

Aus dem Institut für Neurologie  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Neuronale Korrelate phonotaktischer Verarbeitung

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Ina Barbara Jürgenson

aus Berlin

Gutachter: 1. Hellmuth Obrig  
2. Isabell Wartenburger  
3. Matthias Schröter

**Datum der Promotion: 20.11.2009**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
1.1	PHONOTAKTIK	4
1.1.1	Definition von Phonotaktik	4
1.1.2	Vergleich von phonotaktischen Regeln des Deutschen und des Slowakischen	5
1.1.3	Elektrophysiologische Korrelate phonotaktischer Verarbeitung	7
1.1.4	Untersuchung phonotaktischer Verarbeitung in bildgebenden Studien	11
1.2	SPRACHERWERB	12
1.2.1	Spracherwerb phonologischer Eigenschaften	12
1.2.2	Spracherwerb phonotaktischer Eigenschaften	15
1.2.3	Spracherwerb lexikalisch-semantischer Eigenschaften	16
1.3	SPRACHVERARBEITENDE HIRNAREALE	17
1.3.1	Klassische Sprachzentren	17
1.3.2	Neuere Ansätze zur Sprachverarbeitung	18
1.3.3	Lateralisation der Sprachverarbeitung	19
1.4	DIE KINDER-GERICHTETE SPRACHE (INFANT DIRECTED SPEECH)	21
<b>2</b>	<b>ZENTRALE FRAGESTELLUNGEN UND ZIELE DER STUDIE</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL UND METHODIK</b>	<b>25</b>
3.1	STUDIEN TEILNEHMER	25
3.2	MATERIAL	25
3.3	DURCHFÜHRUNG	29
3.4	METHODIK DER ELEKTROENZEPHALOGRAPHIE	29
3.5	DURCHFÜHRUNG DES EEG	30
3.6	DATENANALYSE DES EEG	31
3.7	METHODIK DER NAHINFRAROTSPEKTROSKOPIE (NIRS)	33
3.8	DURCHFÜHRUNG NAHINFRAROTSPEKTROSKOPIE	36
3.9	DATENANALYSE NAHINFRAROTSPEKTROSKOPIE	37
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>39</b>
4.1	ERP DATEN	39
4.2	NIRS DATEN	48
<b>5</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>53</b>
5.1	INTERPRETATION DER ERP-DATEN	53
5.1.1	Korrelate der phonotaktischen Verarbeitung	53
5.1.2	Die Verarbeitung von Infant directed speech und Adult directed speech	56
5.2	INTERPRETATION DER NIRS DATEN	57
5.2.1	Korrelate der phonotaktischen Verarbeitung	57
5.2.2	Die Verarbeitung von Infant directed speech und Adult directed speech	60
5.3	KRITIK AM VERSUCHSDESIGN	61
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>72</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>74</b>
	<b>ERKLÄRUNG</b>	<b>75</b>

# 1 Einleitung

Spracherwerb und Sprachverarbeitung sind Prozesse, die aus zahlreichen Einzelschritten bestehen und im menschlichen Gehirn komplex verarbeitet werden. Diese Einzelschritte der sprachlichen Verarbeitung umfassen Phonologie, Syntax, Morphosyntax, Semantik und Pragmatik. Die Phonologie beschäftigt sich als Teil der Lautlehre mit den verschiedenen Systemen von Phonemen als kleinste Elemente einer Sprache die ihre Bedeutung differenzieren. Demgegenüber umfasst die Morphosyntax als Teil der Grammatik die Formenlehre (Morphologie) und die Satzlehre (Syntax). Erst durch die syntaktischen Regeln wird es möglich, einzelne Wörter einer Sprache zu größeren, zusammenhängenden Phrasen bzw. Sätzen anzuordnen. Weitere linguistische Disziplinen stellen die Pragmatik und die Semantik dar. Während die Pragmatik untersucht, wie Sprache verwendet wird und welcher Sprachhandlungen sich ein Sprecher bedient, bezieht sich die lexikalische Semantik auf die Frage der kontextunabhängigen Bedeutung von Wörtern. Die Satzsemantik weitet schließlich die Untersuchung von einzelnen Wörtern auf die Ebene von Phrasen und Sätzen aus, in denen Wörter durch semantische Verknüpfungsregeln zusammengefügt sind.

Die Art wie der Sprecher und der Rezipient diese verschiedenen Prozesse verarbeiten ist trotz vieler Studien und Forschungen nicht vollständig erklärt. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, einen ganz spezifischen Aspekt der Sprache, die Phonotaktik, mit neurophysiologischen Verfahren genauer zu untersuchen. Die Phonotaktik ist ein spezieller Bereich der Phonologie und beschreibt die Regeln der Lautkombinationen, insbesondere der Konsonanten, einzelner Phoneme in einer bestimmten Sprache. Die Phonotaktik spielt bei der Sprachverarbeitung eine wichtige Rolle. Die zu Grunde liegenden Mechanismen der neuronalen Integration sind jedoch noch wenig erforscht. Dies bezieht sich insbesondere auf die Frage welche neuronalen Strukturen bei der Wahrnehmung und Verarbeitung phonotaktischer Eigenschaften beteiligt sind.

## 1.1 *Phonotaktik*

### 1.1.1 **Definition von Phonotaktik**

Die Phonotaktik ist als Lehre der Regeln einer spezifischen Sprache in Bezug auf die Kombination von Lauten ein Teilgebiet der Phonologie. Durch phonotaktische Regeln werden

die syntagmatischen Möglichkeiten einzelne Phoneme zu Silben und Wörtern zu konstruieren bestimmt. Jede Silbe hat durch phonotaktische Regeln einer bestimmten Sprache folgende Struktur:

- 1 Nukleus (Silbenkern)
- 2 Silbenkopf (Onset)
- 3 Silbencoda (Offset)

Während der Nukleus stets vorhanden ist, können Silbenkopf und -coda unbesetzt bleiben. Das deutsche einsilbige Wort „Reh“ besteht beispielsweise lediglich aus einem Silbenkopf und dem Nukleus. Solche Silben, die auf einem Vokal enden, werden als offene Silben bezeichnet. Silben, die jedoch auf mindestens einen Konsonanten auslauten, heißen geschlossene Silben (Ramers 1998). Phonotaktische Regeln unterscheiden sich je nach Sprache, so dass z.B. die Konsonantenkombination „br“ am Anfang eines Wortes im Deutschen erlaubt ist (wie z.B. in „Brot“), allerdings die Kombination „bz“ am Wortanfang (wie in „bzak“) im Deutschen nicht vorkommt, da diese Kombination die Distributionsbeschränkungen innerhalb des deutschen Phoneminventars verletzen würde. Die Silbe „bzak“ ist folglich ein Beispiel für eine „systematische Lücke“ innerhalb der deutschen phonotaktischen Regeln. Von einer „zufälligen Lücke“ dagegen spricht man, wenn Silbenabfolgen z.B. mit „br“ im Onset nicht als reales deutsches Wort existieren, jedoch den phonotaktischen Regeln des Deutschen prinzipiell folgen (z.B. „brak“). Diese phonotaktisch zwar legalen, aber nicht im Wortschatz einer Sprache existierenden Wörter werden auch als legale Pseudowörter bezeichnet.

