn.edu/webservice/tal_atlas.html.

Die ersten 4 Scans wurden von der Datenbearbeitung ausgeschlossen.

1.6. Statistik

Die statistische Bearbeitung der Daten wurde unter Rückgriff auf ein allgemeines lineares Modell (general linear model, GLM) mit eindimensionalen Tests für jedes Voxel (*t*-Statistiken) vollzogen. Bei den durchgeführten Kontrastierungen wurde die Subtraktionsmethode verwandt (vgl. Kap. I, Sektion 1.2.). *Alle* dargestellten Kontraste basieren auf einer Bonferroni-Korrektur bei multiplen Vergleichen.¹⁰ Dabei werden aber sog. „resels“ in die Korrektur mit aufgenommen.¹¹ Die Kontraste werden in *allen* Abbildungen auf unkorrigiertem Level angezeigt, aber statistisch nach sog. „small-volume-correction“ angegeben.¹² Das angeführte Signifikanzniveau beinhaltet *immer* den *korrigierten* p-Wert, wobei die Signifikanzgrenze für die Hypothesenprüfung mindestens $p = 0,05$ beträgt.

2. Hypothesen

Als eine *erste* Hypothese für das Experiment ist zu formulieren, dass die *Initiierung* von Sprechbewegungen *generell* (kortikal und subkortikal) *mehr Aktivierungen* verlangt als die Ausführung.

Die *zweite* Hypothese hat die Meinung zum Inhalt, dass bei der Initiierung in Arealen der *Basalganglien* und des *Thalamus* signifikant *stärkere* Aktivierungen vorhanden sind als bei der Produktion.

¹⁰ Der Bonferroni-Test korrigiert das beobachtete Signifikanzniveau unter Berücksichtigung der Tatsache, dass multiple Vergleiche vorgenommen werden (Pospeschill, 2006a & 2006b). Dazu führt der Test paarweise Vergleiche zwischen Gruppenmittelwerten mit *t*-Tests aus. Er regelt dabei auch die Gesamtfehlerrate, indem die Fehlerrate für jeden Test auf den Quotienten aus der experimentellen Fehlerrate und der Gesamtzahl der Tests gesetzt wird. So wird das beobachtete Signifikanzniveau an Mehrfachvergleiche angepasst.

Die Bonferroni-Korrektur wurde zum einen für das gesamte Gehirn, zum andern nach einer sog. „small-volume-correction“ (siehe Fußnote 9 unten) durchgeführt.

¹¹ Unter „resels“ versteht man örtlich benachbarte Voxelcluster mit gleichem Effekt bei der Kontrastierung.

¹² Die „small-volume-correction“ ist ein post-hoc-Prozess, welcher der „whole-brain-analysis“ nachgeschaltet wird, um örtliche Hypothesen zu testen.

Den beiden Hypothesen wird durch eine Kontrastierung der bei der Initiierung und Produktion vorhandenen Aktivierungen sowie durch eine Kontrastierung der jeweiligen prozessbezogenen Aktivierungen mit der Baseline (Ruhezustand) begegnet. Hierbei wird das Ausmaß und die Intensität der Aktivierungen herausgestellt.

Bei einer Verifizierung der zweiten Hypothese durch die Ergebnisse des Experiments kann auch die Rolle der Basalganglien und diejenige des Thalamus bei der Initiierung von Sprechbewegungen erneut zur Diskussion gestellt werden.

Eine *dritte* Hypothese beinhaltet die Aussage, dass eine Beziehung zwischen der *Komplexität* bei artikulatorischen Abfolgen und der *neuronalen Aktivierungsintensität* während der Initiierung und Produktion der Silben besteht. Es bleibt also zu überprüfen, ob komplexere Artikulationsabfolgen bei der Initiierung und Produktion mit einer kortikalen und/oder subkortikalen Mehraktivierung bzw. Zusatzaktivierung einhergehen.¹³

Die Hypothese wird durch eine Kontrastierung der Aktivierungen (auch *vice versa*) für die drei Silben während der Initiierung und Produktion getestet.

Eine *vierte* Hypothese betrifft die Frage nach erkennbaren *lateralitätsbezogenen* Tendenzen bei den Aktivierungen für beide Prozesse. Es kann hypothesiert werden, dass von lateralitätsbezogenem Aktivierungsverhalten bei beiden Prozessen in den kortikalen und subkortikalen Regionen auszugehen ist.

Diese Hypothese wird durch einen lateralitätsbezogenen Vergleich der kortikalen und subkortikalen Aktivierungen bei der Initiierung und Produktion verifiziert oder falsifiziert.

3. Methodisch orientierte Fragestellungen zum Experiment

Dem vorliegenden fMRT-Experiment liegen verschiedene methodisch orientierte Fragestellungen zugrunde. Diese werden aus den oben angeführten vier Hypothesen abgeleitet. Die Hypothesen bilden somit den Hintergrund für die differenzierten Fragestellungen.

¹³ In dem hier beschriebenen Experiment zeigt sich mehr artikulatorische Komplexität bei der Produktion der Silbenfolgen /'tatata/ im Vergleich mit den beiden anderen Silbenfolgen /'dadada/ und /'nanana/: Bei /'tatata/ werden im Wechsel eine glottale Abduktion und Adduktion der Stimmlippen sowie ein supraglottaler Verschluss mit nachfolgender Lösung und Erreichen der Vokalposition für die Zunge verlangt. Im Gegensatz dazu ist bei der Produktion der Silbenfolge /'dadada/ neben der Verschlussgeste der Zunge bzw. ihrer Geste für die nachfolgende Vokalproduktion keine vollständige laryngale Abduktions- und Adduktionsbewegung der Stimmlippen vonnöten. Die Stimmlippen schwingen weiter. Schließlich werden bei der Produktion der Silbenfolge /'nanana/ der supraglottale Verschluss für die /n/-Produktion sowie das Erreichen der Vokalposition bei gleichzeitiger Velumalternation verlangt. Auf der glottalen Ebene (Larynx) ist wegen des durchgängigen Schwingens der Stimmlippen keine Alternation in Form einer Ab- und Adduktionsgeste vorhanden.

Als Gemeinsamkeit haben die Fragestellungen (a) die *Initiierung* und (b) die *Ausführung* von Sprechbewegungen zum Gegenstand.¹⁴ Die Fragestellungen werden im Folgenden formuliert. Wenn aus der Literatur Kommentare und Sichtweisen zu ihnen bekannt sind, werden diese im Anschluss an die Formulierung der Fragestellungen angeführt.

Eine *erste* Fragestellung betrifft die Gehirnareale, die durch *gegenseitige Kontrastierung* (vice versa) der Initiierungs- und Produktionsaktivitäten herausgestellt werden können. Dabei stehen sowohl die kortikalen (motorischen und supplementär- bzw. prämotorischen Strukturen) als auch die subkortikalen Strukturen (Basalganglien und Thalamus) im Fokus des Interesses.

Eine *zweite* Fragestellung dreht sich um das gesamte Ausmaß von Hirnrealaktivierungen beim Ablauf des Initiierungs- und Produktionsprozesses. Hier stellt sich also durch die Kontrastierung der beiden Prozesse zur *Baseline* (Ruhezustand) konkret die Frage, ob beim Vergleich der Initiierungsaktivierung mit der Aktivierung bei der Produktion Quantitätsunterschiede bzw. topographische Unterschiede anhand unterschiedlich aktivierter Gehirnareale deutlich werden, oder ob die Aktivierungen der Areale quantitativ und topographisch übereinstimmen.

Eine *dritte* Fragestellung betrifft die in der Literatur den *Basalganglien* zugesprochene Rolle bei der Initiierung und der Ausführung von Sprechbewegungen. Ihr wird im Rahmen einer örtlichen Betrachtung dieser Areale (a) durch gegenseitige Subtraktion der Aktivierungen (vice versa) bei beiden Prozessen sowie (b) durch Kontrastierung der Aktivitäten zur Baseline nachgegangen.

Eine *vierte* Fragestellung betrifft die dem *Thalamus* zuzusprechende Rolle bei der Initiierung und der Ausführung von Sprechbewegungen. Sie ergibt sich auf Grund der funktionellen Zusammenhänge der thalamischen Kernmassen mit den die Basalganglien betreffenden Kernmassen bei motorischen Aufgaben. Ihr wird ebenfalls im Rahmen einer örtlichen Betrachtung dieses Areals (a) durch gegenseitige Subtraktion der Aktivierungen (vice versa) bei beiden Prozessen sowie (b) durch Kontrastierung der Aktivierungen zur Baseline nachgegangen.

¹⁴ Der Begriff „*Initiierung*“ beinhaltet den Handlungsantrieb (Motivation), die Planung und die Programmierung von Bewegungsprogrammen für auszuführende Sprechbewegungen. Somit enthält er auch die reine Vorstellung der artikulatorischen Bewegungen, die *keine* Ausführung erfahren. In der Literatur wird dieser Prozess mancherorts als „inneres bzw. nicht-lautierendes“ Sprechen bezeichnet. Er wird in vielen Studien dem Prozess des „lautierenden“ Sprechens, also der *Ausführung* der artikulatorischen Bewegungen entgegengesetzt (vgl. z. B. Dogil et al., 2003).

Die Rolle des Thalamus bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen wird wie diejenige der Basalganglien in der Literatur ebenfalls unterschiedlich diskutiert (vgl. Kap. II, Sektion 3.). Durch die Berücksichtigung der Basalganglien und des Thalamus bei der Berechnung der hämodynamischen Reaktionen auf die Stimuluspräsentationen kann die Rolle dieser subkortikalen Strukturen bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen fundiert definiert werden.

In der Literatur wird in neueren Studien zu dieser Fragestellung berichtet, dass im Vergleich der beiden Prozesse mit dem Ruhezustand abgesehen von Überschneidungen im Modus der *Initiierung weniger Areale* beteiligt seien als im Modus der Ausführung (z. B. Wildgruber et al., 1998; Indefrey & Levelt, 2000; Dogil et al., 2002 & 2003; Frese, 2004).

Eine *fünfte* Fragestellung betrifft die Möglichkeit einer „*komplexitätsbezogenen*“ *Aktivierungsdifferenzierung* bei der Initiierung und Produktion. Ob eine an glottal- und/oder supraglottal-artikulatorischen Abläufen mit unterschiedlicher artikulatorischer Komplexität orientierte cerebrale Aktivierung von Sprechbewegungen bei beiden Prozessen vorhanden ist, soll anhand der artikulatorisch verschiedenen Silbenproduktionen überprüft werden. Dazu werden die für die jeweiligen Silbenproduktionen konkretisierten Hirnaktivierungen unter Verwendung der Subtraktionsmethode voneinander abgegrenzt. Zu dieser Fragestellung liegen in der jüngsten Literatur unterschiedliche Ergebnisse vor. Sie sind unter Verwendung verschiedener methodischer Vorgehensweisen erarbeitet worden. Riecker et al. (2006) sprechen beispielsweise von einer *Minderung* der Hämodynamik in den Basalganglien als Reaktion auf einen Anstieg der motorischen Anforderungen bei Wiederholungsbewegungen. Bohland & Günther (2006) stellen anhand von Stimuli mit unterschiedlicher Komplexität bezüglich der Silbenstruktur und der zu produzierenden Silbensequenz fest, dass die Komplexität der Aufgabenstellung mit einer *Erweiterung* des vorhandenen neuronalen Netzwerkes und einer Rekrutierung zusätzlicher cerebraler Strukturen einhergeht. Wie Bohland & Günther kommen Soros et al. (2006) zu dem Ergebnis, dass bei komplexeren sprachlichen Produktionen *zusätzliche* neuronale Zentren aktiviert werden. Dadurch wird eine größere Anforderung an die Koordination der Sprechbewegungen widergespiegelt.

4. Ergebnisse

Die in dieser Sektion festgehaltenen Ergebnisse beinhalten in einem *ersten Schritt* sowohl die Subtraktion der Aktivierungen der Bedingung A (Initiierung) von den Aktivierungen der Bedingung B (Produktion) als auch die Subtraktion der Aktivierungen der Bedingung B von denjenigen der Bedingung A (*vice versa*).

Da bei der im ersten Schritt durchgeführten Subtraktion nicht ausgeschlossen werden kann, dass in den Arealen, die bei der Subtraktion „unterliegenden“, keine Aktivierung vorhanden ist, wird in einem *zweiten Schritt* ein jeweiliger Vergleich der beiden Bedingungen mit der Baseline (Ruhezustand)¹⁵ vorgenommen.

In den beiden *Schritten 3 und 4* wird dann eine örtliche Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus vollzogen. Dabei werden sowohl die Aktivierungen bei beiden Bedingungen A und B in gegenseitiger Subtraktion (*vice versa*, Schritt 3) als auch in Kontrast zur Baseline (Schritt 4) beleuchtet.¹⁶

Die *vice-versa-Kontrastierung* der beiden Bedingungen wird innerhalb der Schritte 1 und 3 deshalb vollzogen, um die *Größe der Unterschiede* der jeweiligen Bedingung gegenüber der anderen herauszustellen. Wenn kein Kontrast nachgewiesen werden kann, sind die Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen zu klein. Die Unterschiede haben somit die Subtraktion nicht „überstanden“.

Schließlich werden in einem *fünften Schritt* initiierungs- und produktionsbezogene Aktivierungsunterschiede bei der Kontrastierung der einzelnen Silben (/ʔtatatat/ vs. /ʔdadada/ vs. /ʔnanana/) beleuchtet. Dies geschieht mit einer Fokussierung auf den Motorkortex und auf weitere kortikale Zentren sowie auf die subkortikalen Zentren der Basalganglien und des Thalamus.

Bei der Darlegung der Aktivierungen finden – wenn die Differenzierung erforderlich ist – zunächst die kortikalen Zentren Erwähnung. Dann werden die subkortikalen Zentren herausgestellt.

¹⁵ Dieser Zustand wird in der Literatur etwas unglücklich auch als „Grundzustand“ bezeichnet (vgl. z. B. Frese, 2004).

¹⁶ Den der Datensichtung dienenden *Überblickdarstellungen* zur Gesamtaktivierung im Gehirn werden unter Bezug auf die einzelnen Fragestellungen die *örtlichen Betrachtungen* an den Basalganglien und am Thalamus nachgeschaltet. Die durch Kontrastierung erhaltenen Aktivierungen in den Überblickdarstellungen basieren auf einem sehr hohen Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur. Dabei können örtliche Aktivierungen in den für die Arbeit relevanten kortikalen oder subkortikalen Zentren nicht immer objektiviert werden. Deshalb werden für diese Zentren örtliche Hypothesen unter Rückgriff auf eine „small-volume-correction“ (siehe Fußnote 9 oben) überprüft. In der Diskussion zur Studie (vgl. Sektion 5 unten) werden neben den Ergebnissen zur Gesamtaktivierung v. a. diejenigen zur örtlichen Betrachtung berücksichtigt.

Bei der Besprechung der Aktivierungen werden nicht immer *alle* aktivierten Areale erwähnt. Die Erwähnung *beschränkt sich* bei den Darstellungen zur Gesamtaktivierung auf die für die Sprachproduktion *primär interessanten* kortikalen und subkortikalen Strukturen bzw. bei den Darstellungen mit Fadenkreuz bzw. mit relevantem Radius um das Fadenkreuz auf die dadurch fokussierten Areale.¹⁷

Schritt 1

1.1. Initiierung vs. Produktion

a. Kortikal

In der Überblicksdarstellung zu den im Kontrast herausgestellten gesamten Aktivierungen (Abbildung IV.1) während der Initiierungsphase werden Tendenzen der *Lateralität* verdeutlicht.

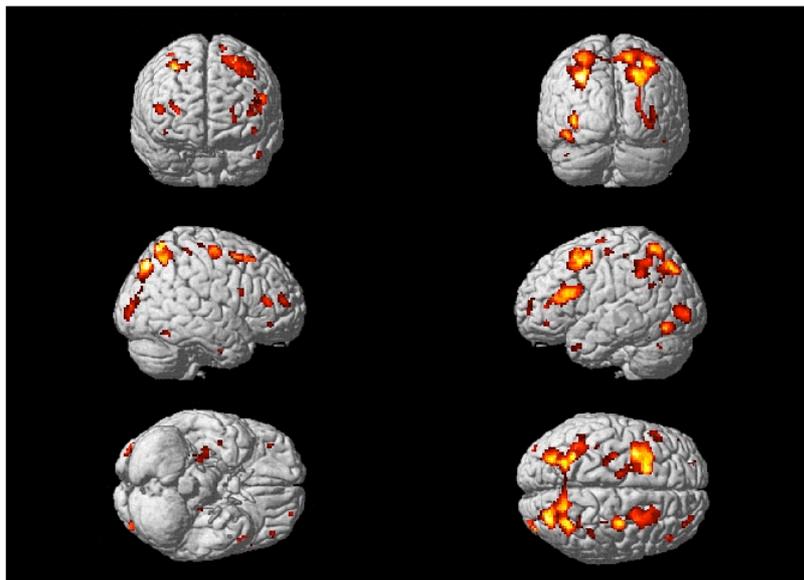
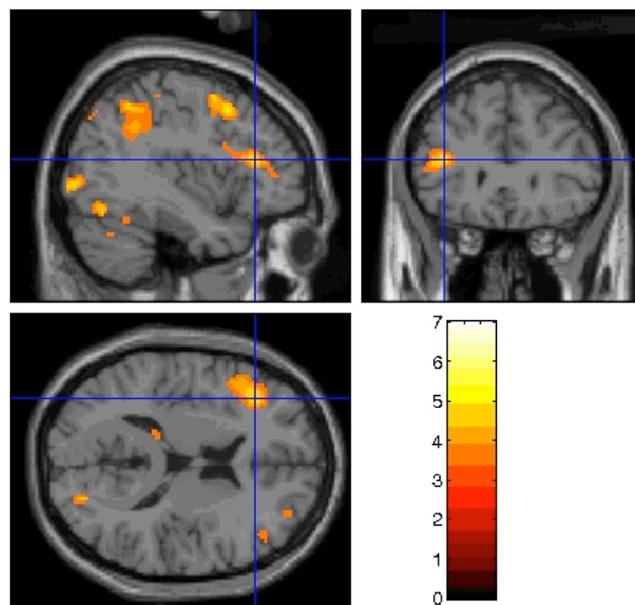


Abbildung IV.1: Kontrast 1.1. Initiierung vs. Produktion ($p < 0,01$ korr.). Gesamtaktivierungen. Oben in der Abbildung ist links die Sicht von vorne, rechts die Sicht von hinten auf das standardisierte Gehirn dargestellt. In der Mitte sind die rechte (links) und die linke (rechts) Hemisphäre zu sehen. Unten wird links die Sicht von unten und rechts die Sicht von oben gezeigt.

¹⁷ Diese Konzeption erscheint für die Argumentation sinnvoll. Durch ihre Verfolgung kann auf die für den Experimentansatz relevanten Fragestellungen besser eingegangen werden. So wird beispielsweise darauf verzichtet, eine eventuelle Aktivierung des primär visuellen Kortex (BA 17) zu erwähnen, da diese Aktivierung auf Grund der Experimentkonzeption mit Rückgriff auf eine visuelle Stimuluspräsentation sehr naheliegend ist.

Es zeigt sich, dass im Vergleich mit der rechten Hemisphäre vor allem kortikale Aktivierungen in der *linken* Hemisphäre vorhanden sind. In der Abbildung werden für die linke Hemisphäre supplementärmotorische bzw. prämotorische Areale (BA 6 & BA 8), der Motorkortex (BA 4), der Sulcus intraparietalis (BA 7a, 7b, 39 & 40) sowie die Broca-Region (BA 44, 45) aktiviert dargestellt. Eine fokussierte Darstellung der Aktivierungen unterstreicht diese bei der Initiierung vorhandenen linksseitigen kortikalen Aktivierungen am Beispiel des frontalen Hauptsprachfeldes (Broca-Region, BA 45). Die Aktivierungen werden in der Abbildung VI. 2 im Fadenkreuz verdeutlicht.



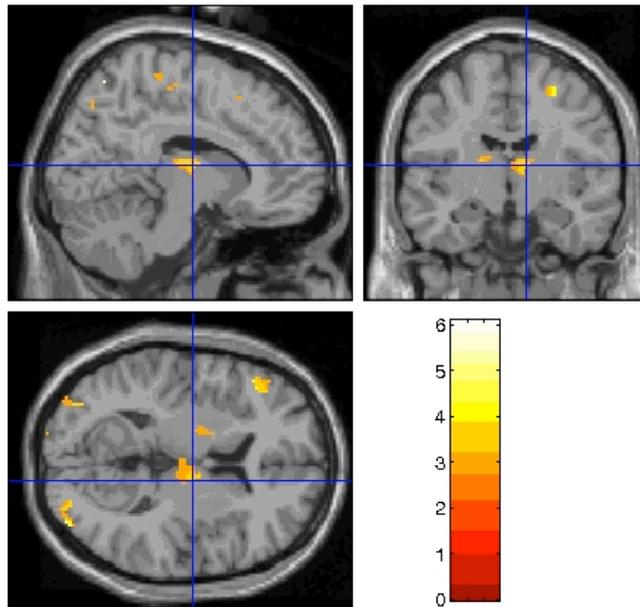
SPM99 (analyze): 10:28:13 - 02/11/2006

Abbildung IV.2: Kontrast 1.1. Initiierung vs. Produktion ($p < 0,01$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im frontalen Hauptsprachfeld (Broca-Region, in BA 45) links.

b. Subkortikal:

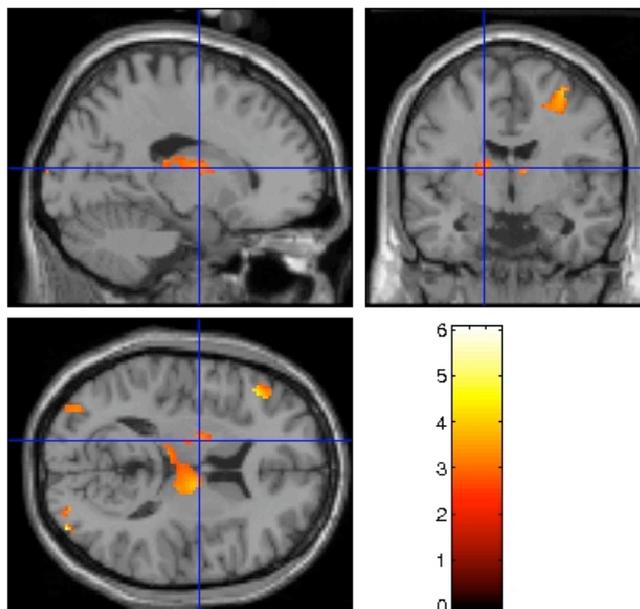
Hier zeigen sich zunächst in zwei Kernen des ventrolateralen Thalamus verstärkte Aktivierungen. Diese Aktivierungen sind aus den Abbildungen IV.3 (hier: Nucleus ventralis lateralis rechts) bzw. IV.4 (hier: Nucleus ventralis anterior links) zu entnehmen.

Die in den beiden Abbildungen gezeigten Aktivierungen deuten auf eine beidseitige Beteiligung der ventrolateralen Thalamuskern bei der *Initiierung* von Sprechbewegungen hin.



SPM99 (analyse): 11:22:07 - 03/11/2006

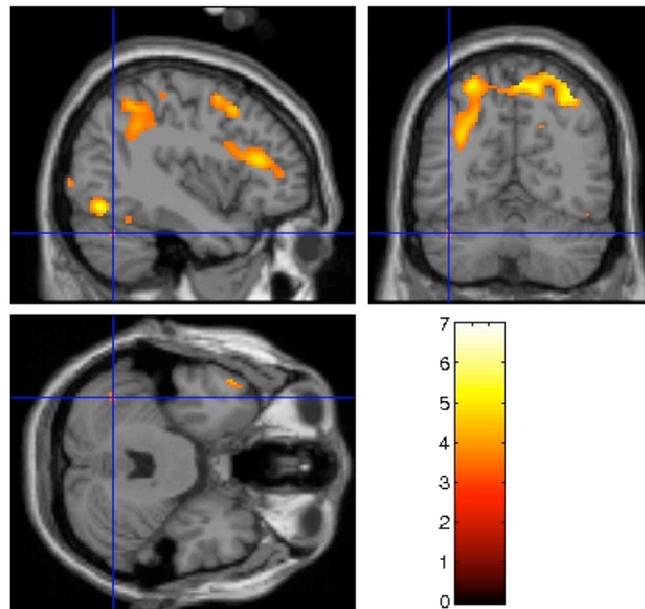
Abbildung IV.3: Kontrast 1.1. Initiierung vs. Produktion ($p < 0,01$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Nucleus ventralis lateralis (VL) des Thalamus rechts.



SPM99 (analyse): 10:48:12 - 12/01/2007

Abbildung IV.4: Kontrast 1.1. Initiierung vs. Produktion ($p < 0,05$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Nucleus ventralis anterior (VA) des Thalamus links.

Zusätzlich zu diesen subkortikalen Zentren wird im Kontrast das linke Cerebellum aktiviert, was in der Abbildung IV.5 verdeutlicht wird.



SPM9 (analyse): 1029/31 - 12/01/2007

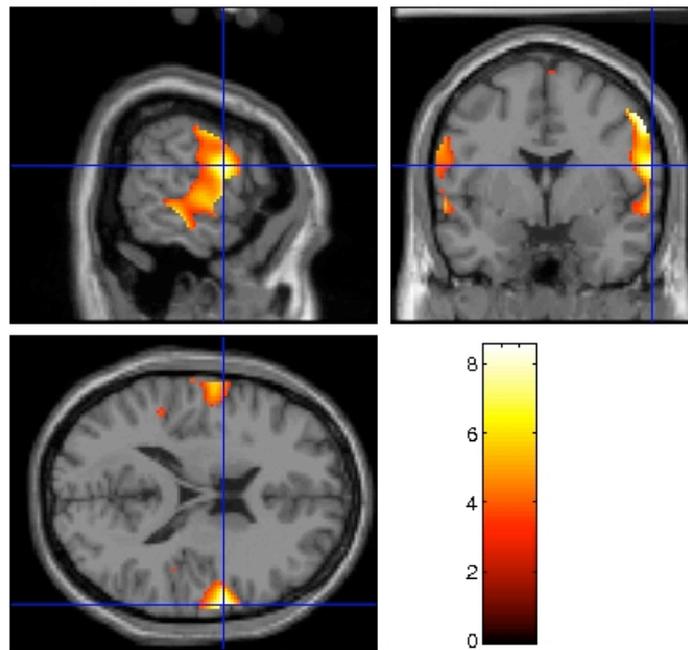
Abbildung IV.5: Kontrast 1.1. Initiierung vs. Produktion ($p < 0,05$ kor.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Cerebellum (Pars lateralis = Cerebrocerebellum) links.