Die Phonotaktik spielt in der Sprachverarbeitung sowohl für die Phonologie als auch für die lexikalische Aktivierung einzelner Wörter eine wichtige Rolle (Mehlhorn 2006).

### **1.1.2 Vergleich von phonotaktischen Regeln des Deutschen und des Slowakischen**

In der vorliegenden Studie wurden Pseudowörter erstellt, die entweder dem Deutschen entsprechen oder aber den phonotaktischen Regeln einer anderen Sprache, nämlich dem Slowakischen, folgen.

Beim Deutschen handelt es sich um eine Sprache des westlichen Zweiges des Germanischen und damit um eine indogermanische Sprache. Das Deutsche umfasst ein Lautsystem aus 15 Vokalen, drei Diphthongen und 20 Konsonanten. Das deutsche Vokalsystem ist mit seinen 15 Monophthongen im Vergleich zu anderen Sprachen relativ groß und schließt die acht Vokalbuchstaben: a, e, i, o, u, ä, ö, ü mit ein. Man unterscheidet weiterhin geschlossene von

## Einleitung

offenen Vokalen, die sich in ihrer Lage und Qualität unterscheiden. Bei dem deutschen Wort „Kamm“ handelt es sich beispielsweise um einen offenen Vokal „a“. Im Gegensatz dazu verfügt das deutsche Wort „Rahm“ über einen geschlossenen Vokal. Zusätzlich zu diesen Monophthongen gibt es im Deutschen noch die drei Diphthonge au, eu, ei.

Das deutsche Konsonantensystem beinhaltet 20 Konsonanten (b, ch, d, f, g, h, j, k, l, m, n, p, pf, r, s, sch, t, ts=z, tsch, z), die den phonotaktischen Regeln des Deutschen entsprechend zu verschiedenen Konsonantenclustern kombiniert werden können. Am Anfang einer deutschen Silbe können null bis drei Konsonanten stehen. In Tabelle 1 wird die Zulässigkeit von zweigliedrigen Anlautverbindungen im Deutschen dargestellt.

	<b>r</b>	<b>l</b>	<b>m</b>	<b>n</b>	<b>v</b>	<b>p</b>	<b>t</b>	<b>k</b>	<b>s</b>
<b>p</b>	+	+	-	-	-	-	-	-	(+)
<b>b</b>	+	+	-	-	-	-	-	-	-
<b>t</b>	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>d</b>	+	+	-	-	-	-	-	-	-
<b>k</b>	+	+	-	+	+	-	-	-	-
<b>g</b>	+	+	(+)	+	-	-	-	-	-
<b>pf</b>	(+)	+	-	-	-	-	-	-	-
<b>ts(z)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>f</b>	+	+	-	-	-	-	-	-	-
<b>v</b>	(+)	(+)	-	-	-	-	-	-	-
<b>s</b>	-	(+)	(+)	-	-	-	-	+	-
<b>](sch)</b>	+	+	+	+	+	+	+	-	-

**Tabelle 1:** Zweigliedrige erlaubte und nicht zulässige Konsonantencluster (Deutsch).

Das Zeichen + steht für erlaubte Kombinationen, während – für eine unerlaubte Kombination im Deutschen steht. (+) zeigt Kombinationen an, die im Deutschen selten vorkommen und einen fremdsprachlichen Hintergrund haben (z.B. die Kombination von „p“ und „s“ im deutschen Wort „Psychologie“ hat eine altgriechische Herkunft).

Das Slowakische gehört zu den westslawischen Sprachen und ist eng verwandt mit dem Tschechischen. Das slowakische Lautsystem verfügt über sieben Vokale (á, é, í, ó, ú, ý, ä) und ein Diphthong (ô; spricht: ou). Die slowakischen Onset-Cluster der Konsonanten sind bei weitem vielfältiger als die deutschen und beinhalten ca. 95 verschiedene, zweigliedrige Konsonantencluster. In der slowakischen Phonetik werden die Konsonanten „d, n, l und t“ in einigen Wörtern weich ausgesprochen, d.h. mit einem Anklang an ein „j“ hinter dem Konsonanten artikuliert. Dies wird als Palatisierung bezeichnet und bezeichnet die Artikulation von Konsonanten mit zum harten Gaumen gehobener Zunge. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die slowakischen Konsonantencluster.

	r	l	m	n	v	p	t	k	s	nj	dj	tj	x	b	d	z	f	g	lj
p	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
t	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
d	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
k	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
g	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
pf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ts(z)	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
f	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-
v	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-
s	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-
ʃ	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
m	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+
r	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
l	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-

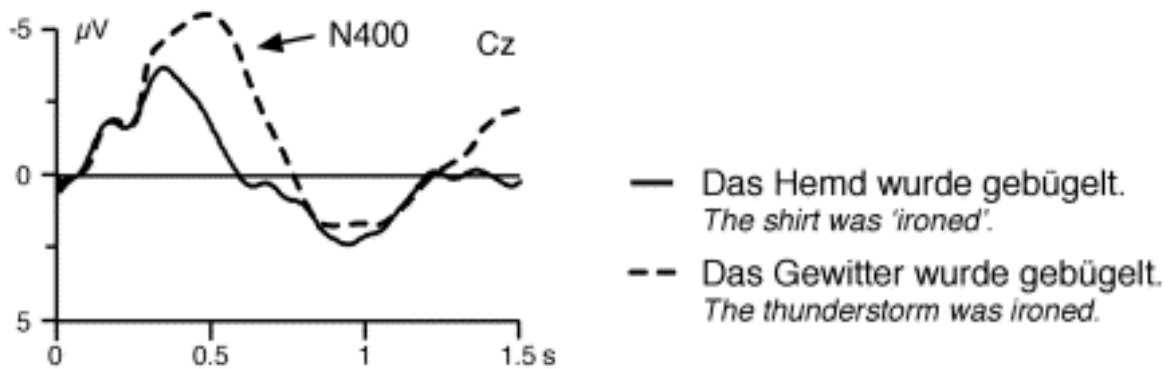
**Tabelle 2:** Zweigliedrige erlaubte und nicht zulässige Konsonantencluster (Slowakisch). Das Zeichen + steht für erlaubte Kombinationen, während – für eine unerlaubte Kombination im Slowakischen steht. Die Konsonantenkombinationen nj, dj, tj und lj werden als ein Konsonant aufgeführt, da sie palatisiert ausgesprochen werden.

### 1.1.3 Elektrophysiologische Korrelate phonotaktischer Verarbeitung

#### 1.1.3.1 Die N400 Komponente

Die N400 Komponente ist ein ereigniskorreliertes Potential (EKP), welches eine negative Polarität um 400 ms nach dem Beginn (Onset) eines Stimulus aufweist. Erstmals beobachtet wurde die N400 von Kutas und Hillyard 1980 im Zusammenhang mit semantisch unpassenden Wörtern im Satzzusammenhang. In einer ERP-Studie von Friederici, Pfeifer und Hahne wurden folgende Sätze mit bzw. ohne semantische Verletzung verwendet. Das Wort *gebügelt* rief im Satz *Das Gewitter wurde gebügelt* eine negativere N400 hervor als im Satz *Das Hemd wurde gebügelt*.

## Einleitung



**Abbildung 1:** Darstellung einer gemittelten, zentroparietalen N400 Antwort nach Exposition mit einer semantischen Verletzung (aus Friederici, Pfeifer, Hahne 1993).