1.2. Produktion vs. Initiierung

a. Kortikal

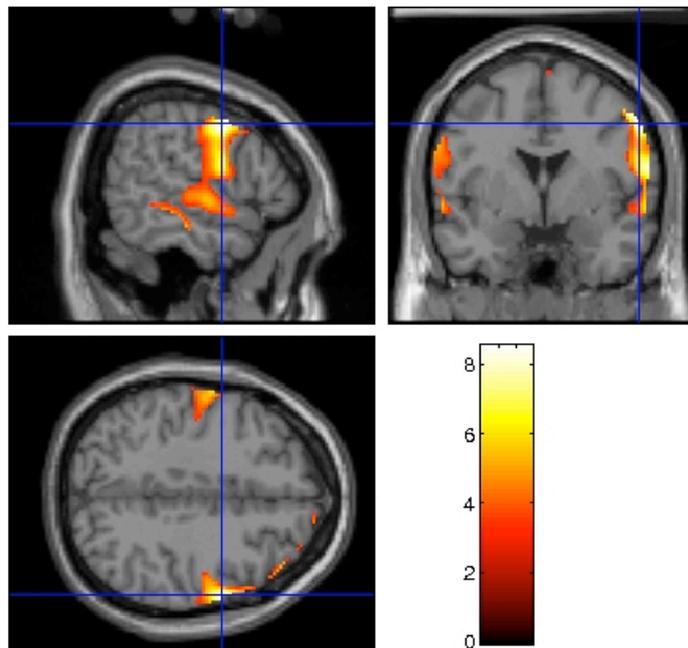
Im Kontrast „Produktion der Silben vs. Initiierung der Silben“ zeigen sich vor allem sehr deutlich 2 Zentren der Aktivierung im *rechten* Motorkortex (BA 4). Die Zentren werden in den Abbildungen IV.6 und IV.7 dargestellt.

Sie verweisen auf die grobe topographische Organisation für den Gesichtskortex innerhalb der primären motorischen Rinde und belegen die Lateralitätstendenzen für die Produktion (eher rechte Hemisphäre).



SPM99 (analyze): 10211:11 - 12/01/2007

Abbildung IV.6: Kontrast 1.2. Produktion vs. Initiierung ($p < 0,01$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Gyrus präcentralis rechts, 1. Zentrum.

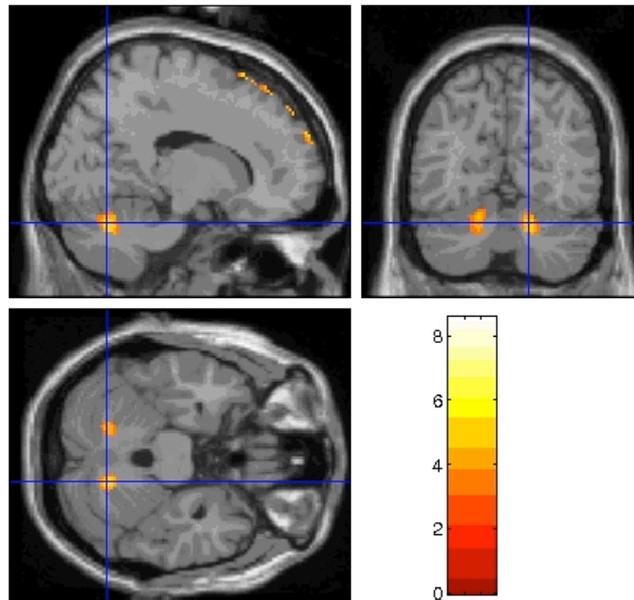


SPM99 (analyze): 10212:6 - 12/01/2007

Abbildung IV.7: Kontrast 1.2. Produktion vs. Initiierung ($p < 0,01$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Gyrus präcentralis rechts, 2. Zentrum.

b. Subkortikal

Neben den kortikalen Aktivierungen finden sich auch subkortikal im beidseitigen Cerebellum (Pars intermedialis des Spinocerebellums) Aktivierungen, was in der Abbildung IV.8 (Fadenkreuz rechts) zu sehen ist.



SPM99 (analyze): 11:01:24 - 03/11/2005

Abbildung IV.8: Kontrast 1.2. Produktion vs. Initiierung ($p < 0,01$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im beidseitigen Cerebellum (Spinocerebellum = Pars intermedialis; Fadenkreuz rechts).

Die Aktivierungen entsprechen der dem Spinocerebellum (Pars intermedialis) zugesprochenen Bewegungsregulation (vgl. auch Kap. II, Sektion 3.3.)

Bei der in diesem Schritt vollzogenen Kontrastierung können in den Basalganglien und im Thalamus *keine* Aktivierungen nachgewiesen werden.

Schritt 2

2.1. Initiierung vs. Baseline

Alle durch Kontrastierung der Silbeninitiierung mit der Baseline (Ruhezustand) vorhandenen signifikanten Aktivierungen sind aus der Überblickdarstellung in der Abbildung IV.9 zu entnehmen. Sie betreffen wie in der jüngsten Literatur (vgl. z. B. Riecker et al., 2005) berichtet die medialen und lateralen supplementärmotorischen Areale (BA 6), den dorsolateralen frontalen Kortex (BA 8 & BA 46), die anteriore Insel sowie das beidseitige superiore Cerebellum (Pars lateralis, Cerebrocerebellum). *Zusätzlich* zu diesen in der Literatur

zu findenden Aktivierungsangaben können der Motorkortex (BA 4), der Sulcus intraparietalis (BA 7a, 7b, 39 & 40), Basalganglienstrukturen (Globus pallidus, Putamen) und der Thalamus kontrastiert werden.

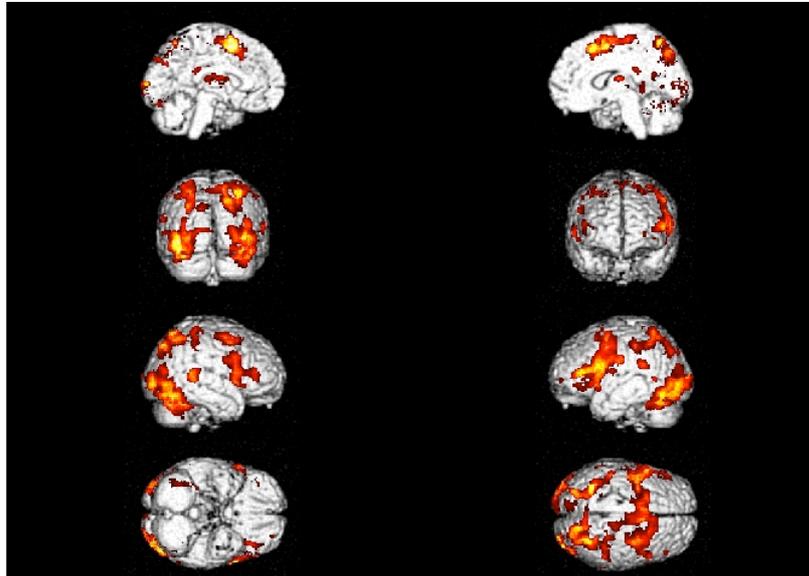


Abbildung IV.9: Kontrast 2.1. Initiierung vs. Baseline ($p < 0,01$ korr.). Gesamtaktivierungen. Oben in der Abbildung ist ein rechter (links) und ein linker (rechts) sagittaler Schnitt zu sehen. Darunter ist links die Sicht von vorne, rechts die Sicht von hinten auf das standardisierte Gehirn dargestellt. In der dritten Abbildungsreihe sind die rechte (links) und die linke (rechts) Hemisphäre zu sehen. Ganz unten wird links die Sicht von unten und rechts die Sicht von oben gezeigt.

Auch hier sind Tendenzen der *Lateralität* zu erkennen. Die kortikalen Aktivierungen in der *linken* Hemisphäre zeigen eine stärkere Ausprägung.

2.2. Produktion vs. Baseline

Einen Gesamtüberblick über die Aktivierungen bei der Produktion aller Silben im Kontrast zur Baseline wird in der Abbildung IV.10 gegeben.

Die hier sichtbaren Aktivierungen betreffen den Motorkortex (BA 4), den suprioren Temporallappen (Wernicke-Region, BA 22), den suprioren Frontallappen (BA 8) sowie subkortikal das inferiore laterale Cerebellum beidseitig. Die Basalganglien und der Thalamus können innerhalb dieser Darstellung *nicht* kontrastiert werden. Die kortikalen Aktivierungen sind in der *rechten* Hemisphäre stärker (vgl. auch Abbildung IV.6 & IV.7).

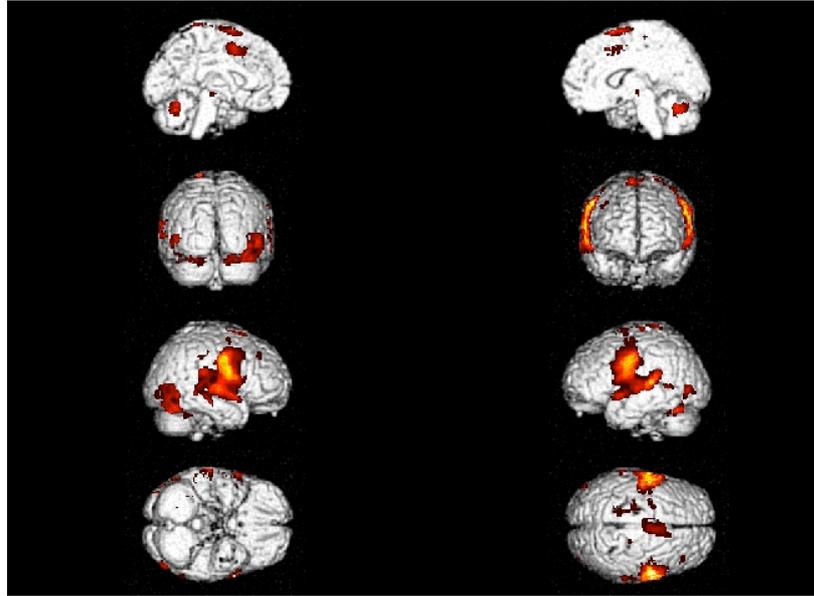
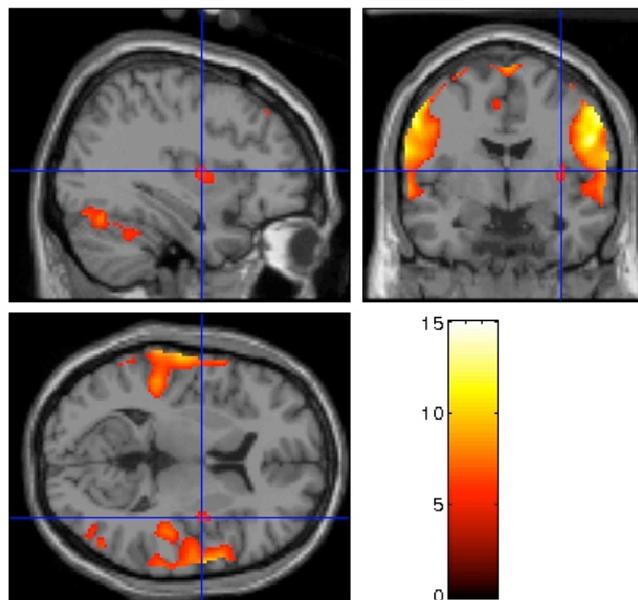


Abbildung IV.10: Kontrast 2.2. Produktion vs. Baseline ($p < 0,001$ korr). Gesamtaktivierungen.

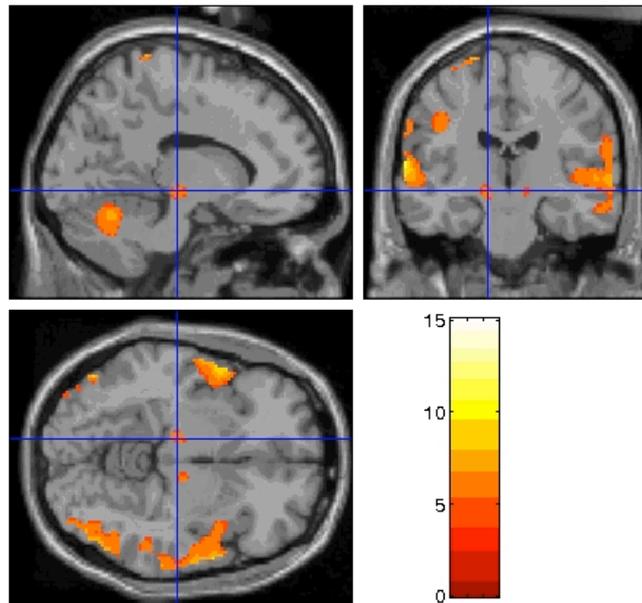
Zusätzlich zu diesen kortikalen Aktivierungen kann unter dem Operculum bei der rechten Inselregion (Inselkortex) eine Aktivierung aufgewiesen werden, was in der Abbildungen IV.11 im Fadenkreuz deutlich wird.



SPM99 (analyze): 11:16:54 - 12/01/2007

Abbildung IV.11: Kontrast 2.2. Produktion vs. Baseline ($p < 0,05$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung in der rechten Inselregion.

Bei einer weiteren Fokussierung lässt sich subkortikal beidseitig die Substantia nigra (hier im Fadenkreuz links) als assoziiertes Kerngebiet zu den Basalganglien beidseitig kontrastieren. Dies wird in der Abbildung IV.12 verdeutlicht.



SPM99 (analyze): 12/05/06 - 03/11/2006

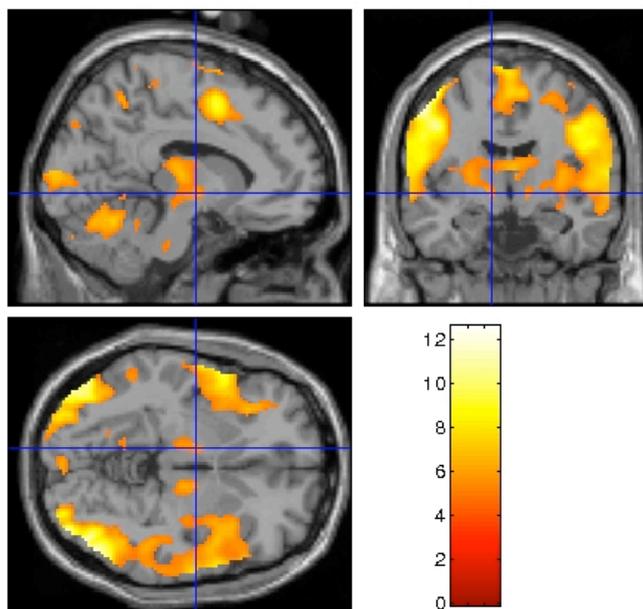
Abbildung IV.12: Kontrast 2.2. Produktion vs. Baseline ($p < 0,01$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung in der Substantia nigra beidseitig (Fadenkreuz links).

Schritte 3 und 4

Örtliche Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus

Um die Punkte für eine örtliche Betrachtung zu definieren, werden die Initiierungs- und Produktionsaktivierungen innerhalb einer sog. „conjunction-analysis“ zusammengenommen. Der Kontrast gegenüber den Nichtaktivierungen im Gehirn wird nach einer Bonferroni-Korrektur dargestellt.

Das Ergebnis zu den zusammengenommenen Aktivierungen für die Initiierung und Produktion wird in den Abbildungen IV.13 und IV.14 für die Basalganglien (Areal um das Fadenkreuz) sowie in den Abbildungen IV.15 und IV.16 für den Thalamus (Areal um das Fadenkreuz) auf korrigiertem Signifikanzniveau dargestellt. Alle in den Abbildungen dargestellten Voxel sind somit auch nach einer Bonferroni-Korrektur über das gesamte Gehirn signifikant.

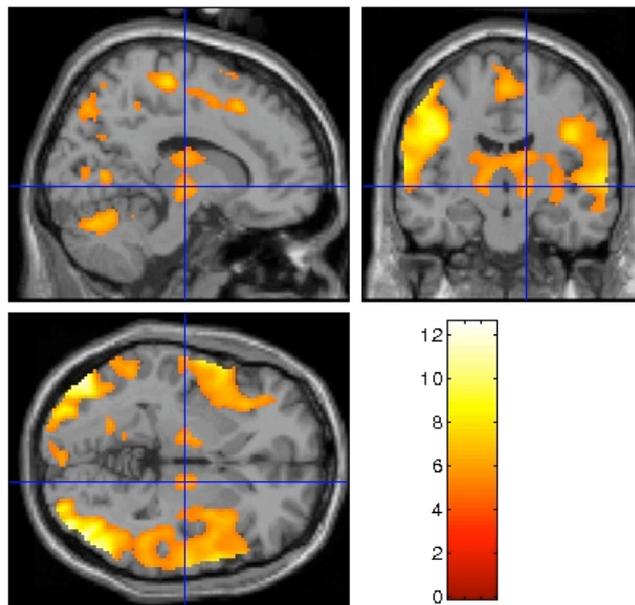


SPIES9 (analyse): 10:57:20 - 16/03/2007

Abbildung IV.13: Fokussierte Darstellung der Initiierungs- und Produktionsaktivierungen in den Basalganglien links

Im Fadenkreuz befindet sich hier der Nucleus subthalamicus (Talairach mm: -9,9 -7,9 -3,0).

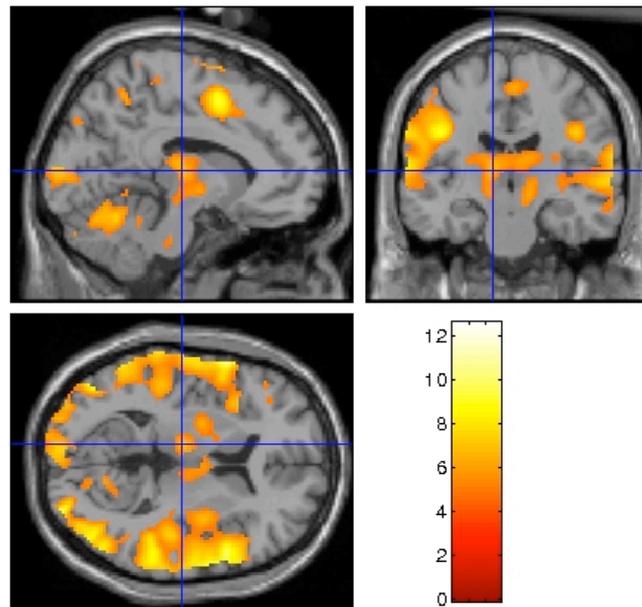
In der Abbildung IV.14 steht ebenfalls der Nucleus subthalamicus im Fadenkreuz (Talairach mm: 13,9 -13,6 -1,0). Offensichtlich hat dieses den Basalganglien assoziierte Kerngebiet des Diencephalons beim Prozess der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen bzw. bei einem der beiden Prozesse eine Bedeutung.



SPM99 (analyze): 10:57:28 - 16/03/2007

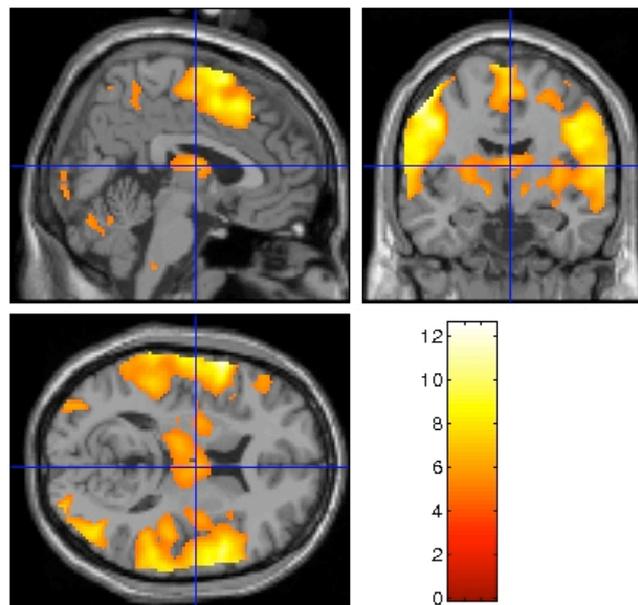
Abbildung IV.14: Fokussierte Darstellung der Initiierungs- und Produktionsaktivierungen in den Basalganglien rechts

Für den Thalamus ist das Ergebnis der zusammengenommenen Aktivierungen aus den Abbildungen IV.15 und IV.16 zu ersehen. In der Abbildung IV.15 werden Talairach-Koordinaten für den linken Thalamus spezifiziert (Talairach mm: -9,9 -17,1 8,2). In der Abbildung IV.16 werden die Koordinaten für den rechten Thalamus spezifiziert (Talairach mm: 4,9 -7,2 11,4).



SPM99 (analyze): 10:58:06 - 16/03/2007

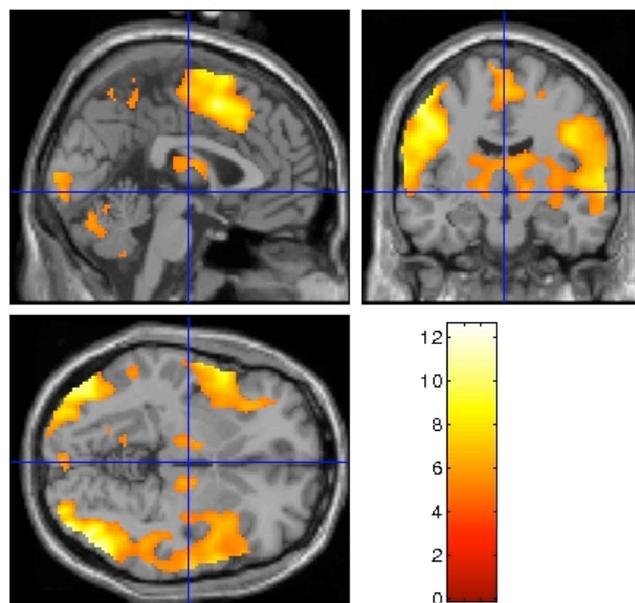
Abbildung IV.15: Fokussierte Darstellung der Initiierungs- und Produktionsaktivierungen im Thalamus links.



SPM99 (analyze): 10:57:56 - 16/03/2007

Abbildung IV.16: Fokussierte Darstellung der Initiierungs- und Produktionsaktivierungen im Thalamus rechts.

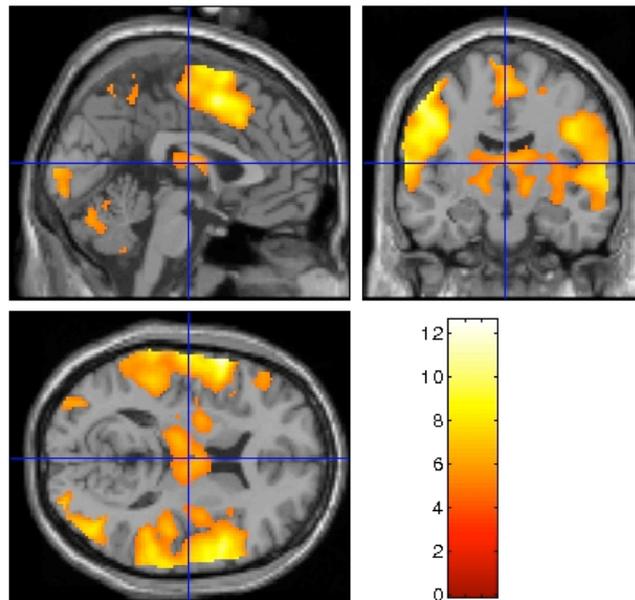
In den einzelnen Kontrasten sind die ermittelten Koordinaten für die örtliche Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus adjustiert worden, um dort eine Sphäre von 30 mm Durchmesser zu definieren. Die örtliche Betrachtung ist also in einem umschriebenen Areal mit einem Radius von 15 mm um den Koordinatenpunkt durch eine gegenseitige Kontrastierung der Bedingungen (vice versa) sowie durch eine Kontrastierung mit der Baseline vollzogen worden.¹⁸ Die Koordinaten werden für die Basalganglien (Talairach mm 0,0 -11,8 -2,8) sowie für den Thalamus (Talairach mm 0,0 -11,1 11,6) im Fadenkreuz in der Abbildung IV.17 (Basalganglien) sowie in der Abbildung IV.18 (Thalamus) spezifiziert.



SPM9 (analyze): 11/07/22 - 16/02/2007

Abbildung IV.17: Ausgangspunkt für die örtliche Betrachtung der Basalganglien (Radius 15 mm) im Fadenkreuz (Talairach mm: 0,0 -11,8 -2,8 = Ventriculus tertius).

¹⁸ Innerhalb der Sphäre erfolgte eine Bonferroni-Korrektur nach der „small-volume-correction-Methode“.