Die Amplitude der N400 ist sensitiv auf die semantische Passung und die semantische Erwartung eines Wortes im Satzzusammenhang, aber auch auf Einzelwortebene, z.B. im Zusammenhang mit einem dargebotenen Bild. Je schlechter die Passung bzw. je unerwarteter ein Wort, desto größer ist die Amplitude der N400. Die N400 erscheint in semantischen Integrationsprozessen eines Stimulus in einem Kontext (Holcomb 1993), aber auch eines Wortes in einem Satzzusammenhang (Friederici et al 1993). Dass die N400 eine supramodale semantische Integration signalisiert, zeigt die Tatsache, dass auch die Integration eines Bildes in eine Bildergeschichte eine N400 Komponente im EEG hervorruft (West und Holcomb 2002). Jeder unerwartete Stimulus löst dabei eine größere Amplitude der N400 hervor als ein im Zusammenhang erwarteter Stimulus (Kutas et al 1987; McCarthy und Nobre 1993). Beispielsweise riefen semantisch verwandte Wörter (z.B. *Zucker*) oder assoziativ verwandte Wörter (z.B. *Biene*) in einer Wortliste folgend auf das Wort *Honig* eine in der Amplitude reduzierte N400 hervor, wenn man sie mit der N400 auf ein unerwartetes Wort (z.B. *Hochhaus*) vergleicht (Bentin et al 1995). Gibt die Größe der N400 eine Aussage über die Passung des Wortes, so ist die Möglichkeit der semantischen Integration eines auditiven Stimulus Voraussetzung um überhaupt eine N400 zu evozieren. Dies ist wichtig für das Verständnis der neuronalen Verarbeitung phonotaktischer Reize. Bei Erwachsenen führt die Präsentation von legalen Pseudowörtern (Wörter, die den phonetischen, prosodischen und phonotaktischen Regeln einer bestimmten Sprache gehorchen) zu einer N400 Antwort, während diese bei illegalen Pseudowörtern (Wörter, die den phonetischen, prosodischen, phonotaktischen Regeln einer bestimmten Sprache nicht gehorchen) ausbleibt. Dies legt nahe, dass illegale Pseudowörter nicht als potentielle Kandidaten für eine semantische Integration fungieren (Bentin et al 1999). Friedrich und Friederici (2005) führten eine EEG- Studie zur Untersuchung der phonotaktischen Regulierungsfähigkeiten bei 12- und 19 Monate alten



## Einleitung

Kindern sowie bei Erwachsenen durch. Dabei untersuchten sie drei Aspekte der phonotaktischen und semantischen Verarbeitung. Während sich die deutschsprachigen Probanden Bilder von bekannten Objekten anschauten, hörten sie Pseudowörter, die entweder einen fürs Deutsche phonotaktisch legalen Onset oder einen illegalen Onset aufwiesen. Alternativ hörten sie zum Kontext des präsentierten Bildes passende reale Wörter, nicht passende reale Wörter oder Pseudowörter. 19 Monate alte Kinder und Erwachsene reagierten neuronal auf unpassende Wörter im Bildkontext und legale Pseudowörter mit einer N400 Antwort im EEG. Für illegale Pseudowörter blieb dieser Effekt aus. Für im Bildkontext passende Wörter zeigte sich eine abgeschwächte N400 bedingt durch semantische und phonotaktische Integrationsprozesse. Der lang anhaltende negative Effekt bei der semantischen Integration (passende vs. unpassende reelle Wörter) bei Erwachsenen entspricht klar einer N400 Antwort und ist am stärksten über zentroparietalen Hirnarealen. Der Effekt beginnt bereits bei 250 ms. Die N400 Antwort auf legale und illegale Pseudowörter war verglichen mit dem N400 Unterschied nach Präsentation von legalen Pseudowörtern und realen, passenden Wörtern leicht verspätet. Im Gegensatz dazu konnte gezeigt werden, dass 12 Monate alte Kinder keine N400 Unterschiede zwischen legalen und illegalen Pseudowörtern sowie zwischen passenden und unpassenden realen Wörtern vorweisen. Dies legt nahe, dass semantische Verarbeitungsprozesse sowie das Wortverständnis bei Kindern dieser Alterklasse noch nicht vollständig ausgereift sind. Alle drei Altersgruppen zeigten allerdings eine frühe frontale Negativierung beginnend bei 100 ms nach dem Onset von realen, passenden Wörtern, die als lexikalische Verarbeitungskomponente betrachtet werden kann.

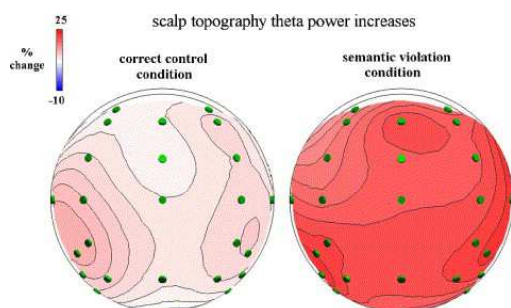
Kurz zusammengefasst stellt die N400 einen elektrophysiologischen Marker sowohl für semantische als auch für phonotaktische Integration dar.

### **1.1.3.2 Das Theta- und Gammaband**

Neben der Auswertung ereigniskorrelierter Potentiale stellen Frequenzbandanalysen eine alternative Auswertungsmethode des EEGs dar, die für die Beurteilung von neuronalen Vorgängen im Sprachverarbeitungsprozess genutzt werden können. Frequenzbandanalysen zur Untersuchung des visuellen Systems sowohl im Alpha- (8-12 Hz) aber auch im hochfrequenten Gamma-Band (30-90 Hz) sind gut etabliert (Singer 1993, Pfurtscheller 2003, Hoogenboom 2006). Allerdings gibt es auch in der Sprachforschung erste Arbeiten zu