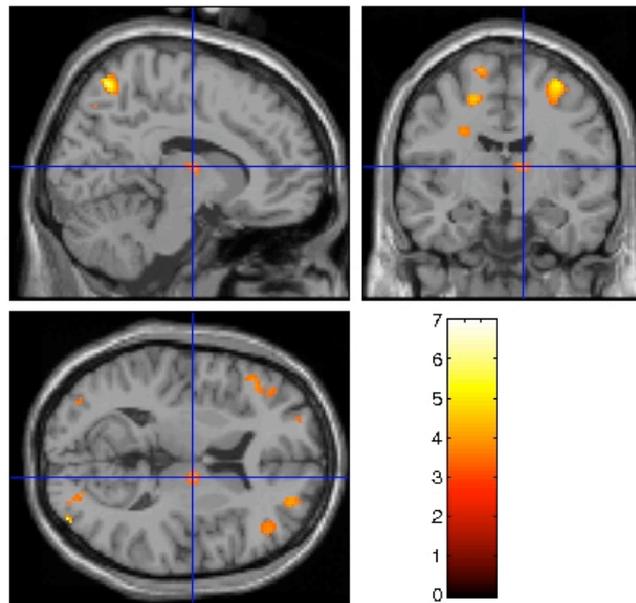


SPM99 (analyze): 110744 - 16/03/2007

Abbildung IV.18: Ausgangspunkt für die örtliche Betrachtung des Thalamus (Radius 15 mm) im Fadenkreuz (Talairach mm: 0,0 -11,1 11,6 = Nucleus medialis dorsalis).

3.1. Initiierung vs. Produktion bei örtlicher Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus

In den Basalganglien finden sich *keine* Aktivierungen. Diese finden sich aber im Thalamus. In der Abbildung IV.19 wird diese Aktivierung verdeutlicht.



SPM9 (analyze): 10:57:52 - 12/01/2007

Abbildung IV.19: Kontrast 3.1. Initiierung vs. Produktion. Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Thalamus (Nucleus ventralis lateralis rechts).

Die Koordinaten für diese Aktivierung sind aus der Tabelle IV.1 zu entnehmen.

<i>Örtliche Betrachtung des Thalamus</i>								
<i>Kontrast</i>	<i>MNI-template</i>			<i>Talairach mm</i>			<i>Signifikanz-niveau</i>	<i>Anatomische Bezeichnung</i>
	x	y	z	x	y	z		
3.1. Initiierung vs. Produktion	12	-10	10	11,9	-9,2	9,7	p < 0,05 korrigiert	Nucleus ventralis lateralis (VL)

Tabelle IV.1: Kontrast 3.1. Initiierung vs. Produktion bei der örtlichen Betrachtung des Thalamus (Koordinaten des MNI-template & Talairach mm, Signifikanzniveau sowie anatomische Bezeichnung)

3.2. Produktion vs. Initiierung bei örtlicher Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus

Weder im Bereich der Basalganglien noch im Bereich des Thalamus finden sich beim Kontrast „Produktion vs. Initiierung“ Aktivierungen.

Da am Thalamus die Kontrastierung der Initiierung gegenüber der Produktion eine Aktivierung zeigt, kann davon ausgegangen werden, dass diesem Areal

eine *wichtige* Rolle beim Initiierungsprozess zukommt. Diese Rolle wird den thalamischen Kernmassen im Zusammenhang mit Sprechbewegungen in der jüngsten Literatur nicht immer zuerkannt (vgl. z. B. Ackermann et al., 2005).

4.1. Initiierung vs. Baseline bei örtlicher Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus

Bei der Kontrastierung örtlicher Aktivierungen mit der Baseline lassen sich für die *Basalganglien* beidseitig Areale mit signifikanten Aktivierungskontrasten herausstellen. Die Koordinaten für zwei Areale sind aus der Tabelle IV.2 zu entnehmen.

<i>Örtliche Betrachtung der Basalganglien</i>								
<i>Kontraste</i>	<i>MNI-template</i>			<i>Talairach mm</i>			<i>Signifikanz-niveau</i>	<i>Anatomische Bezeichnungen</i>
	x	y	z	x	y	z		
4.1. Initiierung vs. Baseline	-10	-6	-4	-9,9	-6,0	-3,1	p < 0,01 korrigiert	Globus pallidus medialis
	14	-10	-2	13,9	-9,8	-1,2	p < 0,05 korrigiert	Nucleus subthalamicus

Tabelle IV.2: Kontrast 4.1. Initiierung vs. Baseline bei der örtlichen Betrachtung der Basalganglien (Koordinaten des MNI-template & Talairach mm, Signifikanzniveau sowie anatomische Bezeichnungen).

In der Tabelle werden sowohl der Globus pallidus medialis als auch der Nucleus subthalamicus als assoziiertes Kerngebiet mit enger funktionaler Verbindung zu den Basalganglien als Areal herausgestellt. Der Nucleus subthalamicus spielt offensichtlich für die Initiierung von Sprechbewegungen eine Rolle (vgl. Abbildung IV.13 oben).

Für den Thalamus lassen sich bei der örtlichen Betrachtung ebenfalls Areale mit signifikanten Aktivierungskontrasten konkretisieren. Die Koordinaten zweier Areale werden in der Tabelle IV.3 angeführt.

<i>Örtliche Betrachtung des Thalamus</i>								
<i>Kontraste</i>	<i>MNI-template</i>			<i>Talairach mm</i>			<i>Signifikanz niveau</i>	<i>Anatomische Bezeichnungen</i>
	x	y	z	x	y	z		
4.1. Initiierung vs. Baseline	-10	-22	12	-9,9	-20,8	12,1	p < 0,001 korrigiert	Thalamus
	12	-14	14	11,9	12,9	13,5	p < 0,001 korrigiert	Thalamus

Tabelle IV.3: Kontrast 4.1. Initiierung vs. Baseline bei der örtlichen Betrachtung des Thalamus (Koordinaten des MNI-template & Talairach mm, Signifikanzniveau sowie anatomische Bezeichnungen).

Die Relevanz des Thalamus bei der Initiierung wird durch diese Aktivierungen wieder unterstrichen.

4.2. Produktion vs. Baseline bei örtlicher Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus

Bei der örtlichen Betrachtung der Produktionsaktivierungen gegenüber der Baseline sind in den Basalganglien ebenfalls Areale zu kontrastieren. Zwei Areale werden in ihren Koordinaten in der Tabelle IV.4 bestimmt

<i>Örtliche Betrachtung der Basalganglien</i>								
<i>Kontraste</i>	<i>MNI-template</i>			<i>Talairach mm</i>			<i>Signifikanz niveau</i>	<i>Anatomische Bezeichnungen</i>
	x	y	z	x	y	z		
4.2. Produktion vs. Baseline	-10	-6	0	-9,9	-5,8	0,3	p < 0,05 korrigiert	Globus pallidus medialis
	12	-18	-6	11,9	-17,7	-4,2	p < 0,001 korrigiert	Substantia nigra

Tabelle IV.4: Kontrast 4.2. Produktion vs. Baseline bei der örtlichen Betrachtung der Basalganglien (Koordinaten des MNI-template & Talairach mm, Signifikanzniveau sowie anatomische Bezeichnungen).

Hier lässt sich ebenfalls der interne Anteil des Globus pallidus sowie die Substantia nigra als „Startpunkt für motorischen Handlungen“ herausstellen.

Schließlich sind wiederum am Thalamus zwei Areale mit signifikanten Aktivierungen vorhanden. In Tabelle IV.5 werden ihre Koordinaten angeführt.

Örtliche Betrachtung des Thalamus								
Kontraste	MNI-template			Talairach mm			Signifikanz niveau	Anatomische Bezeichnungen
	x	y	z	x	y	z		
4.2. Produktion vs. Baseline	-12	-16	4	-11,9	-15,3	4,5	p < 0,01 korrigiert	Thalamus
	7	-6	12	6,9	-5,3	1,3	p < 0,05 korrigiert	Thalamus

Tabelle IV.5: Kontrast 4.2. Produktion vs. Baseline bei der örtlichen Betrachtung des Thalamus (Koordinaten des MNI-template & Talairach mm, Signifikanzniveau sowie anatomische Bezeichnungen).

Der Thalamus hat somit auch eine wichtige Rolle bei der Produktion von Sprechbewegungen.

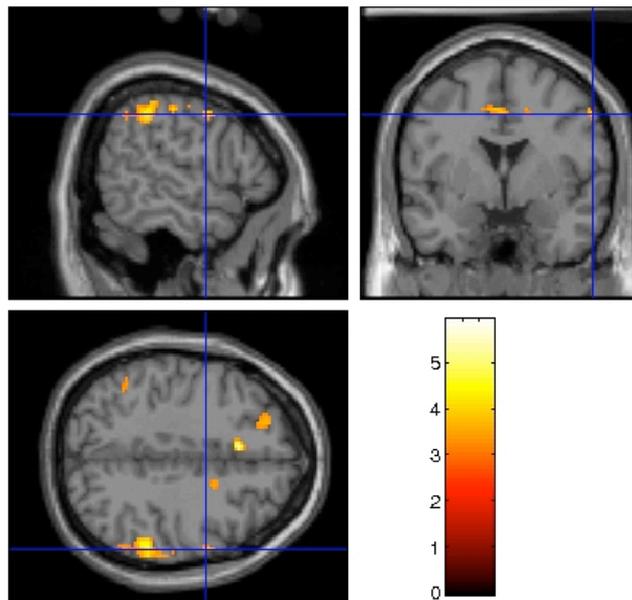
Schritt 5

Silbenspezifische Aktivierungsunterschiede bei der Initiierung und Produktion

Für den Prozess der *Initiierung* können *keine* silbenspezifischen Aktivierungsunterschiede herausgestellt werden.

Die Überprüfung silbenspezifischer Aktivierungsunterschiede bei der *Produktion* konzentriert sich zunächst auf die Frage, an welcher Stelle der Motorkortex bei den Produktionen aktiv ist. Dazu wurden alle Produktionen gegenüber allen Initiierungen kontrastiert. Innerhalb der dabei aktivierten Areale wurden beidseitig jeweils 2 Zentren für einen „small-volume-correction“ definiert. Bei diesen Zentren handelt es sich um Areale, in denen der Kontrast dargestellt wird. Die Zentren sind nach Korrektur auf dem Niveau $p < 0,05$ signifikant. Es sind dies die folgenden Zentren: A. Rechts: Zentrum 1 (Talairach mm: 57,4 1,9 38,6) und Zentrum 2 (Talairach mm: 63,4 0,8 16,5); B. Links: Zentrum 3 (Talairach mm: -51,5 -9,3 46,5) und Zentrum 4 (Talairach mm: -61,4 -4,7 22,3).

Für die Kontrastierung der /ta/-Silbenproduktionen gegenüber den /na/-Silbenproduktionen kann ein Kontrast im *Zentrum 1* dargestellt werden. In der Abbildung IV.20 wird dies verdeutlicht.



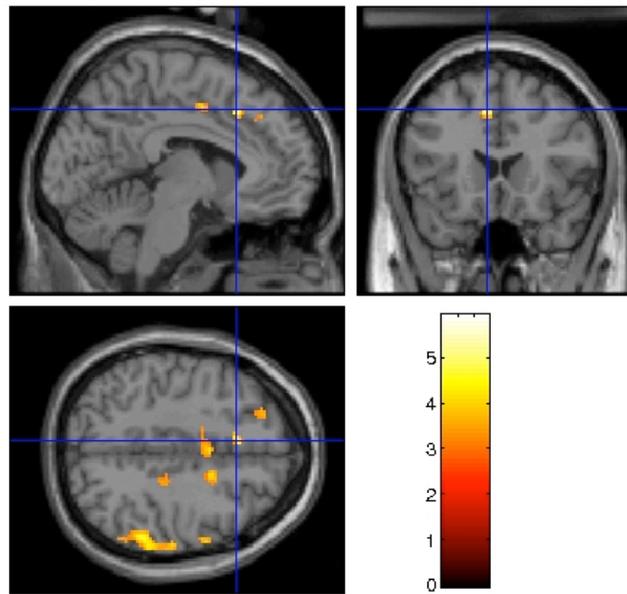
SPM99 (analyze): 09:52:43 - 12/01/2007

Abbildung IV.20: Produktionskontrast /ta/ vs. /na/ ($p < 0,05$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Gyrus präcentralis rechts.

Aus der Abbildung ist zu ersehen, dass die Aktivierung im superioren Motorkortex liegt.

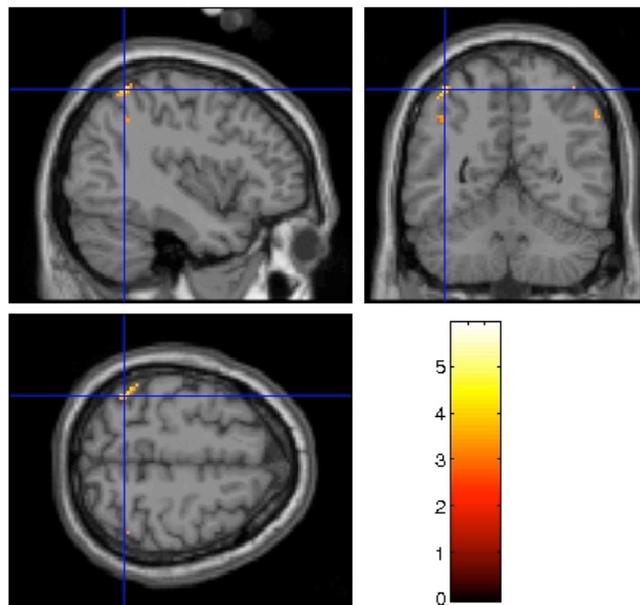
Für die übrigen Silbenproduktionen kann *kein* Kontrast in den angeführten Zentren des Motorkortex erarbeitet werden.

Neben dieser primärmotorischen Aktivierung findet sich eine weitere Aktivierung im anterioren cingulären Kortex (BA 24, Abbildung IV.21), im superioren (BA 7, Abbildung IV.22) und im inferioren (BA 40, Abbildung IV.23) Parietallappen.



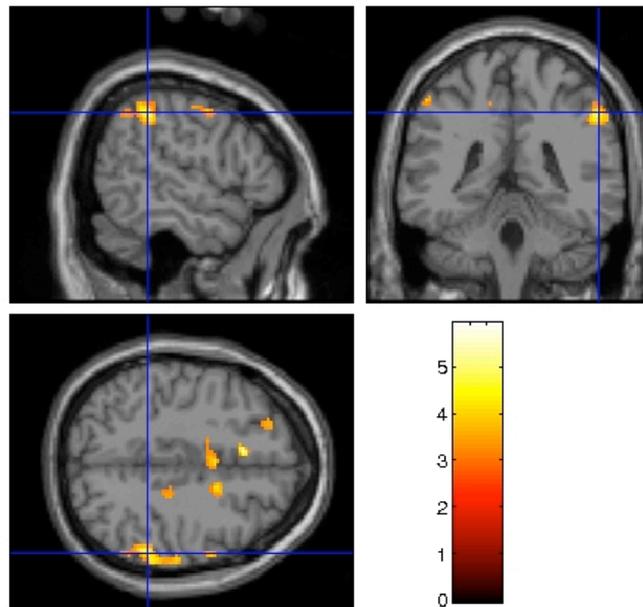
SPM99 (analyze): 09:53:37 - 12/01/2007

Abbildung IV.21: Produktionskontrast /ta/ vs. /na/ ($p < 0,05$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im anterioren cingulären Kortex links.



SPM99 (analyze): 09:53:36 - 12/01/2007

Abbildung IV.22: Produktionskontrast /ta/ vs. /na/ ($p < 0,05$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Lobus parietalis superior links.



SPM99 (analyse): 09:55:13 - 12/01/2007

Abbildung IV.23: Produktionskontrast /ta/ vs. /na/ ($p < 0,01$ korr.). Fokussierte Darstellung der Aktivierung im Lobus parietalis inferior rechts.

Offensichtlich kann durch die mögliche Kontrastierung eine sog. „komplexitätsbezogene“ Aktivierungsdifferenzierung bei diesen CV-Silben herausgestellt werden. Die verstärkte Aktivierung lässt auf die bei den /ta/-Silbenproduktionen im Vergleich zu den /na/-Silbenproduktionen notwendige *Larynxaktivität* schließen. Den neben dem Motorkortex objektivierten kortikalen Regionen kann eine mit der Aufmerksamkeit (anteriorer cingulärer Kortex)¹⁹ bzw. mit visuellen Funktionen zusammenhängende Aktivierung (superiorer und inferiorer Parietallappen) zugesprochen werden (vgl. z. B. Bösel, 2006).

In den im Fokus der Arbeit stehenden subkortikalen Zentren der Basalganglien und des Thalamus konnten diesbezüglich *keine* Aktivierungsunterschiede herausgestellt werden.

In der Tabelle IV.6 werden die bei der fokussierten Darstellung der Aktivierungen innerhalb der Schritte 1, 2 und 5 herausgestellten Hirnregionen mit ihren Koordinaten (MNI-template & Talairach mm) sowie ihren anatomischen Bezeichnungen (mit Brodmann-Arealen) zusammengefasst angeführt.

¹⁹ Als nichtmotorisches Gebiet wird auch der anteriore cinguläre Kortex (ACC) mit Funktionen des Sprechtriebs und der Initiierung von Sprechbewegungen in Verbindung gebracht (vgl. z. B. Ziegler, 2005).

<i>Kontraste</i>	<i>MNI-template</i>			<i>Talairach mm</i>			<i>B</i>	<i>Anatomische Bezeichnungen</i>
	x	y	z	x	y	z	<i>A</i>	
<i>Schritt 1</i> 1.1. Initiierung vs. Produktion	-38	30	16	-37,6	29,8	13,2	45	Gyrus frontalis inferior
	12	-10	10	11,9	-9,2	9,7		Thalamus (VL)
	-16	-6	12	-15,8	-5,3	11,3		Thalamus (VA)
	-40	-62	-30	-39,6	-61,3	-22,2		Cerebellum
1.2. Produktion vs. Initiierung	64	0	18	64,0	0,0	18,0	4	Gyrus präcentralis
	58	0	42	58,0	0,1	42,1	4	Gyrus präcentralis
	16	-64	-26	15,8	-63,1	-18,7		Cerebellum
<i>Schritt 2</i> 2.2. Produktion vs. Baseline	38	-4	8	37,6	-3,5	7,5		Insula
	-12	-20	-6	-11,9	-19,6	-4,1		Substantia nigra
<i>Schritt 5</i> Produktions- kontrast /ta/ vs. /na/	58	0	42	57,4	1,9	38,6	4	Gyrus präcentralis
	-6	20	44	-5,9	21,4	39,5	24	Gyrus cinguli anterior
	-40	-54	58	-39,6	-49,6	55,9	7a	Lobus parietalis superior
	56	-40	44	55,4	-36,7	42,4	40	Lobus parietalis inferior

Tabelle IV.6: Kontraste, Koordinaten (MNI-template & Talairach mm), Brodmann-Areale (BA) sowie anatomische Bezeichnungen der aktivierten Regionen.

5. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In der Diskussion zu den Ergebnissen des Experimentes werden der Übersichtlichkeit halber zunächst die kortikalen (5.1.), dann die subkortikalen (5.2.) Zentren im Vergleich der Initiierungs- mit der Produktionsaktivität sowie im Vergleich beider Prozesse mit der Baseline behandelt. Danach werden die bei der örtlichen Betrachtung der Basalganglien und des Thalamus vorhandenen Aktivierungen diskutiert. Dabei wird eine auf den Ergebnissen dieser Betrachtung basierende Modellvorstellung präsentiert, die die Beteiligung der beiden Kernmassen bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen beinhaltet (5.3.). Schließlich werden in einem weiteren Schritt die dem Experiment zugrundeliegenden Hypothesen anhand der Experimentergebnisse auf ihre Verifizierung bzw. Falsifizierung hin betrachtet (5.4.). In einem letzten Schritt werden dann aktuelle in der Literatur zu findende Ansätze zur cerebralen Organisation bei sprechmotorischen Vorgängen diskutiert sowie eine Modellvorstellung zu diesen Prozessen auf der Grundlage der vorliegenden Experimentergebnisse präsentiert (5.5.).

5.1. Aktivierungen in kortikalen Zentren

Zunächst ist die Tendenz zu erkennen, dass bereits während der *Initiierung* von Sprechbewegungen (Kontrast „Initiierung vs. Produktion“) neben rechtsseitigen Aktivierungen vor allem kortikale Aktivierungen in der *linken Hemisphäre* vorhanden sind (vgl. Abbildung IV.1 & IV.2). Sie sind dort in supplementär- bzw. in prämotorischen Arealen (BA 6 & BA 8), im Bereich des Sulcus intraparietalis (BA 7a, 7b, 39 & 40) sowie im Broca-Zentrum bzw. im frontalen Hauptsprachfeld (Broca-Region, BA 44 & 45) zu finden. Von diesen Aktivierungen wird im direkten Kontrast zwischen Initiierung und Produktion in fRMT-Studien mancherorts nicht berichtet (vgl. Frese, 2004).²⁰ Der Vergleich der *Initiierung* mit der *Baseline* lässt ebenso kortikale Areale erscheinen, von deren Aktivierung in der Literatur primär beim Artikulationsvorgang und nicht bei seiner Vorbereitung berichtet wird (vgl. z. B. Wildgruber et al., 1996, 1998a & 1998b; Riecker et al., 2000; Dogil et al., 2002; Riecker et al., 2005). Es sind dies neben dem Motorkortex (BA 4) die medialen und lateralen supplementärmotorischen Areale (BA 6) sowie der dorsolaterale frontale Kortex (BA 8 & BA 46).²¹

Neben den Aktivierungen in diesen kortikalen Regionen kann im Kontrast der *Initiierung* gegenüber der *Baseline* auch der *anteriore Inselkortex* herausgestellt werden (vgl. Abbildung IV.9). In der Literatur wird der Insel bei der Planung des Sprechvorgangs nicht immer eine Beteiligung zuerkannt. Dies berichten z. B. Dogil et al. (2002) zunächst in einer Studie. In ihr wird für die linke Insel während der Ausführung eine Aktivierung herausgestellt, die bei der artikulatorischen Planung nicht gefunden werden kann. In einer Folgestudie kommen Dogil et al. (2003) dann schließlich zu dem Ergebnis, dass die vorderen Teile der *linken* Insel eine entscheidende Rolle bei der Vorbereitung, Durchführung und Verifikation des Sprechvorgangs haben. Einige Jahre früher haben Wise et al. (1999) der linken anterioren Inselregion ebenfalls eine Rolle bei der artikulatorischen *Planung* zuerkannt. Frese (2004) kann hierfür in ih-

²⁰ Beispielsweise ist auch in der Studie von Frese bei dieser Kontrastierung von einer fehlenden Aktivierung die Rede. Die Autorin schließt daraus, dass die Hirnaktivierungen im Modus des sog. „inneren Sprechens“ im Vergleich zum „lauten Sprechen“ *geringer* sind (Frese, 2004: 161).

²¹ Diese rostral des primärmotorischen Kortex (BA 4) gelegenen nicht-primärmotorischen Areale finden in der Literatur in manchen Darstellungen ihre Differenzierung durch die Unterteilung in einen supplementärmotorischen Kortex (SMA, innerhalb BA 6; vgl. z. B. Bösel, 2006: 204) und einen prämotorischen Kortex (BA 8; vgl. z. B. Rohen, 2001: 104). In anderen Darstellungen werden diese Anteile des Frontallappens in einen prämotorischen Kortex (BA 6) sowie in präfrontale Regionen als ein ausgedehntes Gebiet multimodaler Assoziationsareale unterteilt (vgl. z. B. Bähr & Frotscher, 2003: 385). Neben diesen Arealen spielt für sprachliche Prozesse wie in neueren Studien berichtet wird auch der anteriore cinguläre Kortex (ACC, in BA 24, 25 & 32) eine Rolle (Ackermann et al., 1998; Dogil et al., 2002; Ziegler, 2005).

rem fMRT-Experiment keine Evidenz liefern. Bei Shuster & Lemieux (2005) steht die linke Insel ebenfalls im Fokus bei der Sprach*produktion*. In ihrer Untersuchung zeigt diese Region bei mehrsilbigen Wörtern im Gegensatz zu einsilbigen Wörtern keinen BOLD-Effekt. Riecker et al. (2000) sowie Ackermann et al. (2004) machen die *linke* anteriore Inselregion für die Koordination der Artikulations- und Phonationsmuskulatur bei der Produktion von Segmenten verantwortlich. Die rechte Region der Insel sei hingegen für die Intonationskonturen bei den verbalen Äußerungen sowie für die Kontrolle der Vokaltraktmuskulatur beim Singen zuständig.

Im Kontrast der „*Produktion vs. Initiierung*“ zeigen sich kortikal vor allem im *rechten* Motorkortex (BA 4) zwei Zentren, die eine grobe topographische Organisation des Gesichtskortex repräsentieren (vgl. Abbildung IV.6 & IV.7). Durch diese Aktivierungen kann die allgemein anerkannte Bedeutung des Motorkortex für die *Ausführung* von Sprechbewegungen wieder einmal dargelegt werden.

Im Kontrast der *Produktionsaktivität gegenüber der Baseline* erscheinen ebenfalls der Motorkortex (BA 4), der superiore Temporallappen (Wernicke-Region, BA 22) sowie der superiore Frontallappen (BA 8) aktiviert. Hierbei ist wiederum in der *rechten Hemisphäre* im Vergleich zur linken eine *intensivere* Aktivierung zu finden (vgl. Abbildung IV.10). Von einer Beteiligung des rechten Motorkortex bei der Produktion berichten auch Riecker et. al. (2000) in ihrer Untersuchung.

Zusätzlich zu diesen Arealen kann in der vorliegenden Arbeit im Kontrast „*Produktion vs. Baseline*“ in der *rechten* Inselregion eine Aktivierung gezeigt werden (vgl. Abbildung IV.11). Diese Aktivierung der rechten Insel passt in das Konzept der lateralitätsbezogenen Tendenzen bei beiden Prozessen (Initiierung eher links; Produktion eher rechts), was in der vorliegenden Studie herausgestellt werden kann. Die Aktivierung steht ebenfalls im Widerspruch zu den in der Literatur zu findenden Angaben. Wie oben bei der Literaturdiskussion zur *Initiierung* bereits erwähnt, sehen Dogil et al. (2003) die *linke* vordere Inselregion als sog. „zentralen Prozessor“ für den Sprechvorgang insgesamt an. Ebenfalls erkennen Riecker et al. (2000) und Ackermann et al. (2004) der *linken* anterioren Insel bei der Koordination der Sprechmuskulatur und bei der *Produktion* von Segmenten eine entscheidende Rolle zu.