## Einleitung

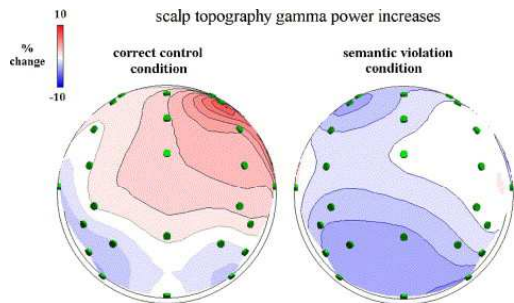
ereigniskorrelierten Veränderungen der Frequenzbänder, die durch die Synchronisation bzw. Desynchronisation von neuronalen Vorgängen entstehen. Singer (1993) postulierte, dass möglicherweise die Oszillationen neuronaler Aktivitäten mit ihren Synchronisations- und Desynchronisationsprozessen zu einem flüchtigen Netzwerk zwischen den verschiedenen Sprachverarbeitungsarealen führen. Die Analyse von Veränderungen der Amplitude oder der Phasenkohärenz von EEG-Oszillationen lässt Rückschlüsse über die Synchronisation oder Desynchronisation von neuronalen Netzwerken zu (Tallon-Baudry und Bertrand 1999). Bastiaansen et al untersuchten 2002 in zwei Studien, ob es zu ereigniskorrelierten Amplitudenveränderungen im Theta- (4-7 Hz), Alpha- (8-12 Hz) und im Beta- (>13-30 Hz) Frequenzband kommt, wenn korrekte Sätze und Sätze mit syntaktischen Fehlern präsentiert werden. Für das Theta-Frequenzband konnte eine Steigerung der Amplitude nach einer syntaktischen Verletzung über dem linken okzipitalen Kortex, bilateral über den temporalen Kortices und über dem frontozentralen Kortex festgestellt werden. Während die Theta-Steigerung über dem okzipitalen Kortex mit der Entschlüsselung der geschriebenen Sprache zusammenhängt, wurde eine temporale Theta-Steigerung während der lexikalisch-semanticen Verarbeitung beobachtet. In einer weiteren Studie untersuchten Hald et al. (2005) die Veränderungen der Theta- und Gamma-Antworten im EEG nach semantischen Verletzungen bei erwachsenen Probanden, die einen Text lasen. Es wurden korrekte Sätze (z.B. De Nederlandse treinen zijn *geel* en blauw ~ Die niederländischen Züge sind *gelb* und blau) und semantisch inkorrekte Wörter in einem Satz (z.B. De Nederlandse treinen zijn *zuur* en blauw ~ Die niederländischen Züge sind *sauer* und blau) dargeboten. Letztere zeigten eine klassische N400 als ERP-Komponente im EEG. Für das Theta-Frequenzband konnte eine stärkere Zunahme der Amplitude nach semantisch inkongruenten Wörtern im Vergleich zu semantisch kongruenten Wörtern festgestellt werden. Maximal waren die Theta-Steigerungen bilateral über beiden temporalen Arealen mit einem zusätzlichen Peak im mittleren frontalen Areal nur nach semantischen Fehlern.



**Abbildung 2:** Darstellung des Theta-Frequenzbandes. Topographie der Theta-Frequenzbandänderungen 300 bis 800 ms nach Darbietung semantisch korrekter Wörter im Satzzusammenhang (linker Teil der Graphik) und nach Darbietung von Sätzen, die eine semantische Verletzung aufwiesen (rechter Teil der Graphik). Es zeigt sich eine deutliche Theta-Steigerung um ca. 25% nach semantischer Verletzung (aus Hald et al. 2005)

## Einleitung

Im Gegensatz dazu nahm die Stärke der Gamma-Oszillationen (35-45 Hz) zwischen Onset und 600 ms nach dem Lesen von korrekten Sätzen um 10% zu. Die Gammabandaktivität tritt also bei gewöhnlichen, korrekten Sätzen auf, d.h. dass die Gamma-Aktivierung eine normale Satzverarbeitung widerspiegelt.



**Abbildung 3:** Darstellung des Gamma-Frequenzbandes. Topographie der Gamma-Frequenzbandänderungen 0 bis 600 ms nach Wort-Onset eines semantisch korrekten Wortes (linker Teil der Graphik) oder eines semantisch inkongruenten Wortes (rechter Teil der Graphik). Korrekte Semantik ruft eine um etwa 10% stärkere Gamma-Oszillation hervor (aus Hald et al. 2005).

Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass Aktivität in diesem Frequenzband nicht nur auf Satzebene, sondern auch auf Wortebene (Pulvermüller et al 1999) zum Tragen kommt. Diese Studie konnte sowohl für das Theta-Frequenzband als auch für das Gamma-Frequenzband eine Reaktion auf Sprachverarbeitung feststellen und machte deutlich, dass Änderungen der Stärke beider Frequenzbereiche eine Rolle bei der Verknüpfung von neuronalen Netzwerken der Sprachverarbeitung spielen.

### 1.1.4 Untersuchung phonotaktischer Verarbeitung in bildgebenden Studien

Die meisten bildgebenden Studien zur Untersuchung phonotaktischer Verarbeitung sind mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) durchgeführt worden. Das Verfahren der so genannten BOLD-Kontrastmessung (BOLD steht für „blood oxygenation level dependent“) beruht auf der Tatsache, dass in aktivierten Hirnarealen der regionale Blutfluss zunimmt. Da es zu einer überschießenden Blutflussantwort auf einen nur gering gesteigerten Sauerstoffverbrauch kommt, sinkt der Anteil des deoxygenierten Hämoglobins im aktivierten Areal. Dies führt zu einem Anstieg des messbaren BOLD-Kontrastes im MRT. Der große Vorteil vaskulär basierter bildgebender Techniken besteht in einer hohen räumlichen Auflösung und einer präzisen Darstellung der Anatomie der ‚aktivierten‘ Hirnareale. Eine weitere Methode ist die Positronen-Emissions-Tomographie (PET), welche ebenfalls über eine hohe räumliche Auflösung verfügt. Auch die in der vorliegenden Studie genutzte

Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) gehört zu den vaskulär basierten bildgebenden Verfahren, die die Zunahme der fokalen Oxygenierung im zerebralen Kortex erlaubt.

Zur Untersuchung phonotaktischer Verarbeitung wurden in der überwiegenden Anzahl der bisherigen Studien folgende Stimuli verglichen: (i) reale Wörter mit für eine bestimmte Sprache korrekten phonotaktischen Regeln, (ii) Pseudowörter mit korrektem phonotaktischem Aufbau jedoch ohne Bedeutung und (iii) Nichtwörter mit Verletzung der phonotaktischen und semantischen Regeln einer bestimmten Sprache. Die Ergebnisse der Studien sind nicht einheitlich. Einige Studien fanden keine Unterschiede in der Verarbeitung von realen Wörtern und Pseudowörtern (Binder et al 2000, Valdois et al 2006), während andere Studien mittels fMRT einen Unterschied in der Verarbeitung von phonotaktisch korrekten und inkorrekten Wörtern fanden (Hagoort et al 1999, Fiebach et al 2002, Kotz et al 2002, Xiao et al 2005, Raettig, Kotz 2007). Zum einen konnte nur eine Erhöhung der Aktivität für die Verarbeitung phonotaktisch korrekter realer Wörter gefunden werden (Fiebach et al 2002), während andere Studien eine erhöhte Aktivierung für reale Wörter sowie phonotaktisch korrekte Pseudowörter fanden, die sich jedoch an unterschiedlichen Hirnarealen manifestierte (Hagoort et al 1999, Kotz et al 2002, Xiao et al 2005). Eine Erhöhung der Hirnaktivität für reale Wörter konnte vor allem im linken unteren oder mittleren temporalen Arealen festgestellt werden (Hagoort et al 1999, Fiebach et al 2002, Kotz et al 2002, Xiao et al 2005). Weiterhin stellt sich eine erhöhte Aktivität durch Präsentation von realen Wörtern am temporo-parietalen Übergang heraus (Kotz et al 2002, Xiao et al 2005). Eine aktuelle Studie von Raettig und Kotz (2007) bestätigt diese Ergebnisse und findet zusätzlich eine erhöhte Aktivität für Pseudowörter und Nichtwörter im Gegensatz zu realen Wörtern im oberen Teil der bilateralen temporalen Gyri. Diese Studie kommt zu dem Schluss, dass phonotaktisch korrekte Pseudowörter ähnlich wie reale Wörter verarbeitet werden, während die Verarbeitung phonotaktisch illegaler Nichtwörter nicht zu einer Aktivierung des sprachverarbeitenden neuronalen Netzwerkes führt.