Durch den Vergleich der kortikalen *Initiierungs-* mit der kortikalen *Produktionsaktivierung* wird zum einen deutlich, dass die *Initiierung* trotz vorhandener Überlappung mit auch bei der Produktion aktivierten Arealen *mehr* cerebrale

Aktivität verlangt (vgl. Abbildung IV.9 & IV.10). Dieses Ergebnis der Studie steht im Widerspruch zu Ergebnissen in der jüngsten Literatur (vgl. z. B. Palmer et al., 2001; Frese, 2004; Shuster & Lemieux, 2005). In ihnen wird von einem größeren BOLD-Effekt bei der *Produktion* berichtet.

Zum andern wird in der vorliegenden Arbeit offenkundig, dass bei der *Initiierung* mehr Aktivität in den kortikalen sprachrelevanten Zentren der *linken* Hemisphäre vorhanden ist.²² Bei der *Produktion* sind hingegen *rechts* mehr Aktivierungen in diesen Zentren zu beobachten (vgl. Abbildungen IV.6, IV.7 & IV.10). Dieses Ergebnis deckt sich ebenfalls *nicht* mit mancherorts in der Literatur berichteten Aktivierungstendenzen bei beiden Prozessen (vgl. z. B. Riecker et al., 2002).

Die lateralitätsbezogenen Tendenzen bei der Initiierung und Produktion bestehen für dieses Experiment also darin, dass die *Initiierung* als kognitiver Vorgang eher *linkslateralisiert* ist, während die *Produktion* der vorhandenen Motorprogramme eher eine *Rechtsorientiertheit* erkennen lässt. Dass sich wichtige für die Sprachverarbeitung relevante Areale (frontale und temporo-parietale Assoziationsareale) bei den meisten Menschen (ca. 95%) in der zur dominanten Hand (Rechtshänder) kontralateral gelegenen linken Hemisphäre befinden und dass – wie in der Literatur berichtet – die linke Hemisphäre bei Rechtshändern die dominierende Gehirnhälfte bei der Sprachverarbeitung darstellt (z. B. Mayer et al., 2002; Meyer et al., 2002; Bähr & Frotscher, 2003),²³ kann durch die Ergebnisse dieses Experimentes im Hinblick auf die Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen also *nicht* bestätigt werden. Bei den Experimententeilnehmern (alle Rechtshänder) zeigen sich bezüglich der *kortikalen* Intensität der Initiierungsaktivität im Vergleich zur Intensität der Ausführungsaktivität *Lateralitätstendenzen*.

5.2. Aktivierungen in subkortikalen Zentren

Subkortikal lassen sich in zwei Kernen des ventrolateralen Thalamus (Nucleus ventralis lateralis = VL rechts, Nucleus ventralis anterior = VA links) bei der Kontrastierung „*Initiierung vs. Produktion*“ verstärkte Aktivierungen nachweisen (vgl. Abbildung IV.3 & IV.4). Die Aktivierungen im Thalamus sind auch bei der Kontrastierung dieser Bedingung mit der Baseline vorhanden

²² Zu diesem Ergebnis kommen auch Wise et al. (1999) in ihrer Studie in Bezug auf das linke Basalgangliensystem. Der Broca-Region erkennen sie allerdings keine Rolle bei der Planung zu.

²³ Dies gilt mit Ausnahme von wichtigen Aspekten der Sprache wie z. B. emotionalen (affektiven) Anteilen bzw. mit Ausnahme von prosodischen Elementen wie z. B. der Intonationskontur. Sie werden nach gängiger Lehrmeinung in der rechten Hemisphäre gesteuert (vgl. z. B. Riecker et al., 2000; Ackermann et al., 2004). Diese Elemente spielen im vorliegenden Experiment keine Rolle.

(vgl. Abbildung IV.9). Durch diese vorhandenen Aktivierungen kann von einer *Beteiligung* des Thalamus bei der *Initiierung* von Sprechbewegungen ausgegangen werden. Von dieser Beteiligung wird in der jüngsten Literatur *nicht* immer berichtet (vgl. z. B. Riecker et al., 2005; Ackermann et al., 2005).

Die ventrolaterale Kerngruppe des Thalamus (hier der Nucleus ventralis intermedius = V.i.m.) ist Zielpunkt bei der Anwendung der tiefen Hirnstimulation (DBS = deep brain stimulation) bei Patienten mit multipler Sklerose, die an medikamentös nicht beherrschbarer Ataxie und nicht beherrschbarem Intentionstremor leiden (z. B. Moringlane 2000; Krauss & Volkmann, 2004). Wie in neuesten Untersuchungen nachgewiesen werden konnte (z. B. Pützer et al., 2003a; Pützer et al. 2003b; Moringlane et al., 2004b; Pützer, 2005; Pützer et al., 2006), kann es bei diesem Patientenkontext unter Anwendung der Tiefenhirnstimulation zu Störungen der glottal-supraglottalen Artikulation sowie zu Störungen des phonatorischen Ablaufs kommen. Auf Grund der unmittelbaren Nähe des VL und des VA zum V.i.m. – beide Nuclei liegen rostral des V.i.m. – kann angenommen werden, dass die Anwendung der DBS *nicht* die Phase der Ausführung von Sprechbewegungen, sondern vielmehr bereits deren *Initiierungsphase* beeinträchtigt.²⁴

Bei der Kontrastierung „*Initiierung vs. Baseline*“ können beidseitig relevante Strukturen im *Thalamus* und in den *Basalganglien* herausgestellt werden (vgl. Abbildung IV.9).

Bei der Kontrastierung „*Produktion vs. Initiierung*“ ist für diese Kernmassen *kein* Aktivierungsunterschied zu finden (vgl. Abbildungen IV.6 – IV.8). Dieser fehlt auch für den Kontrast „*Produktion vs. Baseline*“ innerhalb der durchgeführten Überblicksdarstellung zur Gesamtaktivierung (vgl. Abbildung IV. 10).

Bei einer *örtlichen* Betrachtung dieser beiden Regionen können jedoch Aktivierungsunterschiede im Kontrast „*Produktion vs. Baseline*“ verdeutlicht werden (vgl. Tabelle IV.5 & IV.7).²⁵

²⁴ Diese Information ist als komplementäre Information zur Diskussion um den Wirkungsmechanismus der DBS zu betrachten. Der Mechanismus ist bisher noch weitgehend *ungeklärt* (z. B. Nguyen & Degos, 1993; Whittle et al., 1998). Diskutiert werden in der neuesten Literatur die folgenden *möglicherweise* durch tiefe Hirnstimulation erreichten verschiedenen Mechanismen: (a) eine Blockade spannungsabhängiger Ionenkanäle an Nervenzellmembranen nahe der Elektrode (Depolarisationsblock). (b) eine Maskierung krankhaft veränderter Nervenzellaktivitäten durch unphysiologische Hochfrequenzsignale (Jamming). (c) eine Hemmung der synaptischen Übertragung im Projektionskern durch Erschöpfung des Neurotransmitterpools (synaptische Depression). (d) eine synaptisch vermittelte Hemmung der Neurone im stimulierten Kerngebiet durch Erregung hemmender Afferenzen und Freisetzung von GABA (GABAerge Hemmung) (vgl. z. B. Volkmann & Kupsch, 2004; Breit et al., 2004; Benabid et al., 2005).

²⁵ Durch dieses Ergebnis wird Evidenz für die methodische Vorgehensweise der örtlichen Betrachtung in der Studie gegeben. Diese Betrachtung beinhaltet die Erarbeitung von Aktivierungsunterschieden innerhalb der Basalganglien und des Thalamus (vgl. Sektion 4, *Schritte 3 und 4*). Auf dem Ergebnis

Die Relevanz dieser subkortikalen Zentren für die Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen wird in der jüngsten Literatur unterschiedlich eingeschätzt. Für manche Autoren sind die Basalganglien bzw. einzelne Kerngebiete innerhalb ihrer Struktur sowohl an der Planung als auch an der Ausführung von Sprechbewegungen mit unterschiedlicher Intensität und Schwerpunktsetzung beteiligt (vgl. z. B. Kent et al., 2000; Monchi et al., 2006; Watson & Montgomery, 2006; Riecker, 2006). Andere Autoren sprechen ihnen eine Beteiligung bei der Kontrolle von diesen Bewegungen zu (z. B. Wildgruber et al., 2001). Schließlich werden den Basalganglien im Sinne einer differenzierten Betrachtung ihrer einzelnen Hauptkerngebiete funktional sowohl eine motorische (Putamen) als auch eine kognitive Rolle (Nucleus caudatus) zuerkannt (z. B. Gil Rolbes et al., 2005).

Neben thalamischen Strukturen kann im Kontrast „*Initiierung vs. Produktion*“ eine Aktivierung im *linken superioren Cerebellum* (Pars lateralis = Cerebrocerebellum) nachgewiesen werden. (vgl. Abbildung IV.5). Diese Aktivierung ist beidseitig auch im Kontrast mit der Baseline vorhanden (vgl. Abbildung IV.9). Sie mag im Stadium der Initiierung die in der Literatur postulierte cerebelläre Rückkopplungsaktivität verdeutlichen. Diese Rückkopplungsaktivität kommt zum Tragen, bevor das endgültige Programm dem Motorkortex zur Ausführung bereitgestellt wird (vgl. auch Kap. II, Sektion 3.3.).²⁶

Subkortikale Aktivierungen im Kontrast „*Produktion vs. Initiierung*“ sind zunächst im beidseitigen Cerebellum (Spinocerebellum) zu finden (vgl. Abbildung IV.8). Diese Aktivierungen entsprechen der dem Spinocerebellum (Pars

dieser örtlichen Betrachtung basiert primär die weitere Diskussion um die Rolle der beiden Kerngebiete bei den behandelten Aspekten der Sprachverarbeitung (vgl. auch Fußnote 13 oben).

²⁶ Das Cerebrocerebellum als Abschnitt für zielmotorische Aktivitäten erhält den Großteil seiner Effenzen von ausgedehnten Gebieten der Großhirnrinde (v. a. motorischer und prämotorischer Kortex) indirekt über die Brückenkerne bzw. einen geringeren Anteil indirekt über die Oliven (vgl. z. B. Bähr & Frotscher, 2003). Des Weiteren ist anzunehmen, dass aus den Trigeminskernen des Hirnstamms (primär: Nucleus sensorius principalis n. trigemini) für die sprechmotorischen Bewegungen afferente Informationen übermittelt werden (vgl. z. B. Nieuwenhuys et al., 1980; Schmidt & Wiesendanger, 1987; Gracco & Abbs, 1987; Huber, 1989). Somit erhält es wie die anderen Kleinhirnabschnitte von allen in der Großhirnrinde *geplanten* Willkürbewegungen im *Voraus* Meldung. Es erfolgt daraufhin ein kontinuierliches Abgleichen zwischen dem sprechmotorischen Modell des Kortex und dem des Cerebrocerebellums. Diese Kontrollinformationen werden dann (über die durch den *Thalamus* verlaufende Bahn) zurück zu den prämotorischen und motorischen Regionen geführt. Dadurch kann das Cerebrocerebellum sofort auf alle motorischen Bewegungsimpulse modifizierend und korrigierend einwirken, *bevor* sie im supplementär- bzw. prämotorischen Kortex (BA 6 & BA 8) im Bewegungsprogramm integriert und dann an die motorischen Regionen der Sprechorgane (primär im BA 4) zur Aktivierung der Sprechmuskulatur weitergegeben werden (z. B. Lindblom, 1968 & 1983; Perkell, 1969 & 1980; McNeilage 1970; McNeilage & Ladefoged, 1976; Ghez, 1991). Die Modifikation bzw. die Korrektur verläuft über den Nucleus dentatus zu der ventrolateralen Kerngruppe des Thalamus und von dort aus über den Tractus thalamocorticalis (= dentato-thalamo-kortikale Bahn) zum motorischen bzw. supplementär- und prämotorischen Kortex (BA 4, BA 6 & BA 8).

intermedialis) zugesprochenen Regulation während der Ausführung von Bewegungen (Bähr & Frotscher, 2003).²⁷ Von den Aktivierungen wird in der Literatur ebenfalls berichtet (z. B. Wildgruber et al., 1998a; Indefrey & Levelt, 2000).

Bei der behandelten Kontrastierung „*Produktion vs. Baseline*“ innerhalb der Gesamtbetrachtung lässt sich *keine* Beteiligung der Basalganglienstrukturen und des Thalamus aus bereits erwähnten Gründen nachweisen (vgl. Fußnote 13 oben). Die *örtliche* Betrachtung dieser Regionen liefert hingegen Evidenz für ihre Beteiligung an dem Produktionsprozess (vgl. Tabelle IV.7 unten). Dieses Ergebnis deckt sich somit mit Ergebnissen in der neuesten Literatur (vgl. z. B. Riecker et al. 2005). In der Studie von Riecker et al. wird die Beteiligung der Basalganglien und des Thalamus innerhalb der sog. „executive loop“ bei Sprechbewegungen angeführt. In der vorliegenden Studie kann zudem im Sinne der Beteiligung der Basalganglien an der Produktion in der *Substantia nigra* beidseitig ein Aktivierungskontrast gegenüber der Baseline herausgestellt werden (vgl. Abbildung IV.12). Dieser Kontrast wird bei der *örtlichen* Betrachtung der Aktivierungen an den Basalganglien bestätigt (vgl. Tabelle IV.4). Die *Substantia nigra* gilt als assoziiertes Kerngebiet zu den Basalganglien (Bähr & Frotscher, 2003). Sie ist mit ihren Projektionen ins Striatum als „*Startpunkt* für motorische Handlungen“ anzusehen.²⁸

Der Vergleich der gesamten Aktivierungen unter unterschiedlich vollzogener Kontrastierung (vice versa sowie jeweils gegenüber der Baseline) lässt zunächst insgesamt erkennen, dass beim *Initiierungsprozess* die kortikalen sowie die subkortikalen Areale der *Basalganglien* und des *Thalamus* in *stärkerem* Maße rekrutiert werden als bei der Produktion. Diese verzweigten Aktivierungen bei der Initiierung deuten auf eine Vernetzung verschiedener Hirnregionen hin. Durch sie wird die für die Vorbereitung bzw. die für die Erstellung des Programms von Sprechbewegungen vorhandene Komplexität zum Ausdruck gebracht.

²⁷ Das Spinocerebellum kontrolliert den Muskeltonus und gewährleistet ein reibungsloses Zusammenspiel antagonistischer Muskelgruppen.

²⁸ Bei idiopathischem Parkinsonismus kommt es zu einer Degeneration der nigro-striatalen Projektionen. Der Untergang dieser dopaminergen Neuronen hat eine verstärkte GABAerge Aktivität striataler Neuronen zur Folge. Dadurch wird die indirekte Basalganglienschleife überaktiv. Zusätzliche Veränderungen betreffen den Nucleus subthalamicus. Er zeigt ebenfalls eine vermehrte Aktivität, wodurch sich die Hemmung glutamaterger Neuronen im Thalamus verstärkt. Insgesamt kommt es dadurch zu einer Hemmung am Ausgang der Basalganglienschleife. Dies führt zur Minderinnervation kortikaler Areale und somit zu einer Verlangsamung motorischer Abläufe. Durch eine Degeneration der dopaminergen Neurone der *Substantia nigra* wird der Neurotransmitter nicht mehr ins Striatum projiziert.

Der *Produktionsprozess* zeigt hingegen neben subkortikalen Zentren die erwarteten primären Aktivierungskontraste im Motorkortex sowie in den Arealen des superioren Frontallappens.

5.3. Fokussierte Betrachtung der örtlichen Aktivierungen in den Basalganglien und im Thalamus²⁹

In der Abbildung IV.24 wird zum einen das auf den Ergebnissen des Experiments basierende Aktivierungsverhalten in den *Basalganglien* bei der Initiierung und Produktion von Sprechbewegungen verdeutlicht. Zum andern wird die Möglichkeit der Kontrastierung der Initiierungs- gegenüber den Produktionsvorgängen sowie die Möglichkeit ihrer jeweiligen Kontrastierung zur Baseline für die Basalganglien aufgezeigt.

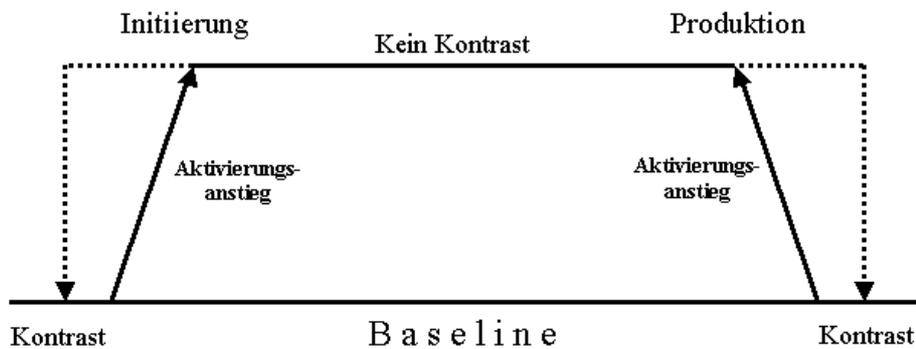


Abbildung IV.24: Basalganglienspezifische Aktivierungen und Kontrastierungsmöglichkeiten bei der Initiierung und Produktion von Sprechbewegungen sowie deren Kontrastierungsmöglichkeiten gegenüber der Baseline.

In der Abbildungen IV.25 wird thalamusspezifisches Aktivierungsverhalten bei der Initiierung und Produktion von Sprechbewegungen präsentiert. Des Weiteren wird wiederum wie in der Darstellung zu den Basalganglien die Möglichkeit der Kontrastierung der Initiierungs- gegenüber den Produktionsvorgängen sowie die Möglichkeit ihrer jeweiligen Kontrastierung zur Baseline für den Thalamus verdeutlicht.

²⁹ Die Argumentation in dieser Sektion erfolgt auf den Ergebnissen der örtlichen Betrachtung beider Kerngebiete (vgl. Fußnote 13 oben). Die Ergebnisse der Überblicksdarstellung zur Gesamtaktivierung für diese Bereiche werden dabei ebenfalls in der Diskussion berücksichtigt.

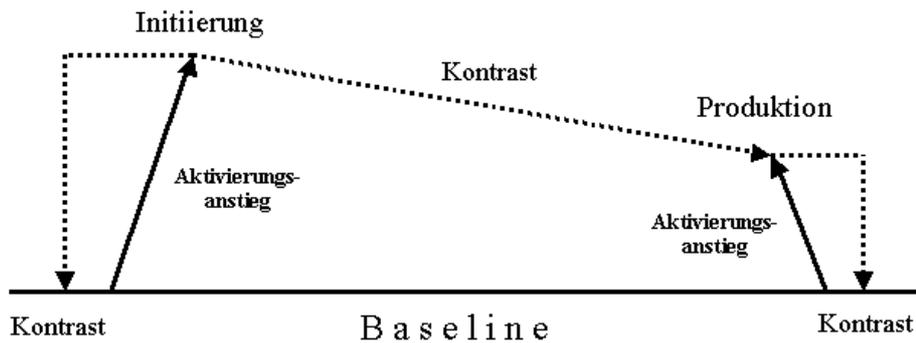


Abbildung IV.25: Thalamusspezifische Aktivierungen und Kontrastierungsmöglichkeiten bei der Initiierung und Produktion von Sprechbewegungen sowie deren Kontrastierungsmöglichkeiten gegenüber der Baseline.

Auf der Grundlage dieser Aktivierungen und ihrer Kontrastierungsmöglichkeiten wird im Folgenden eine Modellvorstellung zur Rolle der Basalganglien und zur Rolle des Thalamus bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen diskutiert:

Für die *Basalganglien* (vgl. Abbildung IV.24) ist ersichtlich, dass sich die Initiierungsaktivierungen von den Aktivierungen bei der Produktion *nicht* abheben lassen. Ebenso ist es *nicht* möglich, die Produktionsaktivierungen von den Initiierungsaktivierungen abzuheben (vgl. Sektion 4, *Schritte 3 und 4* oben).

Bei einem Vergleich der beiden Bedingungen mit der *Baseline* ist für die *Basalganglien* hingegen sowohl bei der Initiierung als auch bei der Ausführung von Sprechbewegungen ein Aktivierungskontrast vorhanden (vgl. Abbildung IV.24, Tabelle IV.2 & IV.4).

Der Aktivierungskontrast hat sich für die *Initiierung* gegenüber der *Baseline* innerhalb der Gesamtbetrachtung sowie innerhalb der örtlichen Betrachtung herausgestellt (vgl. Sektion 4, *Schritt 2* und *Schritte 3 und 4* oben). Er zeigt sich für diesen Prozess bei der *örtlichen* Betrachtung in aktivierten Zentren am Globus pallidus medialis sowie an dem in enger funktionaler Verbindung zu ihm stehenden *Nucleus subthalamicus*. Der Nucleus subthalamicus ist Zielpunkt bei der Anwendung der tiefen Hirnstimulation (DBS) für Patienten mit M. Parkinson, die sich wegen Extremitätentremor, Rigor, On-off-Fluktuationen oder L-Dopa-induzierten Hyperkinesien dieser Behandlungsmethode unterziehen. Bei diesen Patienten kann es ebenso wie bei Patienten mit multipler Sclerose unter Anwendung dieser Methode zu Störungen der Phonation sowie zu Störungen des glottal-supraglottalen Artikulationsablaufs kommen (vgl. z. B. Moringlane et al., 2004b; Pützer et al., 2003 a, 2003b & 2007).

Auf Grund der nachgewiesenen Relevanz des Nucleus subthalamicus bei der Initiierung von Sprechbewegungen wird somit ebenfalls Evidenz dafür geliefert, dass bei seiner Stimulation nicht die Phase der Ausführung, sondern bereits die Phase der Initiierung von Sprechbewegungen beeinträchtigt wird.³⁰

Für den Prozess der *Produktion* ist hingegen *nur* bei der örtlichen Betrachtung im Globus pallidus medialis sowie in der Substantia nigra die Möglichkeit einer Kontrastierung vorhanden (vgl. Tabelle IV.4 & IV.7 unten). Die Kontraste verweisen auf die Relevanz des Pallidums bei der Ausführung von Sprechbewegungen sowie auf die bereits erwähnte Rolle der Substantia nigra als ebenfalls funktional mit den Basalganglien eng zusammenhängendes Kerngebiet.³¹ Somit wird innerhalb dieser örtlichen Betrachtung ebenso wie innerhalb der Betrachtung zu den Gesamtaktivierungen die Rolle der Substantia nigra als „Startpunkt für die Motorik“ herausgestellt. Das dargelegte Ergebnis für die Basalganglien unterstreicht die Relevanz dieser Kernmassen für die Initiierung *und* für die Produktion und steht somit im Gegensatz zu in der Literatur mancherorts vorhandenen Modellvorstellungen (vgl. z. B. Riecker et al. 2005).

Im *Thalamus* ist sowohl bei der Gesamtbetrachtung als auch bei der örtlichen Betrachtung für die *Initiierung* ein Aktivierungskontrast gegenüber der Baseline in mehreren Zentren nachweisbar (vgl. Abbildung IV.9 & Tabelle IV.3).

Zusätzlich bzw. gegensätzlich zu den Basalganglien ist bei der örtlichen Betrachtung auch eine Kontrastierung der Initiierung gegenüber der Produktion am ventrolateralen Teil des Thalamus (Nucleus ventralis lateralis) *möglich* (vgl. Abbildung IV. 25, IV. 19 & Tabelle IV.1). Es kann dadurch zusätzliche Evidenz geliefert werden, dass der Thalamus eine Rolle beim Prozess der Initiierung innehat. Allerdings gelingt auch hier wie bei den Basalganglien die Kontrastierung der Produktionsaktivierungen gegenüber den Initiierungsaktivierungen *nicht* (vgl. Abbildung IV.25 & Tabelle IV.7 unten).

Auf Grund dieses Ergebnisses ist anzunehmen, dass dem Thalamus eine *bedeutendere* Rolle bei der *Initiierung* von Sprechbewegungen zukommt als den Basalganglien. Die Aktivierungen bei beiden Prozessen (Initiierung und Produktion) lassen sich im Thalamus wiederum von den Baselineaktivierungen abgrenzen (vgl. Abbildung IV.25, Tabelle IV.3 & IV.5).

Für die subkortikalen Areale der Basalganglien und des Thalamus kann im direkten Vergleich ihres Aktivierungsverhaltens bei beiden Prozessen eine Mo-

³⁰ Die Annahme einer Störung der Initiierungsphase bei Anwendung der DBS wird also durch dieses Ergebnis weiter untermauert. Die Stimulationspunkte sind bei den beiden Patientengruppen jeweils bei der Initiierung relevant.

³¹ Der Globus pallidus grenzt kaudal an den rostralen Anteil der Substantia nigra an.

dellvorstellung bezüglich ihrer Rolle bei der Sprachproduktion formuliert werden. In dieser Modellvorstellung werden sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede für beide Areale berücksichtigt.

Als *Gemeinsamkeit* beinhaltet die Modellvorstellung zunächst für *beide* Kernmassen, dass diese in *größerem* Umfang an der *Initiierung* als an der Ausführung von sprechmotorischen Bewegungen beteiligt sind (vgl. Tabelle IV.7 unten). Darüber hinaus können für beide Kerngruppen im Vergleich mit der Baseline sowohl für die Initiierung als auch für die Produktion höchst signifikante Aktivierungsunterschiede nachgewiesen werden. Dies unterstreicht wiederum ihre Bedeutung für beide Prozesse.

Ein *Unterschied* besteht bei einem direkten Vergleich der Basalganglienaktivitäten mit den Thalamusaktivitäten in der größeren Relevanz thalamischer Strukturen für die *Initiierung* von sprechmotorischen Bewegungen. Diese größere Relevanz wird durch die zusätzliche Möglichkeit einer signifikanten Abgrenzung der Initiierungsaktivität von der Produktionsaktivität verdeutlicht (vgl. Abbildung IV. 19 & IV. 25).

In der Tabelle IV. 7 wird zur Veranschaulichung der Zusammenhänge eine Überblicksdarstellung zu den erreichten Aktivierungskontrasten für die Basalganglien und den Thalamus bei der Gesamtbetrachtung sowie bei der örtlichen Betrachtung gegeben. Aus der Tabelle ist somit auf der Grundlage der Kontrastmöglichkeiten ersichtlich, dass zum einen beim Prozess der Initiierung im Vergleich mit dem Prozess der Produktion sowohl der Thalamus als auch die Basalganglien eine größere Rolle spielen. Zum andern ist (sowohl innerhalb der Gesamtbetrachtung als auch innerhalb der örtlichen Betrachtung) weiter aus der Tabelle zu ersehen, dass der *Thalamus* im Vergleich mit den Basalganglien eine für sich größere Relevanz beim Initiierungsprozess beanspruchen kann.

I. Aktivierungskontraste für die Basalganglien und den Thalamus bei der Gesamtbetrachtung	
Initiierung	Produktion
Initiierung > Produktion Thalamus	Produktion > Initiierung ∅
Initiierung > Baseline Basalganglien & Thalamus	Produktion > Baseline ∅
II. Aktivierungskontraste für die Basalganglien und den Thalamus bei der örtlichen Betrachtung	
Initiierung	Produktion
Initiierung > Produktion Thalamus	Produktion > Initiierung ∅
Initiierung > Baseline Basalganglien & Thalamus	Produktion > Baseline Basalganglien & Thalamus

Tabelle IV.7: Überblickdarstellung zu den Aktivierungskontrasten für die Basalganglien und den Thalamus bei der Gesamtbetrachtung (I.) sowie bei der örtlichen Betrachtung (II.). Kontraste: Initiierung vs. Produktion (auch vice versa) sowie Initiierung vs. Baseline & Produktion vs. Baseline (∅ = weder Aktivierungen in den Basalganglien noch im Thalamus).

Wie oben gezeigt werden kann, können im klinischen Bezug innerhalb der Diskussion um die Auswirkungen der tiefen Hirnstimulation (DBS) auf die Sprechmotorik die geschilderten Ergebnisse zur Rolle der beiden Kerngebiete bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen die Vermutung aufkommen lassen, dass es bei der Anwendung der DBS sowohl bei den Patienten mit multipler Sklerose (vgl. Sektion 5.2. oben) als auch bei den Patienten mit M. Parkinson zu einer *Störung der Initiierungsphase* und nicht zu einer Störung der Ausführungsphase von Sprechbewegungen kommt. Instrumentalphonetisch ausgerichteten Untersuchungen mit beiden Patientengruppen haben gezeigt, dass sich die Tiefenhirnstimulation bei Patienten mit gleichen sowie mit verschiedenen Grunderkrankungen unterschiedlich auf die Sprechmotorik auswirkt (z. B. Pützer et al., 2003a & 2003b; Pützer et al. 2006 & 2007). Die Diskussion um eine Optimierung bzw. Beseitigung der sprachproduktionsbezogenen Nebenwirkungen bei der Anwendung der DBS mag durch diese Vermutung belebt werden. In diesem Zusammenhang wäre vielleicht zu überprüfen, ob beispielsweise für die Patienten mit multipler Sklerose durch eine

Berücksichtigung anderer Stimulationspunkte am ventrolateralen Teil des Thalamus eine Reduktion dieser in Form von laryngalen und supralaryngalen Artikulationsstörungen auftretenden unerwünschten Nebenwirkungen erreicht werden kann.³²

5.4. Hypothesenüberprüfung

In dieser Sektion erfolgt die Behandlung der *vier* Hypothesen im Hinblick auf ihre Verifizierung oder Falsifizierung. Die Diskussion bezieht einige in der Literatur zu den Hypothesen vorhandene Sichtweisen mit ein.

5.4.1. Initiierungshypothesen (Hypothese 1 und 2)

Die Initiierungshypothesen betreffen die gesamten sowie die auf die Basalganglien und den Thalamus bezogenen Aktivierungsunterschiede bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen. Es wird zunächst hypothetisiert, dass bei der *Initiierung* im Kortex und subkortikal insgesamt *mehr* Aktivierungen vorhanden sind als bei der *Ausführung* von diesen Bewegungen (Hypothese 1). Zudem wird unter Fokussierung auf die subkortikalen Strukturen der Basalganglien und des Thalamus insgesamt von einer *stärkeren* Rekrutierung dieser Gebiete bei der Initiierung als bei der Produktion ausgegangen (Hypothese 2).

Wie gezeigt werden kann, beinhalten die Ergebnisse des Experiments eine *Verifizierung* der *ersten* Hypothese. Es besteht im Vergleich der Aktivierungsintensität bei beiden Prozessen eine *generelle* kortikale und subkortikale *Mehraktivierung* bei der Initiierung.

Darüber hinaus kann für die subkortikalen Strukturen (Basalganglien und Thalamus) sowohl innerhalb der Gesamtbetrachtung zu allen Hirnaktivierungen als auch bei der örtlichen Betrachtung ebenfalls eine größere, durch *verstärkte* Aktivierungen sich zeigende Relevanz beim Prozess der Initiierung herausgestellt werden. In dieser Hinsicht erfährt die *zweite* Hypothese somit auch ihre Verifizierung. Zusätzlich kann während des Prozesses der Initiierung dem *Thalamus* eine im Vergleich mit den Basalganglien zentralere Funktion zuerkannt werden (vgl. Sektion 5.3. Tabelle IV.7 oben). Diese zentralere Funktion wird sowohl innerhalb der Gesamtbetrachtungen der Aktivierungskontraste als

³² Wenn diese Option hier auch formuliert wird, so ist dennoch *durchaus* damit zu rechnen, dass bei Anwendung der DBS die gesamten ventrolateralen Kerne des Thalamus in ihrer physiologischen Funktion im Zusammenhang mit der Erstellung des Motorprogramms für die Sprechmotorik beeinträchtigt sind. Sollte dies so sein, dann wird wahrscheinlich auch ein anderer Zielpunkt keine Verbesserung der Symptomatik bringen.

auch bei der örtlichen Betrachtung der Kontraste deutlich. Die angeführten Ergebnisse stehen wie oben bereits erwähnt im Widerspruch zu in der jüngsten Literatur berichteten Ergebnissen, die in einer verstärkten Aktivierung während des *Produktions*prozesses bestehen (vgl. z. B. Wildgruber et al., 1998; Indefrey & Levelt; 2000; Palmer et al., 2001; Dogil et al., 2002 & 2003; Frese, 2004; Shuster & Lemieux, 2005). Dennoch kann offensichtlich diskutiert werden, dass der Prozess der sog. Planung bzw. Vorbereitung oder Programmierung von Sprechbewegungen ein größeres Ausmaß und eine größere Intensität an cerebraler Aktivierung für die „Zusammenstellung“ von motorischen Abfolgen verlangt als der für die Ausführung verantwortliche Prozess des Ablaufs von Artikulationsbewegungen. Weiter wird durch die Ergebnisse des Experiments Evidenz dafür geliefert, dass der *Thalamus* als größte subkortikale Sammelstelle für alle exterozeptiven und propriozeptiven Impulse der Außen- und Innenwelt sowie als Integrations- und Koordinationszentrum für Hin- und Rückprojektionen mit dem Kortex auch eine funktionale Komponente bei der Sprachverarbeitung bildet. Die für die motorische *Ausführung* von Sprechbewegungen allgemein anerkannte „integrative Funktion“ (der Basalganglien und) des Thalamus innerhalb der sog. direkten und indirekten Basalganglienschleife (vgl. z. B. Ziegler, 2005) ist durch die Ergebnisse des Experimentes auch auf den Prozess der *Initiierung* solcher Bewegungen zu beziehen. Es kann also angenommen werden, dass subkortikale Strukturen wie die Basalganglien und v. a. der Thalamus bei der Planung bzw. Vorbereitung oder Programmierung von Sprechbewegungen als „*Pendant*“ zu den kortikalen Regionen des supplementär- bzw. prämotorischen Kortex sowie zu weiteren kortikalen Regionen fungieren. Diese Interpretation lässt vermuten, dass auch während des Prozesses der Initiierung von Sprechbewegungen die Basalganglien und der Thalamus in übergeordnete Schaltkreise eingebunden sind.

5.4.2. Komplexitätshypothese (Hypothese 3)

Komplexitätsbezogene Aktivierungsunterschiede bei Sprechbewegungen sind in der jüngeren Literatur unter Verwendung verschiedener Vorgehensweisen erarbeitet worden. Den verschiedenen Ansätzen und Schwerpunktsetzungen entsprechend sind unterschiedliche Ergebnisse vorhanden. Während beispielsweise Riecker et al. (2006) von einer *Minderung* der Hämodynamik in den Basalganglien als Reaktion auf den Anstieg der motorischen Anforderungen berichten, ist bei Bohland & Günther (2006) sowie bei Soros et al. (2006) von ei-

ner *Erweiterung* der neuronalen Aktivität bei größeren sprechmotorischen Anforderungen die Rede.

In der vorliegenden Studie wird die Hypothese aufgestellt, dass sich sowohl während der Initiierung als auch während der Produktion der CV-Silben eine größere Komplexität bei den artikulatorischen Abfolgen in einer neuronalen *Mehraktivierung* zeigt. Um dies herauszustellen, werden die bei den jeweiligen Silbenproduktionen vorhandenen Hirnaktivierungen bezüglich ihres Ausmaßes durch gegenseitige Subtraktion voneinander abgegrenzt. Die die Subtraktion auf Grund verstärkter Aktivierungen „überstehenden“ Silbenproduktionen werden schließlich bezüglich der Komplexität ihrer artikulatorischen Anforderungen mit den bei der Subtraktion „unterlegenen“ Silbenproduktionen verglichen.

Die Hypothese erfährt auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse *nur* für die Produktionskontrastierung der /ta/- vs. /na/-Silben ihre Verifizierung (vgl. Abbildung IV.20). Für die übrigen Silbenproduktionen kann *kein* Kontrast erarbeitet werden. Ebenfalls können für den Prozess der Initiierung *keine* silbenspezifischen Aktivierungsunterschiede herausgestellt werden. Der produktionsbezogene Kontrast kann *nur* im Motorkortex in einem Zentrum nach „small-volume-correction“ dargestellt werden. In den subkortikalen Zentren der Basalganglien und des Thalamus ist ebenfalls *kein* Kontrast möglich (vgl. Sektion 4, *Schritt 5* oben).

Die bei der Kontrastierung der /ta/- gegenüber den /na/-Silbenproduktionen vorhandenen Aktivierungsdifferenzen können auf dem Hintergrund des Verweises auf Unterschiede im glottal-supraglottalen Artikulationsablauf bei beiden CV-Silben erklärt werden. Während bei der /ta/-Silbenproduktion Alternationen im laryngalen Artikulationssystem mit Alternationen im supralaryngalen Artikulationssystem koordiniert werden müssen,³³ entfällt die Abduktionsgeste sowie die Adduktionsgeste bei den /na/-Silbenproduktionen am *Larynx*. Die Stimmlippen schwingen bei der Produktion der beiden Sonoranten und bleiben somit adduziert. Offensichtlich verweist der herausgestellte Kontrast auf die notwendige *Larynxaktivität* bei der Produktion der /ta/-Silben im Vergleich zur Produktion der /na/-Silben. Dass durch die verstärkte Aktivierung *nicht* die Velumalternation als ebenfalls vorhandener produktionsbezogener Unterschied zwischen beiden Silbenfolgen verdeutlicht wird, kann durch die

³³ Am Larynx sind es die Abduktionsgeste der Stimmlippen für die Plosivproduktion und Adduktionsgeste der Stimmlippen für die Vokalproduktion. Im Oralraum sind es die Verschlussbildung und die Verschlusslösung für die Plosivproduktion sowie die Zungenpositionierung für die nachfolgende Vokalproduktion.

nicht mögliche Kontrastierung der /na/-Silbenproduktionen gegenüber den /ta/-Silbenproduktionen plausibel gemacht werden.³⁴ Diese Alternation kann bei der durchgeführten Kontrastierung der Aktivierungen für die /na/-Silbenproduktionen gegenüber den /da/-Silbenproduktionen (auch vice versa) im Motorkortex ebenfalls *nicht* herausgestellt werden. Bei diesen beiden CV-Silbenfolgen stellt die Velumalternation die *einzig* kontrastive Alternation im supraglottalen Artikulationssystem dar. Die artikulatorischen Anforderungen bei der Velumalternation können im Vergleich mit den geschilderten Anforderungen am Larynx offensichtlich als *geringer* betrachtet werden und sind somit nicht mehr zu kontrastieren. Diese Schlussfolgerung gibt *Evidenz* für die Annahme *komplexitätsbezogener Aktivierungsunterschiede* bei Sprechbewegungen.

Die herausgestellten Aktivierungsunterschiede sind erstaunlicherweise im oberen superioren Bereich des Motorkortex zu finden und nicht im unteren Bereich, wo der *Larynx* topographisch im Homunculus angesiedelt ist. Dieses Ergebnis geht mit der in der Literatur zu findenden Vorstellung konform, dass innerhalb der grob strukturierten topographischen Repräsentationen von Gesicht, Arm, Bein etc. die Beziehungen zwischen einzelnen Muskelgruppen und ihnen zugeordneten Zellpopulationen der motorischen Rinde nicht immer eindeutig sind (vgl. z. B. Ziegler, 2005). Eine Nichtbestätigung der klassischen somatotopon Gliederung auf dem Motorkortex ist auch bei Olthoff et al. (2005) zu finden. Die Autoren können eine Aufteilung des Motorkortex mit weit unten liegendem Larynx ebenfalls nicht bestätigen. Das Ergebnis des vorliegenden Experimentes unterstützt somit die Ergebnisse in der zitierten Literatur. Offensichtlich sind an unterschiedlichen Stellen auf der Oberfläche des motorischen Gesichtskortex unterschiedliche und sehr komplexe Aktivitäten der Zunge, der Lippen und des Kiefers auslösbar.

Folglich erfährt der Rückgriff auf artikulatorisch differenzierte CV-Silben mit komplexitätsbezogen unterschiedlicher Beanspruchung des laryngalen und supralaryngalen Artikulationssystems im vorliegenden Experiment seine Berechtigung. Unter ihrer Verwendung können komplexere Vorgänge bei der Silbenproduktion anhand einer topographisch zu begründenden Mehraktivierung im Kortex nachgewiesen werden.

³⁴ Statistisch wird bei der sog. „vice-versa-Kontrastierung“ (z. B. /ta/-Silbenproduktionsaktivitäten vs. /na/-Silbenproduktionsaktivitäten und /na/-Silbenproduktionsaktivitäten vs. /ta/-Silbenproduktionsaktivitäten) die Darstellung von Potentialdifferenzen verfolgt. Somit konnte hier das den /na/-Silbenproduktionen eigene Potential in Form der notwendigen Velumalternationen *nicht* gegenüber dem Potential bei den /ta/-Silbenproduktionen in Form von Ab- und Adduktionsgesten am Larynx kontrastiert werden.

5.4.3. Lateralitätshypothese (Hypothese 4)

Die *vierte* Hypothese betrifft die Diskussion um Lateralitätsschwerpunkte bei sprachlichen Prozessen in Bezug auf die Initiierung und Ausführung der Silbenproduktionen. Lateralitätsbezogene Argumentationen bei der Sprachverarbeitung im Zusammenhang mit cerebralen Aktivierungen finden sich in fMRT- oder PET-basierenden neueren und zeitlich länger zurückliegenden Studien (z. B. Wise et al., 1999; Riecker et al., 2000; Dogil et al., 2002 & 2003; Crosson et al., 2003; Ackermann et al., 2004). In der vorliegenden Studie wird die Hypothese aufgestellt, dass bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen kortikal und subkortikal gegensätzliche lateralitätsbezogene Aktivierungstendenzen für beide Prozesse herausgestellt werden können.

Für die *kortikalen* Aktivierungen kann eine Verifizierung der Hypothese bezüglich erkennbarer Lateralitätstendenzen festgehalten werden. Dabei zeigt sich, dass bei der Initiierung in der *linken* Hemisphäre eine Tendenz der Mehraktivierung vorhanden ist. (vgl. Abbildung IV.1 & IV.2). Die Produktionsaktivierungen zeigen hingegen die Tendenz der *Rechtsorientiertheit* (vgl. Abbildungen IV.6, IV.7 & IV.10).

Die Betrachtung der *subkortikalen* Aktivierungen lassen sowohl bei der Gesamtbetrachtung als auch bei der örtlichen Betrachtung diese Tendenzen *nicht* erkennen. Hier finden sich in unterschiedlichem Ausmaß *bilaterale* Aktivierungen bei *beiden* Prozessen.³⁵ Auf Grund dieses Ergebnisses kann vermutet werden, dass sich bei den behandelten Aspekten der Sprachverarbeitung Lateralitätstendenzen v. a. in den kortikalen Regionen zeigen und die subkortikalen Regionen unspezifisch in die übergeordneten Schaltkreise eingebunden sind (vgl. Abbildung IV.26 unten). Die bezüglich der Lateralität aufgestellte Hypothese erfährt somit eine Teilverifizierung.

5.5. Cerebrale Organisation bei sprechmotorischen Vorgängen

In der vorliegenden Studie kann gezeigt werden, dass aktuell für die cerebrale Organisation sprechmotorischer Vorgänge weder in Bezug auf die kortikalen noch in Bezug auf die subkortikalen Zentren einheitliche Ergebnisse in der Literatur zu finden sind. Bereits existierende Modellvorstellungen werden durch die Ergebnisse nachfolgender Studien nur teilweise bestätigt bzw. ganz revidiert. Die Begründung für diese Unterschiedlichkeiten in den Studienergebnis-

³⁵ Wise et al. (1999) berichten in ihrer Untersuchung im Gegensatz zu den hier vorgestellten Ergebnissen von einer Priorität des *linken* Basalgangliensystems bei der Sprachproduktion, obwohl alle in Sprache involvierten Muskeln ihre motorischen Befehle von beiden cerebralen Hemisphären bekommen.

sen mag vielleicht in den unterschiedlichen Experimentdesigns liegen. Dabei ist die Präsentation der Stimuli möglicherweise als ein wichtiger Faktor für eventuell unterschiedliche Ergebnisse zu betrachten. Somit kann auch angenommen werden, dass in einem Experiment mit auditiv initiierten Stimulusproduktionen mit einer Beeinflussung des Produktionsvorgangs durch die bei der Perzeption relevanten neuronalen Verarbeitungsprozesse zu rechnen ist.³⁶ In neueren Studien wird der mögliche Einfluss solcher perzeptiver (aber auch visueller) Sprachverarbeitungsprozesse auf die Sprachproduktion nicht immer als ein möglicher Beeinflussungsfaktor diskutiert. Dieser vermuteten Problematik ist in dem vorliegenden Experiment durch eine visuelle Stimuluspräsentation begegnet worden, bei der für die Aufforderung zur Initiierung und Produktion der CV-Silben keine Symbole mit beispielsweise sprachlicher Anbindung durch einen Bezug zu Graphemen verwandt wurden (vgl. Sektion 1.2. oben).

Die vorliegenden Experimentergebnisse weisen ebenfalls Unterschiede zu bereits in der jüngsten Literatur vorhandenen Modellvorstellungen zur cerebralen Organisation beim Sprechvorgang auf. Die Unterschiede konzentrieren sich auf differierende Angaben über die Beteiligung bzw. Nichtbeteiligung kortikaler (Motorkortex, Inselkortex) sowie subkortikaler (Basalganglien, Thalamus) Regionen bei der Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen.

In zwei neueren Studien präsentieren Riecker et al. (2005) bzw. Ackermann et al. (2005) ihre Vorstellungen zu neuronalen Netzwerken bei diesen beiden Prozessen. Sie sprechen bei der Initiierung von einer sog. „preparative loop“ und bei der Ausführung von Sprechbewegungen von einer sog. „executive loop“. Die Zuordnung einzelner kortikaler sowie subkortikaler Strukturen zu diesen beiden sprechmotorischen „Schleifen“ kann durch die Ergebnisse des vorliegenden Experimentes *nicht in vollem Umfang* bestätigt werden. Bei der Initiierung („preparative loop“) verweisen beide Studien auf supplementärmotorische Areale (BA 6), auf den dorsolateralen frontalen Kortex (BA 8 & BA 46), die anteriore Insel sowie auf das superiore Cerebellum. Die Basalganglienstrukturen (Globus pallidus, Putamen, Nucleus caudatus) und v. a. den Thalamus erwähnen sie dabei *nicht*. Diese subkortikalen Kerngruppen werden bei ihnen innerhalb der sog. „executive loop“ als aktiviert angeführt.

³⁶ Eine zu diskutierende Beeinflussung könnte über den Fasciculus arcuatus vollzogen werden. Es wird angenommen, dass er für die Verbindung zwischen den temporalen und frontalen Sprachgebieten (Wernicke-Region, BA 22 & Broca-Region, BA 44) verantwortlich ist. Bei seiner Läsion entsteht eine sog. Leitungsaplasie. Die Wernicke-Region dient in erster Linie der Analyse von wahrgenommenen und als Wörter klassifizierten Tönen, während die Broca-Region bei der Entstehung des motorischen Plans in Erscheinung tritt.

Die Basalganglien und v. a. der Thalamus haben sich hingegen in der vorliegenden Studie als für die *Initiierung* von Sprechbewegungen *relevante* subkortikale Regionen herausgestellt (vgl. Sektion 5.4.1. oben).³⁷ Die Relevanz des Thalamus für die Initiierung kann sowohl bei der Gesamtbetrachtung zu den Aktivierungskontrasten als auch bei der örtlichen Betrachtung im Kontrast zur Produktion sowie zur Baseline durchgehend verdeutlicht werden (vgl. Tabelle IV.7 oben). Durch die örtliche Betrachtung dieser beiden Regionen innerhalb des Experimentes nach „small-volume-correction“ ist mehr Klarheit bezüglich ihrer Funktion bei beiden Prozessen geschaffen worden. Die präsentierten Ergebnisse zu dieser Fragestellung stehen somit auf der Grundlage der angewandten methodischen Vorgehensweise weiter zur Diskussion.

Für die *Ausführung* von Sprechbewegungen werden in den beiden Studien neben dem Motorkortex und dem inferioren Cerebellum der Thalamus und die Hauptkerngebiete der Basalganglien (Putamen, Pallidum und der Nucleus caudatus) erwähnt. Diese Strukturen können in der vorliegenden Arbeit für die Ausführung ebenfalls bestätigt werden. Zusätzlich zu den kortikalen Regionen in den beiden Studien können hier aber auch der superiore Temporallappen (Wernicke-Region, BA 22) sowie der superiore Frontallappen (Prämotorisches Areal, BA 8) als aktiviert angeführt werden (vgl. Abbildung IV.10 & IV.26 unten).

Der *Inselkortex* wird wie oben bereits berichtet in der aktuellen Literatur der letzten Jahre ebenfalls unterschiedlich in Zusammenhang mit dem Initiierungs- und Produktionsprozess gebracht. Wise et al. (1999) erkennen der *linken* anterioren Inselregion die artikulatorische Planung zu. Bei Dogil et al. (2003) spielen die vorderen Teile der *linken* Insula eine entscheidende Rolle bei der Vorbereitung, Durchführung und Verifikation des Sprechvorgangs. Sie ist für die Autoren der „zentrale Prozessor“ für den Sprechvorgang. Bei Riecker et al. (2000) sowie bei Ackermann et al. (2004) wird die *linke* anteriore Inselregion ebenfalls als relevant für die *Produktion* von Segmenten charakterisiert. In einer weiteren Studie von Riecker et al. (2005) sowie von Ackermann et al. (2005) wird die anteriore Insel ebenfalls *nicht* bei der Ausführung, sondern bei der *Vorbereitung* von Sprechbewegungen als aktiviert dargestellt.

³⁷ In der neueren Studie von Elsinger et al. (2006) wird von einer Beteiligung der Basalganglien bei der Planung von *Fingerbewegungen* berichtet. Wie die Hand belegt auch das Gesicht auf Grund zu erfüllender feinmotorischer Aufgaben auf dem Homunculus innerhalb der somatotopischen Repräsentationen einzelner Körperteile eine *ausgedehntere* Fläche als andere Körperteile. Die in der vorliegenden Studie nachgewiesene Beteiligung der Basalganglien an der Initiierung von Sprechbewegungsprozessen liefert somit weitere Evidenz für die Relevanz dieser Kernmassen bei der Planung und Programmierung feinmotorischer Programme.

Im vorliegenden Experiment kann hingegen die Beteiligung der Insel bei der Produktion bestätigt werden. Allerdings spielt hier gegensätzlich zu dem Ergebnis von Dogil et al. (2003) nicht die linke, sondern die *rechte* Insel eine Rolle. Die linke Insel ist entsprechend der für dieses Experiment herausgestellte *rechtshemisphärischen Priorität bei der Produktion* nicht zu kontrastieren (vgl. Sektion 5.4.3. oben).

Ebenfalls im Unterschied zu den Ergebnissen des vorliegenden Experiments werden z. B. bei Ziegler (2005) die cerebralen Aktivitäten für beide Prozesse eingeschätzt. Der Autor macht neben primärmotorischen Arealen, cinguläre und supplementärmotorische sowie prämotorische Rindengebiete für die Initiierung und Programmierung von Sprechbewegungen verantwortlich. Die in der vorliegenden Studie herausgestellte Beteiligung der Basalganglien und des Thalamus wird hingegen bei ihm nicht erwähnt. Diese Strukturen werden nur bei der Ausführung von Sprechbewegungen als relevant charakterisiert.