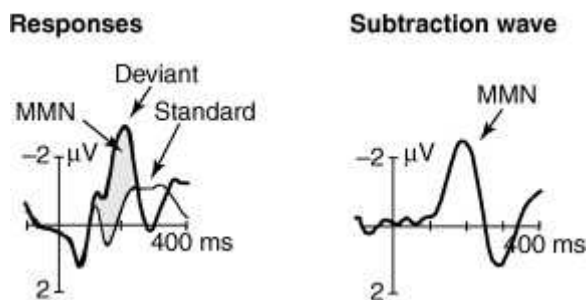
## **1.2 *Spracherwerb***

### **1.2.1 *Spracherwerb phonologischer Eigenschaften***

Der Erwerb des phonetischen Lexikons ist ein Schlüssel zum Erlernen der Muttersprache. Die Phonetik umfasst die entsprechenden Laute der Muttersprache, deren regelrechte

## Einleitung

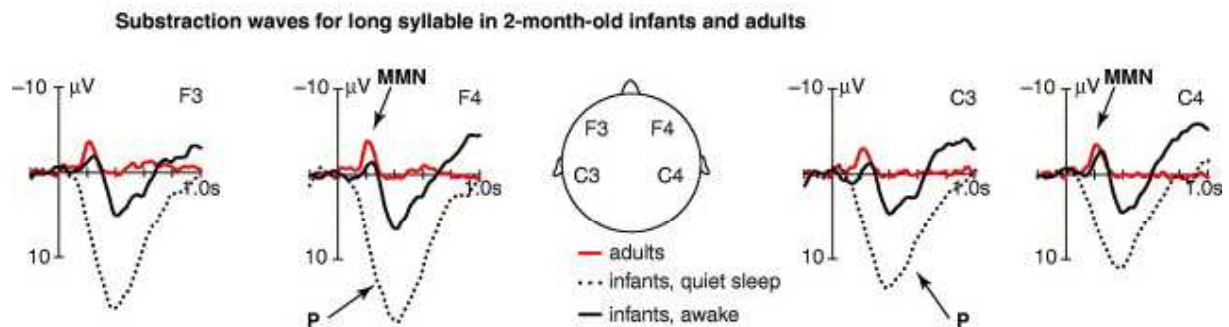
Kombination sowie bestimmte Betonungsmuster der Sprache. Die Sprachen der Welt umfassen insgesamt circa 600 Konsonanten und 200 Vokale, von denen jede Sprache eine bestimmte Auswahl dieser Elemente (ungefähr je 40) nutzt (Kuhl 2004). Phoneme sind die abstrakte Gesamtheit aller Laute einer Sprache, die die gleiche bedeutungsunterscheidende (distinktive) Funktion haben (Meibauer 2002). Die Phoneme verändern also den Sinn eines Wortes (z.B. „Hut“ zu „Mut“) und werden als gleichwertig wahrgenommen, auch wenn sie von unterschiedlichen Sprechern wiedergegeben werden (Kuhl 2004). Zum Spracherwerb ist es notwendig, zunächst die Phoneme der Muttersprache zu erkennen, um die extrem große Vielfalt verschiedener Wörter zu erkennen und schließlich zu bilden. Dafür bringen Kinder angeborene Fähigkeiten mit, die das phonetische Lernen ermöglichen. Kinder weisen ab der Geburt eine Sensitivität für akustische Veränderungen auf, die phonetische Kategorien voneinander unterscheiden (Kuhl 2004). So sind Kinder zunächst in der Lage alle phonetischen Kategorien der Weltssprachen zu unterscheiden, so genannte kategorische Wahrnehmung, während Erwachsene, deren phonetisches Repertoire auf eine ganz bestimmte Muttersprache fokussiert ist, dieses nicht mehr können (Miyawaki et al 1975). Es konnte gezeigt werden, dass japanische Säuglinge im Alter von sechs Monaten phonetische Grenzen zwischen den phonetischen Einheiten „r“ und „l“ erkannten (Eimas 1975), jedoch mit zwölf Monaten Schwierigkeiten hatten diese Unterscheidung, die es in ihrer Muttersprache nicht gibt, vorzunehmen (Tsushima et al 2001, Kuhl et al 2001). Zur gleichen Zeit wächst aber die Fähigkeit, die phonetischen Einheiten der Muttersprache als solche wahrzunehmen. Elektrophysiologisch lässt sich die Fähigkeit zur phonetischen Diskriminierung mit dem Mismatch Paradigma nachweisen. Bei der Mismatch Negativity (MMN) handelt es sich um ein ereigniskorreliertes Hirnpotential (EKP), das 150 bis 250 ms nach einem Stimulus auftritt und die Unterscheidung von phonetisch alternierenden Reizen widerspiegelt (Näätänen et al 1978).



**Abbildung 4:** Darstellung der Mismatch Negativity. Die MMN ist zu erkennen in der rechten Kurve („Subtraction wave“). Es handelt sich um eine Negativierung, die durch Subtraktion der neuronalen Antwort auf einen Standardreiz (dünne Linie im linken Graph) von einem davon abweichenden Reiz (dicke Linie im linken Graph) entsteht. Die graue Fläche im linken Graph repräsentiert die MMN (aus Kujala, Näätänen 2001).

## Einleitung

Bisherige Studien zeigen, dass Erwachsene eine reliable MMN präattentiv aufweisen, während bei zwei Monate alten Kindern die MMN vom Wachheitszustand beeinflusst wird (Friedrich et al 2004). Wache Kinder zeigen dabei eine MMN ähnlich wie Erwachsene, jedoch teilweise auch eine Positivierung des ERPs, während schlafende Kinder stets eine Positivierung zeigen. Dies legt nahe, dass Kinder bereits sehr früh, jedoch zunächst nur im wachen Zustand, verschiedene Phoneme unterscheiden können.



**Abbildung 5:** Die MMN bei Erwachsenen und Kindern. Die Graphik vergleicht die Diskriminierung von Silben bei zwei Monate alten wachen (durchgezogene, schwarze Linie) bzw. ruhig schlafenden Säuglingen (gepunktete, schwarze Linie) und Erwachsenen (rote Linie). Die MMN ist durch einen Pfeil dargestellt und tritt bei Säuglingen und Erwachsenen, jedoch nicht bei schlafenden Säuglingen auf (aus Friedrich 2004).

Weiterhin benutzen Kinder die Wahrnehmung von Betonungsmustern („stress patterns“) für das Erlernen ihrer Muttersprache. Verhaltenstudien zeigten, dass nur neunmonatige, jedoch nicht sechsmonatige, englischsprachige Säuglinge in der Lage waren, das Betonungsmuster in zweisilbigen Wörtern zu erkennen und dadurch im auditorischen Perzept den Anfang und das Ende von Wörtern auszumachen (Jusczyk et al 1993). Elektrophysiologisch konnte anhand der MMN herausgefunden werden, dass fünf Monate alte, deutschsprachige Säuglinge zweisilbige Wörter mit Betonung auf der ersten Silbe von Wörtern mit Betonung auf der zweiten Silbe unterscheiden konnten (Weber, C. et al 2004). Eine aktuelle ERP-Studie von Friederici, Friedrich und Christophe (2007) findet bereits bei vier Monate alten Säuglingen elektrophysiologische Korrelate für die sprachspezifische Differenzierung von Betonungsmustern. In dieser Studie wurden deutsche und französische Säuglinge mit Pseudowörtern konfrontiert, die entweder auf der ersten Silbe betont waren (z.B. „bába“) oder aber auf der zweiten Silbe betont waren (z.B. „babá“), was den Betonungsmustern der deutschen (Betonung auf der ersten Silbe) bzw. der französischen Sprache (Betonung auf der zweiten Silbe) entspricht. Die gemittelten ERPs ergaben verschiedene Ergebnisse für die deutschen und die französischen Kinder. Deutsche Kinder zeigten eine deutliche positive