In der Abbildung IV.26 wird das auf den Ergebnissen der vorliegenden Studie basierende Modell zur cerebralen Organisation bei sprechmotorischen Vorgängen dargelegt. Aus der Abbildung ist zu ersehen, dass für die *kortikalen* Regionen eine *Lateralitätstendenz* vorhanden ist.³⁸ Das bedeutet, dass für die *Initiierung* eher die *linke* Hemisphäre zuständig ist, während sich für die *Produktion* eher die *rechte* Hemisphäre als relevant herausgestellt hat. Bei der Darstellung dieser Tendenzen wird zudem deutlich, dass bei der Initiierung generell mehr kortikale Aktivierung vorhanden ist (vgl. Sektion 5.4.1 oben). Für die *subkortikalen* Regionen (Basalganglien, Thalamus, Cerebellum) kann diese Tendenz der Lateralität *nicht* festgehalten werden. Die hier spezifizierten cerebralen Gebiete sind sowohl bei der Initiierung als auch bei der Produktion von Wichtigkeit.

Darüber hinaus wird aus der Abbildung ersichtlich, dass in diesem Modell die subkortikalen Regionen der Basalganglien und des Thalamus sowie das Cerebellum in die *beiden* übergeordneten kortikalen Schaltkreise bei der Initiierung und bei der Produktion eingebunden sind.³⁹

³⁸ Die Lateralität kann anhand einer Mehraktivierung in den jeweiligen Zentren der beiden Hemisphären bei der Initiierung und Produktion nachgewiesen werden (vgl. Sektion 5.4.3. oben).

³⁹ Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Kent et al. (2000) in ihrer Studie. Die Autoren postulieren ebenfalls eine Beteiligung der Basalganglien und des Cerebellums zur Entwicklung und Aufrechterhaltung von Modellen, die zur Bewegungsvorbereitung und zur Ausführung flüssiger Sprache zuständig sind.

Gil Robles et al. (2005) liefern für die Beteiligung der Basalganglien ebenfalls Evidenz in einer Studie. Unter Anwendung der intraoperativen Elektrostimulation postulieren sie für diese Kerngruppen zwei Systeme. Das erste System habe eine motorische Rolle und liege im Putamen. Das zweite System sei mit kognitiven Aufgaben betraut und liege im Nucleus caudatus.

Modell zur cerebralen Organisation bei sprechmotorischen Vorgängen

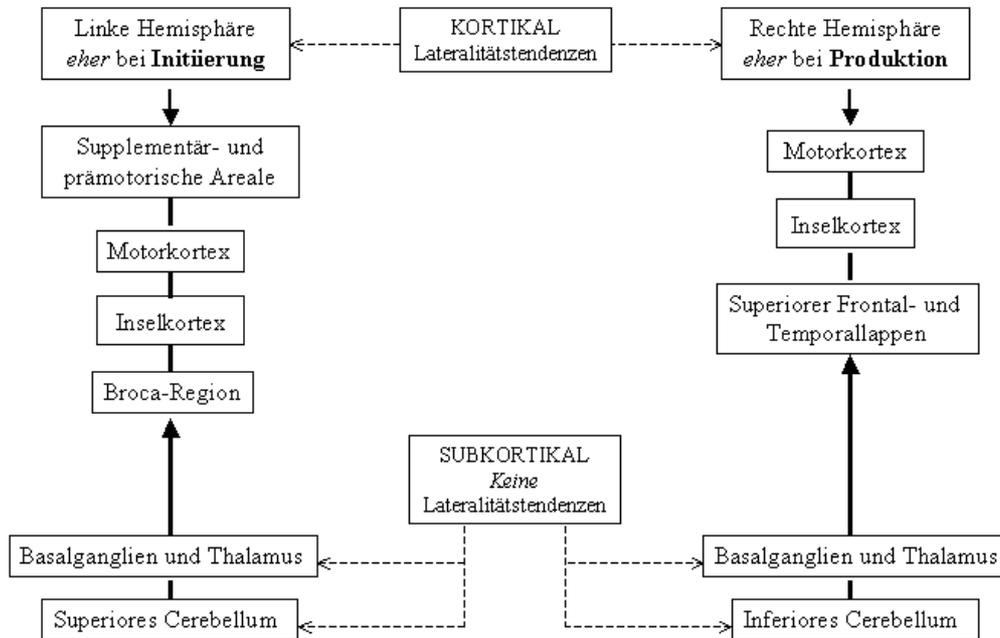


Abbildung IV.26: Modell zur cerebralen Organisation bei sprechmotorischen Vorgängen auf der Grundlage der Experimentergebnisse.

Für die beiden Prozesse (Initiierung und Produktion) können somit *zwei kortikal hemisphärenbetonte Schaltkreise* mit unterschiedlichen *Prioritäten* (Initiierung eher links, Produktion eher rechts) postuliert werden, die aber *subkortikal unspezifisch* ihre *Vernetzungen* in den *beidseitigen* Basalganglien und für die Initiierung vor allem im Thalamus haben (vgl. Sektion 5.4.1. oben). Darüber hinaus bekommen in diesem Modell beide Schaltkreise beidseitige subkortikale „Unterstützung“ für die Vorbereitung und Ausführung der motorischen Bewegungen durch *unterschiedliche Regionen* des Cerebellums (vgl. auch Kap. II, Sektion 3.3. & Sektion 5.2. oben).⁴⁰

Offensichtlich kann in der vorliegenden Studie die Existenz der beiden von Riecker et al. (2005) sowie von Ackermann et al. (2005) postulierten Netzwerke mit Evidenz für zwei Ebenen der Motorkontrolle von Sprechbewegungen sowie die bei Ziegler (2005) vorhandene Differenzierung kortikaler bzw. sub-

⁴⁰ Während das superiore Cerebellum (Pars lateralis = Cerebrocerebellum) innerhalb der Initiierungsphase für die Rückkopplungsaktivitäten verantwortlich ist, bevor das endgültige Motorprogramm dem Motorkortex bereitgestellt wird, obliegt dem inferioren Cerebellum (Pars intermediales = Spinocerebellum) die Regulation des Muskeltonus während der Ausführungsphase von Bewegungen (z. B. Bähr & Frotscher, 2003).

kortikaler Strukturen für die Initiierung und Ausführung von Sprechbewegungen nicht in vollem Umfang bestätigt werden. Das hier alternativ vorgestellte Modell zur cerebralen Organisation von Sprechbewegungen versteht sich als „integratives Modell“ in Bezug auf die Relevanz der subkortikalen Strukturen der Basalganglien und des Thalamus für die Vorbereitung und Ausführung von Sprechbewegungen.

Kapitel V. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Kapitel werden zunächst die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammenfassend dargestellt (1.). Daraufhin werden die aus den Ergebnissen herzuleitenden Erkenntnisse diskutiert (2.). Schließlich werden zum Ende des Kapitels Schlussfolgerungen aus den Erkenntnissen und ein Ausblick präsentiert (3.).

1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Behandlung der Thematik der vorliegenden Arbeit geht mit einer Orientierung an *verschiedenen* methodisch orientierten Fragestellungen zur neuronalen Architektur des Initiierungs- und Produktionsprozesses von Sprechbewegungen einher. Als *Gemeinsamkeit* haben alle Fragestellungen den Vergleich des Prozesses der *Initiierung* (Planung) mit dem Prozess der *Ausführung* (Produktion) von Sprechbewegungen. Die Fragestellungen sind von *vier* Hypothesen abgeleitet worden.

Die *ersten beiden* Fragestellungen betreffen die in kortikalen und subkortikalen Gehirnregionen vorhandenen Aktivierungen bei der Initiierung und Produktion. Innerhalb der ersten Fragestellung wird nach Unterschieden bei beiden Prozessen gesucht. Um die relevanten Gehirnareale für diese beiden Prozesse herauszustellen, werden die Initiierungs- und Produktionsaktivitäten gegenseitig (*vice versa*) kontrastiert. Da bei der Kontrastierung nicht ausgeschlossen werden kann, dass in den Arealen, die bei der Subtraktion „unterliegen“ keine Aktivierung vorhanden ist, wird in der zweiten Fragestellung das Aktivierungsausmaß bei beiden Prozessen im Vergleich zur Baseline (Ruhezustand) herausgestellt. Die hinter diesen Fragestellungen sich befindende *erste* Hypothese lautet: Die Initiierung von Sprechbewegungen verlangt generell (kortikal und subkortikal) *mehr* Aktivierungen als die Ausführung.

Die Ergebnisse dieser „zweigleisigen“ Kontrastierungen beinhalten tatsächlich in der Gesamttendenz eine *Mehraktivierung* bei der Initiierung in den kortikalen und subkortikalen Arealen. In dieser Hinsicht erfährt die erste Hypothese zum Experiment eine Verifizierung (vgl. Hypothese 1, Kap. IV, Sektion 5.4.1.). Die Aktivierungen während des *Initiierungsprozesses* deuten auf eine Vernetzung verschiedener kortikaler und subkortikaler Hirnareale hin. Dadurch wird die Komplexität dieses Vorgangs verdeutlicht. Der *Produktionsprozess* zeigt hingegen neben subkortikalen Zentren primär die erwarteten Aktivierungskontraste im Motorkortex.

Die *beiden nächsten* Fragestellungen betreffen wiederum die Unterschiede in bzw. das generelle Ausmaß der Aktivierung bei der Initiierung und der Produktion, diesmal auf die Basalganglien und des Thalamus fokussiert. Den Fragestellungen wird durch eine Kontrastierung der CV-Silbenaktivierungen bei der Initiierung gegenüber der Produktion (und vice versa) sowie durch eine Kontrastierung beider Prozesse gegenüber der Baseline nachgekommen.

Die diese Fragestellungen betreffende Hypothese beinhaltet die Aussage, dass in den Arealen der Basalganglien und des Thalamus bei der *Initiierung* signifikant stärkere Aktivierungen vorhanden sind als bei der Produktion.

Sowohl innerhalb der Gesamtbetrachtung zu allen Hirnaktivierungen als auch bei der örtlichen Betrachtung kann für diese beiden Kernmassen eine größere, durch verstärkte Aktivierungen sich zeigende Relevanz beim Prozess der *Initiierung* festgehalten werden. Innerhalb dieser Relevanz für die Initiierung ist dem *Thalamus* wiederum eine wichtigere Rolle zuzurechnen als den Basalganglien. Die dazu formulierte Hypothese kann verifiziert werden (vgl. Hypothese 2, Kap. IV, Sektion 5.4.1 oben).

Die *fünfte* Fragestellung zielt auf den Zusammenhang zwischen unterschiedlicher artikulatorischer Komplexität bei den einzelnen CV-Silben und cerebraler Aktivierungsintensität bei ihrer Initiierung und Produktion ab. Die dazu formulierte *dritte* Hypothese beinhaltet die Aussage, dass eine Beziehung zwischen der *Komplexität* bei artikulatorischen Abfolgen und *neuronaler Aktivierungsintensität* während der Initiierung und Produktion der Silben besteht.

Um eine Antwort auf diese Fragestellung zu bekommen, sind die Aktivierungen der einzelnen CV-Silben zueinander in Kontrast gesetzt worden. Die Ergebnisse zeigen, dass nur unter Berücksichtigung der Aktivierungen während der Produktion eine Kontrastierung der /ta/- gegenüber den /na/-Silben gelingt (stimmloser Nicht-Nasal vs. stimmhafter Nasal). Dieser Kontrast kann mit Bezug auf die artikulatorische Komplexität bei den beiden CV-Silben interpretiert werden. Für die übrigen Silbenproduktionen kann unter Rückgriff auf die Produktionsaktivierungen kein Kontrast erarbeitet werden. Es gelingt ebenfalls nicht, für den Prozess der Initiierung einen silbenspezifischen Aktivierungsunterschied herauszustellen. Eine Kontrastierung bei den Produktionsaktivierungen für die beiden Silben kann nur im Motorkortex in einem Zentrum nach „small-volume-correction“ erreicht werden. In den subkortikalen Zentren der Basalganglien und des Thalamus ist ebenfalls keine Kontrastierung möglich. Somit erfährt die zu dieser Fragestellung gestellte Hypothese eine Teilverifizierung (vgl. Hypothese 3, Kap. IV, Sektion 5.4.2 oben).

Diese fünf Fragestellungen sind zunächst aus den bereits erwähnten *drei* Hypothesen abgeleitet worden. Ihre Verifizierung bzw. Falsifizierung wird im Ergebnisteil zum Experiment ausführlich diskutiert (vgl. Kap. IV, Sektion 5.4.1. und 5.4.2.).

Mit den Fragestellungen ist zudem eine weitere *vierte* Hypothese verbunden. Sie betrifft die Diskussion um erkennbare kortikale und/oder subkortikale *Lateralitätstendenzen* in den Aktivierungen bei der Initiierung von Silbenproduktionen sowie bei deren Ausführung. Es wird hypothetisiert, dass von lateralitätsbezogenem Aktivierungsverhalten bei beiden Prozessen in den kortikalen und subkortikalen Regionen auszugehen ist. Für die *kortikalen* Aktivierungen kann von einer Verifizierung der Hypothese berichtet werden. Es zeigt sich, dass bei der *Initiierung* in der *linken* Hemisphäre eine Tendenz zur Mehraktivierung vorhanden ist, während für die *Produktionsaktivierungen* diese Tendenz in der *rechten Hemisphäre* zu erkennen ist. Für die *subkortikalen* Strukturen können diese Tendenzen *nicht* bestätigt werden. Die Hypothese erfährt somit eine Teilverifizierung (vgl. Hypothese 4, vgl. Kap. IV, Sektion 5.4.3 oben).

Schließlich beinhalten weitere Ergebnisse in der Studie Implikationen für das Verständnis cerebraler Organisationen bei sprechmotorischen Vorgängen. Bei einem Vergleich dieser Ergebnisse mit in der jüngsten Literatur präsentierten Ergebnissen zur Thematik wird deutlich, dass sie sich *nicht* in vollem Umfang mit den bereits publizierten Ergebnissen decken. Beispielsweise wird in der betrachteten Literatur bei der Initiierung die Beteiligung der Basalganglienstrukturen (Globus pallidus, Putamen, Nucleus caudatus) und v. a. diejenige des Thalamus *nicht* immer erwähnt (z. B. Riecker et al., 2005). Beide subkortikalen Kerngruppen werden dort beim Prozess der Ausführung als aktiviert angeführt. In der vorliegenden Arbeit haben sich die Basalganglien und v. a. der Thalamus auch bei der *Initiierung* von Sprechbewegungen als relevant herausgestellt (vgl. Kap. IV, Sektion 5.4.1.). Dabei kann die größere Bedeutung des Thalamus für diesen Prozess sowohl bei den Aktivierungskontrasten innerhalb der Gesamtbetrachtung als auch bei den Aktivierungskontrasten innerhalb der örtlichen Betrachtung verdeutlicht werden. Durch die örtliche Betrachtung der beiden Regionen nach „small-volume-correction“ ist mehr Klarheit bezüglich ihrer Funktion geschaffen worden. Die in der Studie präsentierten Ergebnisse zu dieser Fragestellung stehen somit auf der Grundlage der angewandten methodischen Vorgehensweise weiter zur Diskussion.

2. Diskussion der Erkenntnisse

Aus den dokumentierten Ergebnisse sind einige Erkenntnisse zu ziehen, die im Folgenden zu diskutieren sind:

Die mündliche Sprachproduktion umfasst neben Prozessen der lexikalischen Selektion und der phonologischen Enkodierung auch die hier behandelten Aspekte der Initiierung von Sprechbewegungen sowie deren Ausführung. Einzelne Abschnitte des Initiierungs- und Produktionsprozesses sind jedoch bis zum heutigen Tag noch unbekannt. Somit ist es nicht verwunderlich, dass diese Prozesse in der aktuellen Literatur mit unterschiedlichen cerebralen Regionen und Organisationsformen in Verbindung gebracht werden. In der vorliegenden Arbeit wird ebenfalls ein Beitrag zur Vorstellung über die Vernetzung von kortikalen und subkortikalen Hirnregionen bei diesen Prozessen durch die Bewertung der unterschiedlichen Intensität hämodynamischer Antworten geliefert. Es kann dabei im *Unterschied* zu in der Literatur zu findenden Darlegungen gezeigt werden, dass der Prozess der *Initiierung* als kognitiver Prozess im Vergleich mit demjenigen der Produktion ein *größeres* Ausmaß an cerebraler Aktivität und Komplexität für sich beanspruchen kann.

Die mancherorts in der Literatur für die Erstellung des sprechmotorischen Programms eher als weniger bzw. als nicht bedeutsam eingeschätzten subkortikalen Strukturen der *Basalganglien* und des *Thalamus* erweisen sich in der vorliegenden Arbeit als *äußerst relevant* für diesen kognitiven Prozess bei der Sprachproduktion (vgl. auch Kap. II, Sektion 4). Folglich ist in dem in der Arbeit vorgestellten Modell zur cerebralen Organisation von Sprechbewegungen zu vermitteln, dass die bei der *motorischen Ausführung* allgemein akzeptierte „integrative Funktion“ der Basalganglien und des Thalamus innerhalb der sog. direkten und indirekten Basalganglienschleife auch beim *Initiierungsprozess* ihre Gültigkeit hat. Die Basalganglien und der Thalamus fungieren somit innerhalb dieses Prozesses als „*Pendant*“ zu den kortikalen Initiierungsregionen ebenso wie sie beim Prozess der Ausführung das subkortikale „*Pendant*“ zu den motorischen Kortexarealen darstellen. Diese Interpretation lässt folglich den Schluss zu, dass beide Kernmassen beim Prozess der Initiierung *und* beim Prozess der Ausführung von Sprechbewegungen in übergeordnete Schaltkreise eingebunden sind.

Auf dieser Erkenntnis der Wichtigkeit beider Kernmassen für die Initiierung und Produktion basierend kann in der Folge in der Arbeit eine *Modellvorstellung* zur Rolle der Basalganglien und des Thalamus bei beiden Prozessen entwickelt werden. In dieser Modellvorstellung werden Gemeinsamkeiten, aber

auch Unterschiede zwischen den beiden subkortikalen Regionen herausgestellt. Die Modellvorstellung beinhaltet für beide Regionen zunächst, dass sie in *größerem Umfang* an der *Initiierung* als an der Ausführung von sprechmotorischen Bewegungen beteiligt sind. Darüber hinaus kann die Bedeutung der subkortikalen Zentren für beide Prozesse anhand von Aktivierungsunterschieden gegenüber der Baseline herausgestellt werden.

Beim direkten Vergleich der Basalganglienaktivitäten mit den Thalamusaktivitäten kann zudem auf die *größere Relevanz thalamischer Strukturen* für die *Initiierung* von sprechmotorischen Bewegungen hingewiesen werden.

Dass sich mehr *artikulatorische Komplexität* bei sprechmotorischen Vorgängen anhand von Aktivierungsunterschieden bei den gegenübergestellten CV-Silben auch mit Bezug auf artikulatorische Subsysteme nachweisen lässt, stellt eine weitere, aus der Studie zu ziehende Erkenntnis dar. Diese Erkenntnis basiert auf der Möglichkeit, die *laryngalen* Ab- und Adduktionsanforderungen sowie die glottal-supraglottalen Koordinationsanforderungen bei der CV-Silbenproduktion vom Typ /'tatata/ gegenüber den Anforderungen bei der Produktion der CV-Silben vom Typ /'nanana/ hämodynamisch abgrenzen zu können. Der vorhandene Kontrast verweist auf die nur bei der /ta/-Silbenproduktion notwendige *Larynxaktivität*. Aus den herausgestellten Aktivierungsunterschieden lässt sich zudem eine weitere Erkenntnis herleiten, die die topographische Organisation des Motorkortex betrifft. Die Aktivierungsunterschiede sind erstaunlicherweise im oberen superioren Bereich des Motorkortex zu finden und *nicht* im unteren Bereich, wo der *Larynx* topographisch im Homunculus in klassischem Sinne angesiedelt ist. Die daraus herzuleitende Einsicht geht konform mit auch in der Literatur zu findenden Aussagen über topographische Repräsentationen auf dem Motorkortex. In mehreren Studien wird angenommen, dass innerhalb der groben topographischen Repräsentationen (von Gesicht, Arm, Bein, Zunge, Larynx etc.) auf dem Homunculus die Beziehungen zwischen einzelnen Muskelgruppen und Zellpopulationen nicht immer eindeutig sind. Deshalb sind an verschiedenen Stellen auf der Oberfläche des motorischen Gesichtskortex zum Teil sehr komplexe motorische Aktivitäten von z. B. der Zunge, den Lippen oder dem Kiefer auslösbar. Die Beziehungen zwischen einzelnen Muskelgruppen und ihnen zugeordneten Zellpopulationen der motorischen Rinde können auch auf der Grundlage der Ergebnisse der vorliegenden Studie als nicht immer eindeutig charakterisiert werden.

Schließlich beinhaltet das in der Arbeit vorgestellte *Modell zur cerebralen Organisation bei Sprechvorgängen* Unterschiede zu bereits in der jüngsten Lite-

ratur vorhandenen Modellvorstellungen. Die Unterschiede konzentrieren sich auf differierende Angaben über die Beteiligung bzw. Nichtbeteiligung kortikaler (Motorkortex, Inselkortex) sowie subkortikaler (Basalganglien, Thalamus) Regionen bei der Initiierung und Produktion. Für die subkortikalen Strukturen der Basalganglien und des Thalamus kann die in der Arbeit vorgestellte Modellvorstellung über deren Relevanz bei beiden Prozessen angeführt werden. Diese Modellvorstellung basiert sowohl auf der Gesamtbetrachtung zu den Aktivierungskontrasten als auch auf der sog. „örtlichen Betrachtung“ für die beiden Kernmassen, innerhalb derer der Kontrast „Initiierung vs. Produktion“ (auch vice versa) sowie der jeweilige Kontrast zur Baseline erarbeitet wird. Durch den methodischen Rückgriff auf die sog. „örtliche Betrachtung“ dieser beiden Regionen innerhalb des Experimentes wird mehr Klarheit bezüglich ihrer Funktion bei beiden Prozessen geschaffen.

Neben den Basalganglien und dem Thalamus werden im Modell für den *Produktionsprozess* bezüglich der *Insel* lateralitätsbezogene Unterschiede herausgestellt. Gegensätzlich zu bereits publizierten Ergebnissen spielt hierbei nicht die linke, sondern die *rechte* Insel eine Rolle.

Die linke Insel ist entsprechend der für das Experiment herausgestellten rechtshemisphärischen Priorität bei der Produktion nicht zu kontrastieren.

Weiter wird in diesem Modell deutlich, dass neben den subkortikalen Regionen der Basalganglien und des Thalamus auch unterschiedliche Regionen des Cerebellums in die *beiden* übergeordneten kortikalen Schaltkreise bei der Initiierung und bei Produktion eingebunden sind. Für die beiden Prozesse können somit *zwei kortikal hemisphärenbetonte Schaltkreise* mit unterschiedlichen *Prioritäten* (Initiierung eher links, Produktion eher rechts) postuliert werden, die aber *subkortikal unspezifisch* ihre *Vernetzungen* in den *beidseitigen* Basalganglien und für die Initiierung vor allem im *Thalamus* haben. Darüber hinaus bekommen in diesem Modell beide Schaltkreise beidseitig subkortikale „Unterstützung“ für die Vorbereitung und Ausführung der motorischen Bewegungen durch unterschiedliche Regionen des Cerebellums. Das vorgestellte Modell zur cerebralen Organisation von Sprechbewegungen versteht sich somit als ein „integratives Modell“ in Bezug auf die Relevanz der subkortikalen Strukturen der Basalganglien, des Thalamus und des Cerebellums.

3. Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dem in dieser Arbeit präsentierten fMRT-Experiment wird ein weiterer Beitrag zur neuronalen Architektur des Initiierungs- und Ausführungsprozesses von Sprechbewegungen geliefert. Dabei werden cerebrale Aktivitäten im interpretatorischen Kontext von glottalen Phonations- und glottal-supra-glottalen Artikulationsmechanismen und Abfolgen betrachtet. Die Ergebnisse des vorliegenden Experiments können als Ausgangspunkt für weiter zu verfolgende Forschungsvorhaben angesehen werden. Diesen Forschungsvorhaben sollten wiederum phonetisch durchdachte Fragestellungen bezüglich phonatorischer und artikulatorischer Abläufe und Zusammenhänge in der Sprachproduktion zugrunde liegen. Die Ergebnisse zu diesen Experimenten sollten ebenso wie hier unter Beachtung des „phonetischen Backgrounds“ ihre Interpretation erfahren. Dabei können weitere verfolgungswürdige Aspekte innerhalb dieser Thematik einerseits in zukünftigen Experimenten mit gesunden Probanden konkretisiert werden. Andererseits sollte aber auch pathologisches Phonations- und Artikulationsverhalten Gegenstand weiterer Studien sein. In diesem Zusammenhang dürften auch die phonatorischen und glottal-supraglottal artikulatorischen Leistungen von Patienten mit M. Parkinson bzw. mit multipler Sklerose *vor* und *nach* Elektrodenimplantation in den Nucleus subthalamicus (M. Parkinson) bzw. Nucleus ventralis intermedius des Thalamus (multiple Sklerose) von Interesse sein, die Anlass zu der vorliegenden Studie gegeben haben. Wie mehrfach in der Arbeit erwähnt, kann in neueren Studien gezeigt werden, dass unter Stimulation bei beiden Patientengruppen sowohl die Phonation als auch die glottal-supraglottale Artikulation gestört sein können (z. B. Pützer et al., 2006 & 2007). Die Durchführbarkeit der fMRT *unter Stimulation* wird neben der Praktikabilität der MRT (z. B. Rezai et al., 2002; Rezai et al., 2004; Baker et al., 2005) in neuesten Studien als ebenfalls möglich dargestellt, *wenn gewisse Voraussetzungen beachtet werden* (z. B. Rezai et al., 1999; Zonenshayn et al., 2000; Georgi et al., 2004; Volkmann & Kupsch, 2004; Phillips et al., 2006)⁴¹.

Für beide Gruppen (für gesunde Probanden und Patienten) scheint dann innerhalb dieser prospektiven Forschungsvorhaben das *interpretatorische Zusammenbringen* von *fMRT-Daten* mit *instrumentellen*, an den Erfolgsorganen (Larynx; supraglottale Artikulatoren) gewonnenen *Signal-Daten* unter Verwen-

⁴¹ Volkmann und Kupsch (2004) schätzen beispielsweise die Untersuchung der Effekte der tiefen Hirnstimulation mittels der funktionellen Bildgebung (fMRT, PET, SPECT bei Patienten mit implantierten Thalamuselektroden zur Behandlung des essentiellen Tremors sehr positiv ein.

derung der elektrolottographischen (Phonation) sowie der akustischen (Phonation und glottal-supraglottale Artikulation) Analyse sinnvoll. Hierbei ist die Frage zu stellen, ob sich eine Tendenz eines *Zusammenhangs* zwischen der zentralmotorisch durch die Bildgebung nachgewiesenen Produktionssituation und dem Artikulationsverhalten des Larynx und der supraglottalen Artikulatoren wie beispielsweise der Zunge und des Velums (nachgewiesen durch instrumentalphonetische Untersuchungsmethoden) manifestieren lässt. Um mehr über diesen vermuteten Zusammenhang zu erfahren, könnte einerseits die Funktionalität der Vagus- und Hypoglossuskern anhand von fMRT-Daten bewertet werden. Dazu müsste die Zentralregion entlang der Nervenbahnen, die für die Kehlkopf- und Zungensteuerung verantwortlich sind, gemessen werden. Andererseits könnten Rückschlüsse auf diese Funktionalität der neuronalen Steuerungssysteme aus den an den Erfolgsorganen gewonnenen Daten gezogen werden. Damit ließen sich beide an der Artikulation beteiligten Systeme (Phonationssystem und System der glottal-supraglottalen Artikulation) bei gesunden Probanden und bei Patienten mit unterschiedlichen Phonations- und Artikulationsstörungen in ihrer neuronalen Funktionalität bzw. Dysfunktionalität besser charakterisieren.

**The role of cortical and subcortical structures in initiation and production
of articulatorily different cv-syllable repetitions
An fMRI study**

Summary

1. Findings

The present study addresses a number of methodically orientated questions concerning the neural processes involved in the initiation (planning) and execution (production) of articulatory movements. Four hypotheses are postulated.

The *first two* questions concern (a) the locations and (b) the general level of activation in the cortical and subcortical regions of the brain during initiation and production. The hypothesis is that the initiation of articulatory movement needs more cortical and subcortical activation than the production.

To locate the relevant areas of the brain for these two processes, the activity levels during initiation and production are set in contrast to each other. Since areas of activity shared by both processes do not appear when they are contrasted, the locations and the overall levels are determined by contrasting each with a baseline condition.

The results of this “twofold” contrast generally show more activation in the cortical (motor cortex, supplemental and premotor areas) as well as subcortical (basal ganglia and thalamus) areas during the initiation of articulatory movement. In this regard, the first hypothesis of the experiment is verified (see hypothesis 1, Chapter IV, Section 5.4.1.). The activations during the *initiation* process shows a network of different cortical and subcortical areas of the brain. This illustrates the complexity of the process. The *production process* on the other hand primarily shows the expected activation contrasts in the motor cortex alongside those of the subcortical motor centres.

The *next two* questions are again concerned with the activation differences between initiation and production, this time focussed on the basal ganglia and the thalamus. The third question is answered by again contrasting the activation during the initiation phase of each of the cv-syllables to that during production. The fourth by contrasting the activation during the two processes with baseline activation. The second hypothesis is that subcortical areas (basal ganglia and thalamus) show *stronger* activation during the initiation than during the production.

The basal ganglia and the thalamus can indeed be regarded as more relevant to the process of *initiation*, both on the basis of overall observation and local inspection. Within this relevance for initiation, the *thalamus* plays a more important role than the basal ganglia. The corresponding hypothesis can therefore be verified (see hypothesis 2, Chapter IV, Section 5.4.1.).

The *fifth* question focuses on the relation between articulatory complexity of individual cv-syllables and cerebral activation intensity during initiation and production.

To answer this question, the activation levels during the production of different types of cv-syllables were contrasted with one another. The third hypothesis behind the question is: There is a relation between complexity of articulatory movements and intensity of neural activation during the initiation and production.

The results indicate that a difference between /ta/ and /na/ syllables can only be found during the production phase. This contrast can be interpreted in terms of the articulatory complexity of the two cv-syllables (voiceless non-nasal vs. voiced nasal). For the production of the remaining syllables, no contrast can be established in the production activations. Likewise, it proved impossible to identify syllable-specific differences of activation during the initiation process. Contrasting the production activations for the two syllables in the motor cortex can only be achieved using “small-volume-correction”. In the subcortical centres of the basal ganglia and the thalamus, no contrasting is possible. Thus, the hypothesis derived from this fifth question is partially verified (see hypothesis 3, Chapter IV, Section 5.4.2.).

The verification (or falsification) of the three above-mentioned hypotheses is discussed in detail in the results section of the experiment (see Chapter IV, Section 5.4.1. and 5.4.2).

There is a *fourth* hypothesis connected to these questions. It concerns the discussion of tendencies towards cortical and/or subcortical laterality in the activations visible in the initiation and execution of syllable production. The hypothesis is that cortical and/or subcortical activations for the two processes (initiation and production) show cerebral laterality.

It was possible to verify this hypothesis for the cortical activations. It turns out that during *initiation*, a tendency toward greater activation is present in the *left* hemisphere, while for *production*, the tendency is for greater activation in the *right* hemisphere. For the subcortical structures, these tendencies *cannot* be

confirmed. The hypothesis is thereby partially verified (see hypothesis 4, Chapter IV, Section 5.4.3.).

Finally, further results in the study contain implications for our understanding of cerebral organisation during articulatory processes. A comparison with findings presented in the recent literature shows that these results do *not* entirely agree with the previous findings. For example, the literature under consideration does *not* always mention the involvement of the basal ganglia structures (globus pallidus, putamen, nucleus caudatus), nor particularly, of the thalamus during initiation (e.g. Riecker et al., 2005). There, both subcortical nuclear groups are said to be activated during the execution process. In the present work, the basal ganglia and especially the thalamus have proved to be relevant during the *initiation* of articulatory movements as well (see Chapter IV, Section 5.4.1.). For this process, the greater importance of the thalamus is made clear for the activation constants both on the basis of overall observation and local inspection. Examining these two regions locally after “small-volume-correction” has clarified their function. The results presented in this study concerning this question can be discussed with respect to the methods employed.

2. Discussion of findings

The documented results allow several conclusions to be drawn, which will be discussed here.

The oral production of speech encompasses not only processes of lexical selection and phonological encoding, but also the aspects of initiation and execution of articulatory movements dealt with here. However, individual stages of initiation and production process are, to this day, unknown. Hence it is not surprising that in the literature these processes are associated with different cerebral regions and differing forms of organisation. The present work also contributes to the picture of complex networking of cortical and subcortical regions of the brain during these processes by evaluating the varying intensity of haemodynamic responses. In *contrast* to the analyses found in the literature, it can be shown that the process of *initiation* as a cognitive process calls for *greater* degree of cerebral activity and complexity than that of production.

The subcortical structures of the *basal ganglia* and the *thalamus*, considered in some of the literature to be less important, or even irrelevant for the establishment of the motor program for speech, is shown in the present work to be *extremely relevant* for this cognitive process during speech production. Therefore, the model of the cerebral organisation of articulatory movements presen-

ted in this work suggests that the “integrative function” of the basal ganglia and the thalamus within the so-called basal ganglia loop, which is generally accepted for motor execution, valid during the *initiation process* as well. Within this process, the basal ganglia and the thalamus function as the *counterpart* of the cortical initiation regions, just as they represent the subcortical *counterpart* of the motor cortex areas during the process of execution. This interpretation allows the conclusion that both nuclear masses are integrated into superordinate circuits during the initiation process *as well as* during the execution process.

Based on this realisation of the importance of both nuclear masses for initiation and production, a *conceptual model* of the role of the basal ganglia and the thalamus in both processes can be developed in the course of this study. This model outlines similarities as well as differences between the two subcortical regions. For both regions, the model initially assumes that they are involved in the *initiation* of articulatory movements *to a greater extent* than in the execution. Moreover, the significance of the subcortical centres can be revealed for both processes by means of the activation difference to the baseline. The direct comparison of basal ganglia activity with thalamus activity further illustrates the *greater relevance of thalamic structures* for the *initiation* of articulatory movements.

Another conclusion to be drawn from this study is that some aspects of articulatory complexity during speech motor processes can be revealed through activation differences between contrasted cv-syllables in relation to articulatory subsystems as well. This insight is based on the possibility of haemodynamically separating laryngeal requirements of abduction and adduction, as well as glottal-supraglottal requirements of gestural coordination for the production of cv-syllables of the /tatata/ type as opposed to the requirements for the production of cv-syllables of the /nanana/ type. The existing contrast refers to the only necessary activity of the larynx during production of the /ta/-syllables.

The activation differences found in this way allow additional insight into the topographical organisation of the motor cortex. Surprisingly, the activation differences are to be found in the upper superior area of the motor cortex and *not* in the lower area, which is the topographical position of the larynx in the classical homunculus. The insight derived from this also conforms to the topographical representations on the motor cortex found in the more recent literature. Several studies assume that within the rough topographical order (of the face, arms, legs, tongue, larynx, etc.) on the homunculus, the relations between

individual muscle groups and cell populations are not always well-defined. This is why in several places on the surface on the face motor cortex, some highly complex motor activity of e.g. the tongue, lips, or jaw can be individually provoked. The results of the present study suggest also that the relations between individual muscle groups and their corresponding cell populations of the motor cortex cannot always be characterised as clear-cut.

Finally, the *model of cerebral organisation during articulatory processes* presented in this work contains differences to the conceptual models reported in recent literature. Accounts differ as to the involvement (or lack thereof) of cortical (motor cortex, insular cortex) as well as subcortical (basal ganglia, thalamus) regions during initiation and production. As far as the subcortical structures of the basal ganglia and the thalamus are concerned, the model derived from the results of this study claims their relevance for both processes. This model is based both on the overall observation of the activation constants and on the so-called “local inspection” of both nuclear masses, within which the contrast of “initiation vs. production” as well as the respective contrast to the baseline is examined. Methodologically, the so-called “local inspection” of these two regions within the experiment clarifies their function during the two processes.

In addition to the basal ganglia and the thalamus, the model provides for laterality differences in the *insular cortex* with respect to the *production process*. In contrast to previously published results, it was not the left, but the *right* insular cortex that was involved in the subjects examined here.

The left insular cortex cannot be contrasted due to the priority of the right hemisphere found during production in the experiment.

Furthermore, this model make it clear that, besides the subcortical regions of the basal ganglia and the thalamus, various regions of the cerebellum are integrated into the superordinate circuits of *both* initiation and production. This allows us to postulate *two cortical hemisphere dependent circuits* with different *priorities* (initiation rather on the left side, production rather on the right) which are nevertheless (subcortically unspecified) *networked* with the *right and left* basal ganglia areas and for initiation, especially in the thalamus. Additionally, in this model, both circuits receive double-sided subcortical “support” from different regions of the cerebellum for the preparation and execution of motor movements. Our model of cerebral organisation of articulatory movements can thus be viewed as an “integrative model” with respect to the relev-

ance of the subcortical structures the basal ganglia, the thalamus, and the cerebellum.

3. *Conclusions and outlook*

The fMRI experiment presented in this work delivers a further contribution towards the definition of a neural architecture of initiation and execution processes of articulatory movements. In the process, cerebral activities in the interpretative context of glottal-phonatory and glottal-supraglottal-articulatory mechanisms and sequences are examined. The results of the present experiment can be taken as a point of departure for further research endeavours. These need to be based on phonetically sophisticated questions concerning differentiated phonatory and articulatory sequences and relations in speech production. As with the present study, the results of those experiments should be interpreted against the “phonetic background”. On the one hand, significant aspects within this topic could be substantiated in future experiments with healthy subjects. On the other hand, pathological phonatory and articulatory behaviour should also be subject to further studies. In this regard, the phonatory and articulatory performance of patients with Parkinson’s disease or multiple sclerosis *before* and *after* bilateral stereotaxic electrode implantation into the subthalamic nucleus (Parkinson’s disease) or into the ventral intermediate nucleus (multiple sclerosis) - a question which gave rise to this study - should be of interest. As mentioned several times, newer studies have managed to show that under deep-brain stimulation, phonation as well as glottal-supraglottal articulation can be disturbed in both groups of patients (cf. Pützer et al., 2006 & 2007). The feasibility of fMRI *under* deep brain stimulation alongside the feasibility of MRI has been documented in the newest studies (e.g. Rezai et al., 2002; Rezai et al., 2004; Baker et al., 2005), *if certain conditions are fulfilled* (e.g. Rezai et al., 1999; Zonenshayn et al., 2000; Georgi et al., 2004; Volkmann & Kupsch, 2004; Phillips et al., 2006).

For both groups (healthy subjects and patients), the *interpretative combination* of *fMRI data* with *instrumentally obtained signal data* from the participating organs (larynx; supraglottal articulators) using electroglottographic (phonation) and acoustic (phonation and glottal-supraglottal articulation) analysis seems to make sense. A *connection* between the production activity (revealed in the central motor area through imaging) and the articulatory behaviour of the larynx and supraglottal articulators such as the tongue and the velum (shown by instrumental phonetic methods of investigation) would provide an

important link in the chain of understanding. On the one hand the function of the vagus and hypoglossus nuclei can be evaluated on the basis of fMRI data. This would require measuring the central region of the neural pathways responsible for laryngeal and lingual control. On the other hand, conclusions about the function of these neural control systems could be drawn from data obtained from the participating organs. This would allow a better characterisation of both systems (phonatory system and system of glottal-supraglottal articulation) involved in articulation, in healthy subjects as well as in patients with different phonatory and articulatory disorders with respect to their neural function or dysfunction.

Literaturverzeichnis

1. Ackermann, H., Daum, I., Schugens, M.M., Grodd, W. (1996): Impaired procedural learning after damage to the left supplementary motor area (SMA). *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 60: 94-97.
2. Ackermann, H., Hertrich, I. (2000): Cerebellum and speech processing. *J Neuroling* 15: 95-116.
3. Ackermann, H., Hertrich, I., Daum, I., Scharf, G., Spieker, S. (1997): Kinematic analysis of articulatory movements in central motor disorders. *Mov Disord* 12: 1019-1027.
4. Ackermann, H., Mathiak, K., Hertrich, I., Grodd, W., Riecker, A. (2005): Functional MRI reveals two distinct cerebral networks subserving speech motor control. 22. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie; 24. Kongress der Union Europäischer Phoniater, 16. bis 18.09. 2005, Berlin: <http://www.egms.de/en/mee-tings/dgpp2005/05dgpp051.shtml>.
5. Ackermann, H., Riecker, A. (2004): The contribution of the insula to motor aspects of speech production: A review and a hypothesis. *Brain Lang* 89: 320-328.
6. Ackermann, H., Wildgruber, D., Daum, I., Grodd, W. (1998): Does the cerebellum contribute to cognitive aspects of speech production? A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study on humans. *Neurosci Lett* 247: 187-190.
7. Afifi, A.K., Bergman, R.A., Jew, J.J., Reimann, P.C.: *Atlas of Human Anatomy in Cross Section*. University of Iowa 1995.
8. Ashburner, J., Friston, K.J. (1999): Nonlinear spatial normalization using basis functions. *Hum Brain Mapp* 7: 254-266.
9. Attwell, D., Iadecola, C. (2002): The neural basis of functional brain imaging signals. *Trends in Neurosciences* 25: 621-625.
10. Baker, K.B., Nyenhuis, J.S., Hrdlicka, G., Rezai, A.R., Tkach, J.A., Shellock, F.G. (2005): Neurostimulation systems: assessment of magnetic field interactions associated with 1.5- and 3-Tesla MR systems. *J Magn Reson Imaging* 21: 72-77.
11. Bähr, M., Frotscher, M. Unter Mitarbeit von Küker, W.: *Duus' Neurologisch-topische Diagnostik. Anatomie – Funktion – Klinik*. Würzburg 2003.

12. Bandettini, P.A., Wong, E.C., Hings, R.S., Tikofsky, R.S., Hyde, J.S. (1992): Time course of EPI if human brain function during task activation. *Mag Reson Med* 25: 390-397.
13. Benabid, A.L., Wallance, B., Mitrofanis, J., Xia, C., Piallat, B., Fraix, V., Batir, A., Krack, P., Pollak, P., Berger, F. (2005): Therapeutic electrical stimulation of the central nervous system. *C R Biol* 328: 177-186.
14. Berg, T.: Die Abbildung des Sprachproduktionsprozesses in einem Aktivationsflußmodell. Tübingen 1988.
15. Birn, R.M., Bandettini, P.A., Cox, R.W., Jesmanowicz A., Shaker R. (1998): Magnetic field changes in the human brain due to swallowing or speaking. *Magn Reson Med* 40: 55-60.
16. Birn, R.M., Bandettini, P.A, Cox, R.W., Shaker, R. (1999): Event-related fMRI of tasks involving brief motion. *Hum Brain Mapp* 7: 106-114.
17. Birn, R.M., Cox, R.W., Bandettini, P.A. (2002): Detection versus estimation in event-related fMRI: choosing the optimal stimulus timing. *Neuroimage* 15: 252-264.
18. Bohland, J.W., Guenther, F.H. (2006): An fMRI investigation of syllable sequence production. *NeuroImage*: online publication: 2006 May 24; [Epub ahead of print].
19. Bolinger, D.: *Aspekts of language*. New York 1975.
20. Bösel, R.M.: *Das Gehirn. Ein Lehrbuch der funktionellen Anatomie für die Psychologie*. Stuttgart 2006.
21. Bradshaw, J.L., Mattingley, J.B.: *Clinical Neurophysiology. Behavioral and Brain Science*. San Diego 1995.
22. Braus, D.F., Henn, F.A. (2002): Psychiatrie im Wandel: neuronale Netzwerkstörungen lassen sich mit moderner Kernspintomographie sichtbar machen. *Schweizer Archiv für Neurologie und Psychiatrie* 153: 256-265.
23. Breit, S., Schulz, J.B., Benabid, A.-L. (2004): Deep brain stimulation. *Cell Tissue Res* 318: 275-288.
24. Brodmann, K.: *Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellaufbaus*. Leipzig 1909; Neudruck 1925.
25. Brooke-Mai, W., Murdoch, B.E., Theodoros, D.G., Darnell, R., Silburn, P., Hall, B. (2004): Redefining Functional Models of Basal Ganglia Organization: Role for the Posteroventral Pallidum in Linguistic Processing? *Mov Disord* 19: 1267-1278.

26. Brown, L.L. , Feldman, S.M. (2003): Basal Ganglia. Introductory Article. In: L. Nadel (ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science* Vol. 1. Chichester 2003.
27. Buckner, R. (1998): fMRI data analysis. Fourth International Conference of Functional Mapping of Human Brain, Montreal 1998. *Proceedings of the Brain Mapping Course*: 82-92.
28. Cabeza, R., Nyberg, L. (1997): Imaging cognition: An empirical review of PET studies with normal subjects. *J Cogn Neurosci* 9: 1-26.
29. Cabeza, R., Nyberg, L. (2000): Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *J Cogn Neurosci* 12: 1-47.
30. Caplan, L.R. (1990): Caudate infarcts. *Arch Neurol* 47: 133-143.
31. Chainay, H., Krainik, A., Tanguy, M.L., Gerardin, E., Le Bihan, D., Lehéricy, S. (2004): Foot, face and hand representation in human supplementary motor area. *Neuroreport* 15: 765-769.
32. Gracco, V.L., Abbs, J.H. (1987): Programming and execution processes of speech movement control: potential neural correlates. In: E. Keller, M. Gopnik (eds.): *Motor and Sensory Processes of Language*. Erlbaum, Hillsdale 1987.
33. Crosson, B. (1985): Subcortical functions in language: A working model. *Brain Lang* 25: 257-292.
34. Crosson, B.: *Subcortical Functions in Language and Memory*. New York 1992.
35. Crosson, B., Benefield, H., Cato, M.A., Sadek, J.R., Moore, A.B., Wierenga, C.E., Gopinath, K. et al. (2003): Left and right basal ganglia and frontal activity during language generation: contributions to lexical, semantic, and phonological processes. *Int Neuropsychol Soc* 9: 1061-1077.
36. Damasio, A.R., Damasio, H., Rizzo, M., Varney, N., Gersh, F. (1992): Aprasia with nonhemorrhagic lesions in the basal ganglia and internal capsule. *Arch Neurol* 39: 15-20.
37. Deacon, T.W. (1992): Brain-Language Coevolution. In: J.A. Hawkins, M. Gell-Mann (eds): *The evolution of human languages*. Redwood City 1992.
38. Deacon, T.W.: *The symbolic species. The Co-evolution of the Language and the Brain*. New York 1997.
39. Dell, G. (1986): A spreading activation theory of retrieval in sentence production. *Psych Rev* 93: 283-321.

40. Delmaire, C., Krainik, A., Tézenas du Montcel, S., Gerardin, E., Meunier, S., Mangin, J.-F., Sangla, S., Garnero, L., Vidailhet, M., Lehericy, S. (2005): Desorganized somatotopy in the putamen of patients with focal hand dystonia. *Neurology* 64: 1391-1396.
41. Demeurisse, G., Capon, A., Verhas, M., Attig, E. (1990): Pathogenesis of aphasia in deep-sead lesions: Likley role of cortical diaschisis. *Eur Neurol* 30: 67-74.
42. Dietrich, R. (1999): On the production of word order and the origin of incrementality. In: R. Klabunde, C. von Sutterheim (eds.): *Representations and processes in language production*. Wiesbaden 1999.
43. Dogil, G., Ackermann, H., Grodd, W., Haider, H., Kamp, H., Mayer, J., Riecker, A., Wildgruber, D. (2002): The speaking Brain: a tutorial introduction to fMRI experiments in the production of speech, prosody and syntax. *J Neuroling* 15: 59-90.
44. Dogil, G., Ackermann, H., Mayer, J., Riecker, D., Wildgruber, D. (2003): Das Sprechnetzwerk im menschlichen Gehirn: Evidenz aus der funktionellen Kernspintomographie und aus der Klinik. In: H.M. Müller, G. Rickheit (Hrsg.): *Neurokognition der Sprache*. Tübingen 2003.
45. v. Economo, C.: *Zellaufbau der Großhirnrinde des Menschen*. Berlin 1927.
46. v. Economo, C., Koskinas, G.N.: *Die Cytoarchitektonik der Hirnrinde des erwachsenen Menschen*. Wien 1925.
47. Elsinger, C.L., Harrington, D.L., Roa, S.M. (2006): From preparation to online control: Reappraisal of neural circuitry mediating internally generated and externally guided actions. *Neuroimage* 31: 1177-1187.
48. Eulitz, C., Elbert, T., Bartenstein, P., Weiller, C., Müller, S.P., Pantev, C. (1994): Comparison of magnetic and metabolic brain activity during a verb generation task. *Neuroreport* 6: 97-100.
49. Fox, P.T., Huang, A., Parsons, L.M., Xiong, J.-H., Zamarippa, F., Rainey, L., Lancaster, J.L. (2001): Location-probability profiles for the mouth region of human primary motor-sensory cortex: model and validation. *Neuroimage* 13: 196-209.
50. Franceschini, R., Hufeisen, B., Jessner, U., Lüdi, G. (eds) (2004): *Gehirn und Sprache: Psycho- und neurolinguistische Ansätze*. Brain Lang Psycholinguistic and neurobiological issues, *Bulletin vals-asla*, 78.
51. Frese, I.: *Phrasenstruktur im Gehirn: neuroanatomische Korrelate syntaktischer Konstituentenanalyse*. Arbeitspapiere des Instituts für Maschinelle Sprachverarbeitung Vol. 10. Dissertation. Stuttgart 2004.

52. Friston, K.J., Holmes, A.P., Poline, J.B., Grasby, P.J., Williams, S.C., Frackowiak, R.S.J., Turner, R. (1995): Analysis of fMRI time-series revisited. *Neuroimage* 2: 45-53.
53. Fromkin, V.A. (1971): The non-anomalous nature of anomalous utterances. *Language* 47: 27-52.
54. Gadian, D.D.: *NMR and its Application to Living Systems*. Oxford, New York, Tokyo 1995.
55. Garret, M.F. (1980): Levels of processing in sentence production. In: B. Butterworth (ed.): *Language production*. Vol. 1: speech and talk. London 1980.
56. Gentil, M. (1990): Organisation of the articulatory system: peripheral mechanisms and central coordination. In: W.J. Hardcastle, A. Marchal (eds.): *Speech production and speech modelling*. Dordrecht 1990.
57. Georgi, J.D., Stippich, C., Tronnier, V.M., Heiland, S. (2004): Active deep brain stimulation during MRI: a feasibility study. *Magn Reson Med* 51: 380-388.
58. Gerardin, E., Lehericy, S., Pochon, J.-B., Tézenas du Montcel, S., Mangin, J.-F., Poupon, F., Agid, Y., Le Bihan, D., Marsault, C. (2003): Foot, Hand, Face and Eye Representation in the Human Striatum. *Cerebral Cortex* 13: 162-169.
59. Gevins, A., Le, J., Martin, N.K., Brickett, P., Desmond, J., Reutter, B. (1994): High resolution EEG: 124-channel recording, spatial deblurring, and MRI integration methods. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 90: 337-358.
60. Ghez, C. (1991): The cerebellum. In: E. Kandel, J. Schwarz, T. Jessell (eds.): *Principles of Neural Science*. Amsterdam 1991.
61. Gil Robles, S., Gatinol, P., Capelle, L., Mitchell, M.-C., Duffau, H. (2005): The role of dominant striatum in Language: a study using intraoperative electrical stimulations. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 56: 940-946.
62. Grafton, S.T., Woods, R.P., Maziotto, J.C., Phelps, M.E. (1991): Somatotopic mapping of the primary motor cortex in humans: activation studies with cerebral blood flow and positron emission tomography. *J Neurophysiol* 66: 735-743.
63. Grewendorf, G., Hamm, F., Sternefeld, W.: *Sprachliches Wissen. Eine Einführung in moderne Theorien der grammatischen Beschreibung*. Frankfurt a. M. 1993.
64. Günther, C.: *Prosodie und Sprachproduktion*. Tübingen 1999.