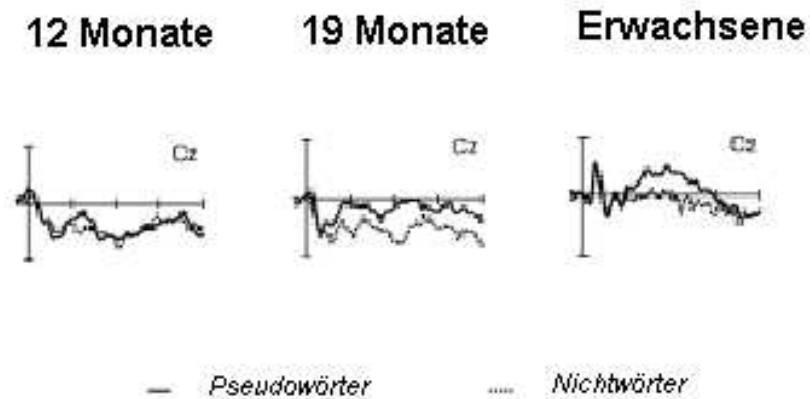
Mismatch Response (MMR), wenn sie Wörter mit Betonung auf der zweiten Silbe hörten, während französische Kinder eine deutliche MMR bei Exposition mit Wörtern, die auf der ersten Silbe betont waren zeigten. Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass Kinder bereits mit vier Monaten in der Lage sind typische Betonungsmuster ihrer Muttersprache von anderen ihnen unbekanntem Betonungsmustern zu unterscheiden.

### 1.2.2 Spracherwerb phonotaktischer Eigenschaften

Phonotaktische Verarbeitungsmechanismen konnten bereits bei neun Monate alten Kindern mittels Verhaltenstudien festgestellt werden (Friederici und Wessels 1993). Neun Monate alte Kinder konnten jedoch ihr phonotaktisches Wissen noch nicht auf lexikalische Prozesse anwenden. Eine Möglichkeit phonotaktische Prozesse zu erfassen, ist die elektrophysiologische N400 Komponente, eine zentroparietale Negativierung (Details zu dieser EKP-Komponente siehe Kapitel 1.1.3.1). Die N400 Komponente weist bei Erwachsenen eine größere Amplitude auf, wenn ein Stimulus inkongruent bezüglich eines bestimmten semantischen Zusammenhangs im Vergleich zu einem semantisch kongruenten Reiz ist (Kutas, Federmeier 2000).

Friedrich und Friederici (2005) gelang es in einer elektrophysiologischen Studie unterschiedliche phonotaktische Korrelate bei 12 und 19 Monate alten Kindern zu finden. Während die EKP-Effekte bei 19 Monate alten Kindern denen von Erwachsenen ähnelten und einen N400 Effekt bei semantisch inkongruente Wörter sowie phonotaktisch legale Pseudowörter im Vergleich zu illegalen aufwiesen, konnte kein N400 Effekt bei 12 Monate alten Kindern nachgewiesen werden. Die Studien legen nahe, dass im Alter von 19 Monaten echte Wörter und phonotaktisch legale Pseudowörter als potenzielle Wortkandidaten erkannt werden, während dies jüngeren Kindern (12 Monate) noch nicht möglich ist.

Allerdings zeigten bereits 12 Monate alte Kinder eine frühe frontal verteilte Negativierung für phonotaktisch legale im Vergleich zu illegalen Pseudowörtern. Diese Negativierung wurde von den Autoren als „phonotactic familiarity effect“ bezeichnet und lässt darauf schließen, dass bereits mit 12 Monaten eine gewisse Sensitivität bezüglich phonotaktischer Eigenschaften vorhanden ist.



**Abbildung 6:** ERPs auf Pseudowörter und Nichtwörter für 12 Monate alte Kinder, 19 Monate alte Kinder und Erwachsene. Dargestellt sind die ERPs der Cz-Elektrode. Die durchgezogene Linie stellt die phonotaktisch legalen Pseudowörter und die gepunktete Linie die phonotaktisch illegalen Nichtwörter dar (aus Friederici, Friedrich 2005).

### 1.2.3 Spracherwerb lexikalisch-semantischer Eigenschaften

Die semantische Sprachverarbeitung bei jungen Kindern verläuft zunächst ähnlich zu der von Erwachsenen und passt sich schließlich dieser komplett an (Friederici 2005). Die N400 dient als elektrophysiologischer Marker um semantische Prozesse auf Wort- und Satzebene zu messen.

Für die N400 konnte man einen klaren Zusammenhang zu semantischen Prozessen mit zwei Studien an 19 sowie 14 Monate alten Kindern nachweisen (Friedrich, Friederici 2004 und 2005). Dabei zeigten sich größere Effekte zwischen 400 bis 1400 ms, wenn ein Wort mit einem inkongruenten Bild dargeboten wurde im Vergleich zur kongruenten Bedingung. Im Vergleich zu Erwachsenen erreicht dieser N400-ähnliche Effekt zeitlich erst später Signifikanz und dauert länger an, was eine langsamere lexikalisch-semantische Verarbeitung bei Kindern nahe legt. Weiterhin ergab sich bei Kindern eine stärkere frontale Verteilung der Komponente. Dies wird dahingehend interpretiert, dass bei Kindern der semantische Prozess von der Bilderkennung dominiert wird.

Auch auf der Satzebene lässt sich die N400 bei Kindern untersuchen. Das Auftreten von sinnlosen Wörtern im Satzzusammenhang (z.B. „Der Bauer lacht die Kuh“) rief in einer Studie mit 6- bis 13 Monate alten Kinder einen deutlichen der N400 entsprechenden Effekt hervor (Hahne 2004). Studien mit älteren Kindern ergaben, dass sich die semantische Verarbeitung auf Satzebene zwischen dem 30. und 36. Lebensmonat zunehmend der von Erwachsenen anpasst (Silva-Pereyra 2005).

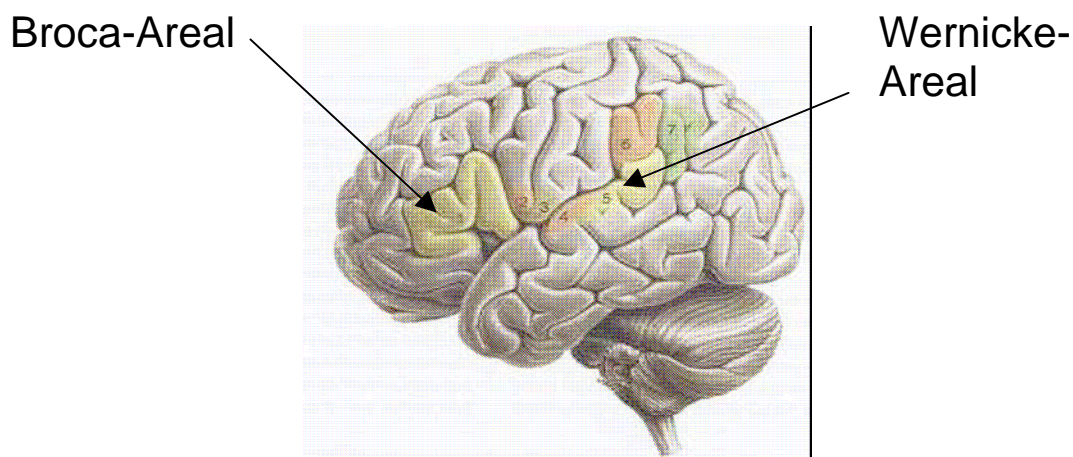


## 1.3 Sprachverarbeitende Hirnareale

Sprachverarbeitung wird beim Gesunden auditiv erlernt. Allerdings sind alternative Routen der visuellen Sprachperzeption möglich. Dies zeigt, dass es sich bei dem neuronalen Netzwerk zur Sprachverarbeitung um ein supramodales System handelt. Während die Identifikation der linkshemisphärischen, ‚klassischen‘ Sprachareale durch Paul Broca den Beginn der wissenschaftlichen Aphasie darstellt, zeigt sich heute, dass intakte Sprachverarbeitung eine Vielzahl von Arealen aktiviert, die außerhalb des Sprachzentrums liegen.

### 1.3.1 Klassische Sprachzentren

Erstmals wurde spezifischen Hirnarealen eine Funktion im Sprachverarbeitungsprozess durch den französischen Chirurgen Paul Broca (1824-1880) zugesprochen. 1861 beschrieb er einen Patienten, dessen Sprachproduktion auf nur eine Silbe beschränkt war und bei dem er post mortem eine Läsion im anterioren Teil der linken Hemisphäre feststellen konnte. Die dort gelegene dritte Hirnstrinwindung (Gyrus frontalis inferior) wurde nach Broca als sogenanntes Broca-Zentrum benannt und gilt seither als Zentrum für Sprachproduktion.



**Abbildung 7:** Seitliche Ansicht der linken Hemisphäre mit Darstellung der beiden traditionellen Sprachzentren, dem Broca und dem Wernicke Areal (aus Weniger 2006).

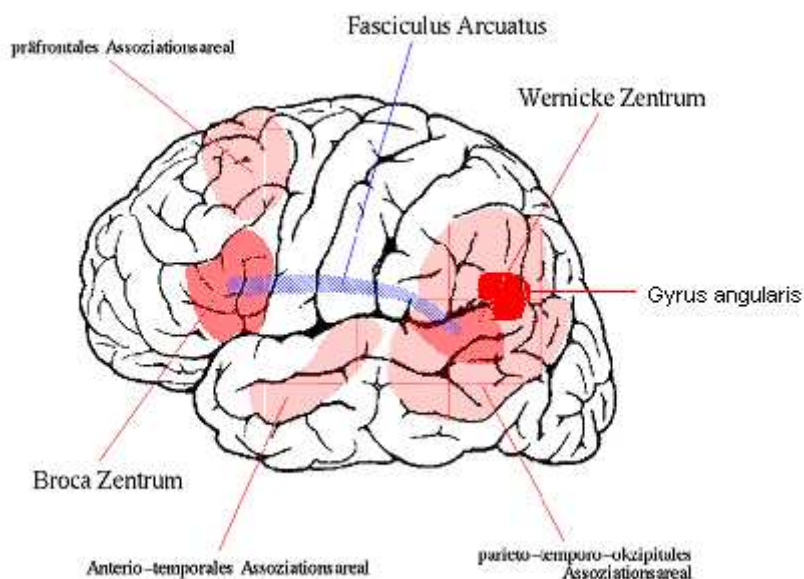
Nach Brodmann ist das Broca-Zentrum in den Arealen 44 und 45 angesiedelt und befindet sich meist auf der dominanten Hemisphäre (d.h. bei Rechtshändern links). Das Broca-Zentrum ist führend an der Verarbeitung der Syntax beteiligt. Mit der Positronen-emissionstomographie (PET) und der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) ließ sich zeigen, dass im Broca-Zentrum vornehmlich die Produktion der Sprachmotorik, die

## Einleitung

Lautbildung und Lautanalyse, die Artikulation und die Verarbeitung abstrakter Wörter stattfindet.

Das Broca-Zentrum ist über neuronale Strukturen mit einem weiteren Sprachzentrum verbunden, dem Wernicke-Zentrum. Dieses wurde 1874 von dem deutschen Neurologen und Psychiater Carl Wernicke (1848-1905) entdeckt. Wernicke berichtete über Patienten mit ausgeprägten Störungen des Sprachverständnisses, bei welchen in der Autopsie eine Läsion im linken temporalen und temporoparietalen Kortex, dem sogenannten Wernicke-Areal, bestand. Dieses Areal befindet sich im posterioren Anteil des superior temporalen Gyrus, dem Brodmannareal 22, und gilt als Zentrum für auditive Sensorik und logisches Sprachverstehen. Das Broca- und das Wernicke-Zentrum sind über den Fasciculus arcuatus verbunden, der die Verknüpfung zwischen dem Verstehen der Wörter und Phoneme und eigener Sprachproduktion erst ermöglicht.

Weiterhin wichtig für das Sprachverständnis ist der Gyrus angularis, der als Teil des parieto-temporo-okzipitalen Assoziationskortex die Eingänge verschiedener Sinnesorgane (z.B. visueller Assoziationskortex) koordiniert und damit eine wichtige Schaltstelle zwischen dem visuellen Kortex und dem Sprachkortex darstellt.



**Abbildung 8:** Seitliche Ansicht des Gehirns mit Darstellung der für den Sprachverarbeitungsprozess wichtigen neuronalen Strukturen (aus: <http://www.ims.uni-stuttgart.de/phonetik>).

### 1.3.2 Neuere Ansätze zur Sprachverarbeitung

Seit der Einführung nicht-invasiver bildgebender Verfahren (PET / fMRT) können die neuronalen Korrelate der Sprachverarbeitung beim Gesunden zu Lebzeiten mit hoher

räumlicher Auflösung untersucht werden. Dabei zeigt sich ein weitaus größeres Netzwerk, das an der vollen Sprachverarbeitung beteiligt ist. Neben den primären und sekundären auditiven Verarbeitungsarealen spielen folgende Areale eine große Rolle (Loritz 1999):

- 1) anteriore Teil des Gyrus temporalis superior (morphosyntaktische Verarbeitung)
- 2) posteriore Teil des Gyrus temporalis superior (Integration semantischer und syntaktischer Information)
- 3) Gyrus frontalis inferior (satzsemantische und syntaktische Verarbeitung sowie Arbeitsgedächtnis)
- 4) Gyrus temporalis medius (wortsemantische Verarbeitung).

Darüber hinaus ergeben sich Hinweise, dass auch subkortikale (Putamen, Nucleus caudatus, Basalganglien) und prämotorische (Brodmann Areal 6) Strukturen/Arealen an der Sprachverarbeitung beteiligt sind.