65. Haslinger, B., Erhard, P., Dresel, C., Castrop, F., Roettinger, M., Ceballos-Baumann, A.O. (2005): „Silent event-related“ fMRI reveals reduced sensorimotor activation in laryngeal dystonia. *Neurology* 65: 1562-1569.
66. Herrero, M.-T., Barcia, C., Navarro, J.M. (2002): Functional anatomy of thalamus and basal ganglia. *Child's Nervous System* 18 (8): 386-404.
67. Huang, J., Carr, T.H., Cao, Y. (2001): Comparing cortical activation for silent and overt speech using event-related fMRI. *Hum brain Mapp* 15: 39-53.
68. Huber, W. (1989): Dysarthrie. In: K. Poeck (Hrsg.): *Klinische Neuropsychologie*. Stuttgart New York 1989.
69. Indefrey, P., Levelt, W.J.M. (2000): The neural correlates of language production. In: M. Gazzaniga (ed.): *The new cognitive neurosciences*. Cambridge 2000.
70. Johnson, M.D., Ojemann, G.A. (2000): The Role of the Human Thalamus in Language and Memory: Evidence from Electrophysiological Studies. *Brain and Cognition* 42: 218-230.
71. Kempen, G., Hoenkamp, E. (1987): An incremental procedural grammar for sentence formulation. *Cognitive Science* 11: 201-258.
72. Kent, R.D. (2004): Models of speech motor control: Implications from recent developments in neurophysiological and neurobehavioral science. In: B. Maasen, R.D. Kent, H.F.M. Peters, P.H.H. M. van Lieshout, W. Hulstijn (eds.): *Speech motor control in normal and disordered speech*. Oxford 2004.
73. Kent, R.D., Kent, J.F., Weismer, G. (2000): What dysarthrias can tell us about the neural control of speech. *J of Phonetics* 28: 273-302.
74. Klabunde, R., von Stutterheim, C. (eds.): *Representations and processes in language production*. Wiesbaden 1999.
75. Klein, D., Zatorre, R.J., Milner, B., Meyer, E., Evans, A.C. (1994): Left putaminal activation when speaking a second language: Evidence from PET. *Neuroreport* 5: 2295-2297.
76. Klose, U., Erb, M., Raddi, A., Grodd, W. (1999): Funktionelle Bildgebung mit der Magnetresonanztomographie. *Electromedica* 67: 27-36.
77. Krauss, J.K., Volkman, J. (Hrsg.): *Tiefe Hirnstimulation*. Darmstadt 2004.
78. Kuriki, S., Mori, T., Hirata, J. (1999): Motor planino center for speech articulation in the normal human brain. *Neuroreport* 10: 765-769.
79. Kwong, K.K., Belliveau, J.W., Chesler, D.A., Goldberg, I.E., Weisskoff, R.M., Poncelet, B.P., Kennedy, D.N. et al. (1992): Dynamic magnetic

- resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 89: 5675-5679.
80. Levelt, W.J.M. (1999): Producing spoken language: a blueprint of the speaker. In: C.M. Brown, P. Hagoort (eds.): *The neurocognition of language*. Oxford 1999.
 81. Levelt, W.J.M.: *Speaking: from intention to articulation*. Cambridge, MA: 1989.
 82. Levelt, W.J.M., Schriefers, H., Vorberg, D., Meyer, A., Pechmann, T., Hainfing, J. (1991): The time course of lexical access in speech production: a study of picture naming. *Psychol Rev* 98: 122-142.
 83. Lindblom, B. (1983): Economy of speech gestures. In: P.F. MacNeilage (ed.): *The production of speech*. New York 1983.
 84. Lindblom, B. (1968): Temporal organization of syllable production. *Quarterly Progress and Status Report* 2-3. Stockholm.
 85. Liotti, M., Gay, C.T., Fox, P.T. (1994): Functional imaging and language: Evidence from PET. *J Clin Neurophysiol* 11: 175-190.
 86. Logothetis, N.K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T., Oeltermann, A. (2001): Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature* 412: 150-157.
 87. Maasen, B., Kent, R.D., Peters, H.F.M., van Lieshout, P.H.H.M., Hulstijn, W. (eds.): *Speech motor control in normal and disordered speech*. Oxford 2004.
 88. Maillard, L., Ishii, K., Bushara, K., Waldvogel, D., Schulmann, A.E., Hallett, M. (2000): fMRI evidence for somatotopic representation of face, hand, and foot. *Neurology* 55: 377-383.
 89. Marasek, K.: *Electroglottographic Description of Voice Quality*. Arbeitspapiere des Instituts für Maschinelle Sprachverarbeitung Vol. 3. Habilitationsschrift. Stuttgart 1997.
 90. Mayer, J., Wildgruber, D., Riecker, A., Dogil, G., Ackermann, H., Grodd, W. (2002): Prosody Production and Perception: Converting Evidence from fMRI Studies. *Proceedings of Speech Prosody 2002*, Aix-en-Provence, France, April 11-13 2002: 487-490.
 91. Martin, R., C. (2003): Language processing: functional organization and neuroanatomical basis. *Annual Review of Psychology* 54: 55-89.
 92. MacNeilage, P.F. (1970): Motor control and serial ordering of speech. *Psychological Review* 77: 182-196.

93. MacNeilage, P.F., Ladefoged, P. (1976): The production of speech and language. In: E.C. Carterette, M.P. Friedman (eds.): Handbook of perception: Vol. 7. New York 1976.
94. Mega, M.S., Alexander, M.P. (1994): Subcortical aphasia: The core profile of capsulostriatal infarction. *Neurology* 44: 1824-1829.
95. Metter, E.J., Riege, W.H., Hanson, W.R., Jackson, C.A., Kempler, D., Lancker, D. (1988): Subcortical structures in aphasia. *Arch Neurol* 45: 1229-1234.
96. Meyer, M., Alter, K., Friederici, A.D., Lohmann, G., von Cramon, D.Y. (2002): fMRI reveals brain regions mediating slow prosodic modulations in spoken sentences. *Hum Brain Mapp* 17: 73-88.
97. Middleton, F. A., Strick, P.L. (2000): Basal ganglia output and connection: Evidence from anatomical, behavioural and clinical studies. *Brain Cogn* 42: 183-200.
98. Monchi, O., Petrides, M., Strafella, A.P., Worsley, K.J., Doyon, J. (2006): Functional role of the basal ganglia in the planning and execution of actions. *Ann Neurol* 59: 257-264.
99. Moonen, C.T.W, Bandettini, P.A. (eds.): Functional MRI. Berlin 2000.
100. Moringlane, J.R. (2000): Chronische Elektrostimulation zur Behandlung des Intentionstremors und der Ataxie der multiplen Sklerose. *Nervenheilkunde* 19: 330-334.
101. Moringlane, J.R., Pützer, M., Barry, W.J. (2004a): Bilateral high-frequency electrical impulses to the thalamus reduce voice tremor: acoustic and electroglottographic analysis. A case report. *Eur Arch ORL* 261: 334-336.
102. Moringlane, J.R., Spiegel, J., Fuß, G., Dillmann, U., Pützer, M., Sittinger, H. (2004b): Improvement of upper limb ataxia and intention tremor allowing cessation of thalamic electrostimulation after four years. *Multiple Sclerosis* 10: 708-710.
103. Müller, H.M., Rickheit, Gert (Hrsg.): Neurokognition der Sprache. Tübingen 2003.
104. Murdoch, B.-E. (2001): Subcortical Brain Mechanisms in Speech and Language. *Folia Phoniatr Logop* 53: 233-251.
105. Murdoch, B.-E. (2004): Subcortical brain mechanisms in speech motor control. In: B. Maasen, R.D. Kent, H.F.M. Peters, P.H.H.M. van

- Lieshout, W. Hulstijn (eds.): Speech motor control in normal and disordered speech. Oxford 2004.
106. Murphy, K., Corfield D.R., Guz, A., Fink, G.W., Wise, R.J., Harrison, J., Adams, L. (1997): Cerebral areas associated with motor control of speech in humans. *J Appl Physiol* 83: 1438-1447.
 107. Nadeau, S.E., Crosson, B. (1997): Subcortical aphasia. *Brain Lang* 58: 355-402.
 108. Nguyen, J.P., Degos, J.D. (1993): Thalamic stimulation and proximal tremor. A specific target in the nucleus ventrointermedius thalami. *Arch Neurol* 50: 498-500.
 109. Nieuwenhuys, R., Vooq, J., v. Huijzen, Ch.: *Das Zentralnervensystem des Menschen*. Berlin 1991.
 110. Ogawa, S., Menon, R.S., Tank, D.W., Kim, S.G., Merkle, H., Ellermann, J.M., Ugurbil, K. (1993): Funktional brain mapping by blood oxygenation level-dependent contrast magnetic resonance imaging. A comparison of signal characteristics with a biophysical model. *Biophys J* 64: 803-812.
 111. Orrison, W.W.: *Atlas of Brain Function*. Stuttgart 1998.
 112. Olthoff, A., Baudewig, J., Dechent, P., Kruse E. (2005): Funktionelle Magnetresonanztomographie bei Stimmgebung. 22. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie; 24. Kongress der Union Europäischer Phoniater, 16. bis 18.09. 2005, Berlin: <http://www.egms.de/en/meetings/dgpp2005-/05dgpp051.shtml>.
 113. Palmer, E.D., Rosen, H.J., Ojemann, J.G., Buckner, R.L., Kelley, W.M., Petersen, S.E. (2001): An Event-Related fMRI Study of Overt and Covert Word Stem Completion. *Neuroimage* 14: 182-193.
 114. Pechmann, T.: *Sprachproduktion. Zur Generierung komplexer Nominalphrasen*. Opladen 1994.
 115. Penny, W.D., Holmes, A.J. (2003): *Random-Effects Analysis*. PDF-File unter <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/~wpenny/publications/Ch12.pdf>.
 116. Perkell, J.S. (1980): Phonetic features and the physiology of speech production. In: B. Butterworth (ed.): *Language Production*. Vol. 1. Speech and talk. London 1980.
 117. Perkell, J.S.: *Physiology of speech production: Results and implications of a quantitative cineradiographic study*. Cambridge 1969.

118. Petersen, S.E., Fiez, J.A. (1993): The processing of single words studied with positron emission tomography. *Ann Rev Neuroscience* 16: 509-530.
119. Phillips, M.D., Baker, K.B., Lowe, M.J., Tkach, J.A., Cooper, S.E., Koppell, B.H., Rezaei, A.R. (2006): Parkinson Disease: Pattern of Functional MR Imaging Activation during Deep Brain Stimulation of Subthalamic Nucleus - Initial Experience. *Radiology* 239: 209-216.
120. Pinto, S., Ozsancak, C., Tripoliti, E., Thobios, S., Limousin-Dowsey, P., Auzou, P. (2004): Treatments for dysarthria in Parkinson's disease. *Lancet Neuro* 9: 547-556.
121. Posner, M.I., Raichle, M.E.: *Bilder des Geistes: Hirnforscher auf den Spuren des Denkens*. Heidelberg 1996.
122. Pospeschill, M. (2006a): *SPSS –Durchführung fortgeschrittener statistischer Verfahren*. Hannover: RRZN.
123. Pospeschill, M. (2006b): *Statistische Methoden. Strukturen, Grundlagen, Anwendungen in Psychologie und Sozialwissenschaften*. Heidelberg.
124. Price, C., Indefrey, P., van Turenout, M. (2000): The neural architecture underlying the processing of written and spoken word forms. In: C.M. Brown, P. Hagoort (eds.): *The neurocognition of language*. Oxford 2000.
125. Probst, R., Grevers, G., Iro, H.: *Hals-Nasen-Ohrenheilkunde*. 1. Auflage. Stuttgart New York 2000.
126. Pützer, M. (2007): Instrumental Dimensioning of normal and pathological phonation using electroglottographic measurements. Submitted to *Folia Phoniater Logop*.
127. Pützer, M. (2001): Multiparametrische Stimmqualitätserfassung männlicher und weiblicher Normalstimmen. *Folia Phoniater Logop* 53: 73-84.
128. Pützer, M.: *Stimmqualität und Artikulation bei Dysarthrophonien in der individuellen, tendenziellen und referentiellen Bewertung. Ein instrumenteller Beitrag zu Phonations- und Artikulationsvariationen*. Habilitationsschrift. Institut für Phonetik. Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2005.
129. Pützer, M., Barry, W.J. (2007): Instrumental dimensioning of normal and pathological phonation using acoustic measurements. Submitted to *Clinical Linguistics and Phonetics*.
130. Pützer, M., Barry, W.J., Fuß, G., Moringlane J. R. (2003a): Instrumentalphonetische Untersuchung zu Auswirkungen der Elektrostimulation subkortikaler Hirnstrukturen auf die glottal-supraglottale Artikulation bei

- Patienten mit M. Parkinson und Multipler Sklerose. *Sprache Stimme Gehör* 27:161-170.
131. Pützer, M., Barry, W.J., Moringlane, J.R., Fuß, G. Spiegel, J., Dillmann, U., Sittinger, H. (2003b): Auswirkungen der Elektrostimulation subkortikaler Hirnstrukturen auf das glottale Schwingungsverhalten bei Patienten mit M. Parkinson und multipler Sklerose. *Folia Phoniatr Logop* 55: 220-232.
 132. Pützer, M.; Barry, W.J., Moringlane; J.R. (2006): Effect of deep brain stimulation on different speech subsystems in patients with multiple sclerosis. *J Voice*, 2006 Jul 24; [Epub ahead of print].
 133. Pützer, M., Barry, W.J., Moringlane; J.R. (2007): Effect of bilateral stimulation of the subthalamic nucleus on different speech subsystems in patients with Parkinson's disease. Submitted to *J Speech Lang Hear Res*.
 134. Pützer, M., Erriquez, A., Barry, W.J., Just, M. (2001): Differenzierte Stimmprofile zur männlichen und weiblichen Normalstimme. In: M. Gross, E. Kruse (Hrsg.): *Aktuelle phoniatisch-pädaudiologische Aspekte 2000/2001*, Band 8. Heidelberg 2001.
 135. Pützer, M., Marasek, K. (2000): Differenzierung gesunder Stimmqualitäten und Stimmqualitäten bei Rekurrensparese mit Hilfe elektroglottographischer Messungen und RBH-System. *Sprache Stimme Gehör* 24: 154-163.
 136. Pützer, M., Wokurek, W. (2006): Multiparametrische Stimmprofilendifferenzierung zu männlichen und weiblichen Normalstimmen auf der Grundlage akustischer Analysen. *Laryngol Rhino Otol*. 85: 105-112.
 137. Raichle, M.E. (1987): Circulatory and metabolic correlates of brain function in normal humans. In: S.R. Geiger (ed.): *Handbook of physiology: the nervous system*. Vol. 1. New York 1987.
 138. Raichle, M.E. (1998): Interview mit Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B., Mangun, G.R. In: M.S. Gazzaniga, R.B. Ivry, G.R. Mangun: *Cognitive neuroscience: the biology of the mind*. New York 1998.

139. Rezai, A.R., Finelli, D., Nyenhuis, J.A., Hrdlicka, G., Tkach, J., Sharan, A., Rugieri, P., Stypulkowski, P.H., Shellock, F.G. (2002): Neurostimulation systems for deep brain stimulation: in vitro evaluation of magnetic resonance imaging-related heating at 1.5 tesla. *J Magn Reson Imaging* 15: 241-250.
140. Rezai, A.R., Lozano, A.M., Crawley, A.P., Joy, M.L., Davis, K.D., Kwan, C.L., Dostrovsky, J.O., Tasker, R.R., Mikulis, D.J. (1999): Thalamic stimulation and functional magnetic resonance imaging: localization of cortical and subcortical activation with implanted electrodes. Technical note. *J Neurosurg* 90: 583-590.
141. Rezai, A.R., Phillips, M., Baker, K.B., Sharan, A.D., Nyenhuis, J., Tkach, J., Henderson, J., Shellock, F.G. (2004): Neurostimulation system used for deep brain stimulation (DBS): MR safety issues and implication of failing to follow safety recommendations. *Invest Radiol* 39: 300-303.
142. Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber D., Dogil, G., Grodd, W. (2000): Opposite hemispheric lateralization effects during speaking and singing at motor cortex, insula and cerebellum. *Neuroreport* 11: 1997-2000.
143. Riecker, A., Kassubek, J., Gröschel, K., Grodd, W., Ackermann, H. (2006): The cerebral control of speech tempo: Opposite relationship between speaking rate and BOLD signal changes at striatal and cerebellar structures. *Neuroimage* 29: 46-53.
144. Riecker, A., Mathiak, K., Wildgruber, D., Erb, M., Hertrich, I., Grodd, W., Ackermann, H. (2005): fMRI reveals to distinct cerebral networks subserving speech motor control. *Neurology* 64: 700-706.
145. Rohen, J.W.: Funktionelle Neuroanatomie. Lehrbuch und Atlas. Miesbach 2001.
146. Roland, P.E., Zilles, K. (1996): Functions and structures of the motor cortices in humans. *Curr Opin Neurobiol* 6: 773-781.
147. Rosen, B.R., Savoy, R.L. (1998): Brain mapping course: fMRI basics. Fourth International Conference on Functional Mapping of Human Brain, Montreal 1998. *Proceedings of the Brain Mapping Course*: 22-48.
148. Rugg, M.D. (1999): Functional Neuroimaging in cognitive neuroscience. In: C.M. Brown, P. Hagoort (eds.): *The neurocognition of Language*. Oxford 1999.
149. Rugg, M.D., Coles, M.G.H. (eds.): *Electrophysiology of mind. Event-related brain potentials and cognition*. Oxford 1995.

150. Sanes, J.N., Donoghue, J.P., Thangaraj, V., Edelman, R.R., Warach, S. (1995): Shared neural substrates controlling hand movements in human motor cortex. *Science* 268: 1775-1777.
151. Schmidt, R.F., Wiesendanger, M. (1987): Motorisches System. In: R.F. Schmidt, G. Thews (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Berlin 1987.
152. Schultz-Coulon, H.-J., Klingholz, F. (1988): Objektive und semiobjektive Untersuchungsmethoden der Stimme. In: G. Kittel, B. Schürenberg (Hrsg.): *Objektive und semiobjektive Untersuchungsmöglichkeiten von Stimme, Sprache und Gehör*. Köln 1988.
153. Schwartz, M.F., Saffran, E.M., Marin, O.S.M. (1980): The word order problem in agrammatism. I. Comprehension. *Brain Lang* 10: 249-262.
154. Shuster, L.I., Lemieux, S.K. (2005): An fMRI investigation of covertly and overtly produced mono- and multisyllabic words. *Brain Lang* 93: 20-31.
155. Soros, P., Sokoloff, L.G., Bose, A., McIntosh, A.R., Graham, S.J., Stuss, D.T. (2006): Clustered functional MRI of overt speech production. *Neuroimage* 32:376-387.
156. Stemberger, J.P. (1985): An interactive activation model of language production. In: A.W. Ellis (ed.): *Progress in the psychology of language*. London 1985.
157. Talairach, J., Tournoux, P.: *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Stuttgart 1988.
158. Talairach, J., Tournoux, P.: *Referentially Oriented Cerebral MRI Anatomy*. Stuttgart New York 1993.
159. Thompson, R.F.: *Das Gehirn: von der Nervenzelle zur Verhaltenssteuerung*. Heidelberg 2001.
160. Toga, A.W., Mazziotta, J.C.: *Brain mapping: The systems*. San Diego 2000.
161. Turner, R., Le Bihan, D., Moonen, C.T., Despres, D., Frank, J. (1991): Echo-planar time course MRI of cat brain oxygenation changes. *Magn Reson Med* 22: 159-166.
162. Vogt, O., Vogt, C. (1925): *Allgemeine Ergebnisse unserer Hirnforschung*. *J. Psych.* 25: Erg. H. 1.
163. Volkmann, J., Kupsch, A. (2004): Mechanismen der tiefen Hirnstimulation. In: J.K. Krauss, J. Volkmann (Hrsg.): *Tiefe Hirnstimulation*. Darmstadt 2004.

164. Watson, P., Montgomery, E.B. Jr. (2006): The relationship of neural activity within the sensori-motor region of the subthalamic nucleus to speech. *Brain Lang* Jan 27 (Epub ahead of print).
165. Wallesch, C.-W., Papagno, C. (1988): Subcortical aphasia. In: F.C. Rose, R. Whurr, M.A. Wyke (eds.): *Aphasia*. London 1988.
166. Weiller, C., Willmes, K., Reiche, W., Thron, A., Isensee, C., Buell, U., Ringelstein, E.B. (1993): The case of aphasia or neglect after striatocapsular infraction. *Brain* 116: 1509-1525.
167. Wheeldon, L. (ed.): *Aspects of language production*. Sussex 2000.
168. Whelan, B.-M., Murdoch, B.-E., Theodoros, D.G., Darnell, R., Silburn, P., Hall, B. (2004): Redefining functional models of basal ganglia organization: Role for the posteroventral pallidum in linguistic processing? *Mov Disord* 19: 1267-1278.
169. Whittle, I.R., Hooper, J., Pentland, B. (1998): Thalamic deep brain stimulation for movement disorders due to multiple sclerosis. *The Lancet* 351: 109-110.
170. Wise, R.J.S., Greene, J., Büchel, C., Scott, S.K. (1999): Brain regions involved in articulation. *Lancet* 353: 1057-1061.
171. Wildgruber, D., Ackermann, H., Grodd, W. (1998a): Cerebellar contribution to speech production evaluated by fMRI. *Neuroimage* 7. Proceedings of the 4th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain. Montreal, June 7-12 1998: 144.
172. Wildgruber, D., Ackermann, H., Grodd, W. (2001): Differential Contributions of Motor Cortex, Basal Ganglia, and Cerebellum to Speech Motor Control: Effects of Syllable Repetition Rate Evaluated by FMRI. *Neuroimage* 13: 101-109.
173. Wildgruber, D., Ackermann, H., Klose, U., Grodd, W. (1998b): Dynamic brain activation during reversal of automated word order. *Neuroimage* 7 Proceedings of the 4th International Conference of Functional Mapping of the Human Brain. Montreal, June 7-12 1998: 2791-2795.
174. Wildgruber, D., Ackermann, H., Klose, U., Kardatzki, B., Grodd, W. (1996): Functional lateralisation of speech production at primary motor cortex. An fMRI Study. *Neuroreport* 7: 2791-2795.
175. Ziegler, W. (1997): Die Rolle der Stammganglien in der Sprachproduktion. *Neurolinguistik* 12: 133-166.

176. Ziegler, W. (2005): Funktionelle Neuroanatomie des Sprechens und des Sprachverstehens. In: J. Wendler, W. Seidner, U. Eyshold (Hrsg.): Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie. 4. Auflage. Stuttgart New York 2005.
177. Ziegler, W. (2002): Task-related factors in oral motor control: Speech and oral diadochokinesis in dysarthria and apraxia of speech. *Brain Lang* 80: 556-575.
178. Ziegler, W., Vogel, M., Gröne, B., Schröter-Morasch, H.: *Dysarthrie. Grundlagen — Diagnostik — Therapie*. Stuttgart New York 2002.
179. Zonenshayn, M., Mogilner, A.Y., Rezai, A.R. (2000): Neurostimulation and functional brain imaging. *Neurol Res* 22: 318-325.

Lebenslauf

Name: PÜTZER
 Vorname: Manfred
 Geburtsdatum: 05. Oktober 1952
 Familienstand: Verheiratet, zwei Kinder

Schulausbildung: 1959 – 1967:
 Kath. Volksschule Großrosseln
 Volksschulabschluss
 1967 – 1973:
 Staatl. Aufbaugymnasium Lebach
 Abitur

Erststudium: 1975 – 1981:
 Universität des Saarlandes
 Germanistik, Geschichte, Romanistik
 1. Staatsexamen LA Gymnasium

Zweitstudium: 1983 – 1987:
 Universität des Saarlandes
 Phonetik und Phonologie
 Promotion zum Dr. phil.

Berufsausbildung: 1981 – 1983:
 Studienseminar Dillingen
 2. Staatsexamen LA Gymnasium
 Studienassessor

Wissenschaftlicher Werdegang: 1983 – 1987:
 Strukturell orientierte auditiv-phonetische Ausbildung bei Prof. Mangold

1992 – 2005:
 Instrumental-und experimentalphonetische Orientierung und Ausbildung bei Prof. Barry

1994 – 2004:
 Klinische Ausbildung in Phoniatrie bei Chefarzt Dr. Just; Sektion Phonia-

trie / Pädaudiologie, Caritasklinik St. Theresia, Saarbrücken
Zusammenarbeit mit der Sektion Phoniatrie / Pädaudiologie

2005:
Habilitation: Venia legendi für
Phonetik und Phonologie

2001 – heute:
Zusammenarbeit mit den Kliniken für
Neurochirurgie und Neurologie der
Universität des Saarlandes

2004 – heute:
Zusammenarbeit mit der Klinik für
Diagnostische und Interventionelle
Neuroradiologie der Kliniken für Ra-
diologie der Universität des Saarlan-
des

1987 – 2005:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am In-
stitut für Phonetik der Universität des
Saarlandes

2005 – heute:
Priv.-Doz. am Institut für Phonetik
der Universität des Saarlandes