### **1.3.3 Lateralisation der Sprachverarbeitung**

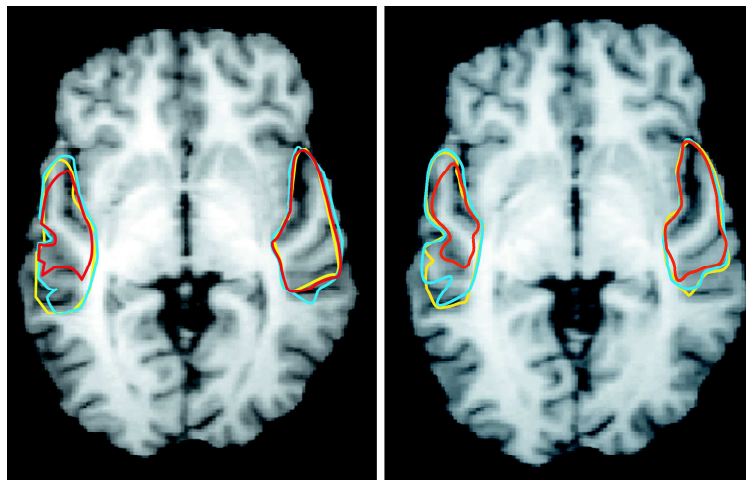
Die frühen Läsionsstudien zeigten bereits die starke Lateralisierung der Sprachverarbeitung. Bei 98% der Rechtshänder aber auch einem Großteil der Linkshänder dominiert die linke Hemisphäre die Sprachverarbeitung und Produktion. Die Ursache der Lateralisierung ist unklar. In der Folge werden drei Theorien skizziert, die die funktionelle Asymmetrie der Sprachverarbeitung fassen.

#### **1.3.3.1 Das domänenspezifische Verarbeitungsmodell („Dynamic dual pathway model“)**

Das von Friederici und Alter (2004) vorgestellte Modell postuliert, dass ein Sprachsignal in segmentale Bestandteile (phonetische, phonotaktische, syntaktische und lexikalisch-semantische Information) und suprasegmentale Bestandteile (Prosodie) zerlegt wird, die über differentielle Pfade verarbeitet werden. Das „Dynamic dual pathway model“ erklärt die Sprachverarbeitung und Lateralisation in zwei Schritten. Am Anfang steht die akustische Analyse, der eine Zerlegung in segmentale und suprasegmentale Informationen folgt. Es wird davon ausgegangen, dass segmentale Information (Syntax, Semantik) vorwiegend temporofrontal linksseitig und analog dazu suprasegmentale Information (Prosodie, Musik) stärker rechtsseitig verarbeitet wird. Der Ort der neuronalen Verarbeitung hängt demnach von der Domäne ab, aus der der Sprachreiz stammt. Über das Corpus callosum ist ein dynamischer

## Einleitung

Austausch der beiden Informationswege möglich. Empirisch bestätigt wurde dieses Modell unter anderem durch Erwachsenenstudien von Zatorre et al (1992) und Meyer et al (2002).



LH

RH LH

RH

**Abbildung 9:** FMRT nach Darbietung normaler, syntaktischer und prosodischer Sprache. Kortikales Volumen, welches aktiviert wurde durch normale und syntaktische Sprache (gelbe und blaue Linien) sowie das Volumen, welches durch prosodische Sprache aktiviert wurde (rote Linien). Es zeigt sich eine höhere Sensitivität superior-temporalen Regionen der linken Hemisphäre für syntaktische und normale Sprache als für prosodische Spracheigenschaften. Weiterhin zeigt sich eine erhöhte Sensitivität für prosodische Eigenschaften im Parietallappen der rechten Hemisphäre gegenüber der linken Hemisphäre (aus Meyer et al. 2002).

### 1.3.3.2 Die parameterspezifische asymmetrische Verarbeitung

Die Theorie der parameterspezifischen asymmetrischen Verarbeitung basiert auf dem Grundgedanken, dass die kognitive Verarbeitung von Sprache andere Anforderungen an das menschliche Gehirn stellt als die Verarbeitung von Musik (Zatorre et al 1994). Um Sprache verstehen zu können, muss das Gehirn temporale Frequenzveränderungen im Millisekundenbereich wahrnehmen und verarbeiten können. Zur vollen Wahrnehmung musikalischen Materials ist die genaue Wahrnehmung einer spektralen Varianz zusätzlich von hoher Bedeutung (Zatorre et al 1994). Während intakte Sprachverarbeitung kritisch von einer exakten temporalen Auflösung abhängt, erfordert Musikwahrnehmung zusätzlich eine hohe spektrale Auflösung. Es wird davon ausgegangen, dass temporale Eigenschaften von Sprachinput mehr die linke Hemisphäre und spektrale Eigenschaften mehr die rechte Hemisphäre in Anspruch nehmen. Zatorre et al gelang es in einer PET-Studie von 2001 einen signifikanten Aktivitätsanstieg im rechten Gyrus temporalis superior und im rechten okzipitalen Kortex bei der Präsentation von Melodien festzustellen. Studien von Shannon (1995) und Belin (1998) konnten empirisch nachweisen, dass die Fähigkeit der Sprachwahrnehmung durch die schnelle temporale Verarbeitung eines akustischen Reizes

bedingt ist. Belin gelang es zusätzlich eine Dominanz der linken Hemisphäre für schnell wechselnde Stimuli, also sprachähnlichen Stimuli, zu erkennen. Mittels EEG und fMRT Studien (Koelsch et al 2003 und 2004) zur Verarbeitung von Musik konnte verdeutlicht werden, dass Musik eindeutig zu einer stärkeren rechtshemisphärischen Aktivierung führt.

### **1.3.3.3 Die asymmetrische Verarbeitung temporaler Eigenschaften („Asymmetric sampling in time (AST)-Theorie)**

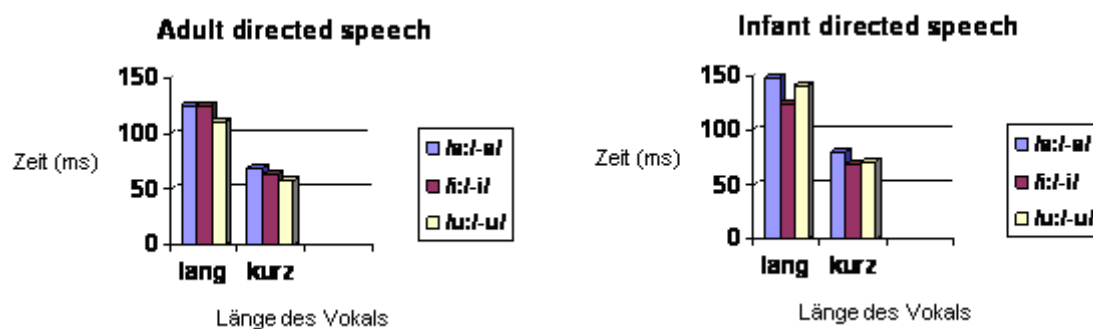
Die Asymmetric sampling in time (AST)-Theorie wurde 2003 von Poeppel in Anlehnung an den parametrischen Ansatz begründet. Diese postuliert, dass Sprache bilateral in beiden Hemisphären durch beide Gyri temporalis superiores verarbeitet wird. Der Unterschied zwischen den Hemisphären in der Verarbeitung von Sprachreizen ergibt sich aus der Annahme, dass beide Hemisphären Informationen aus unterschiedlichen Zeitfenstern verarbeiten. Nach der AST-Theorie werden zwei Zeitfenster unterschieden. Zum einen handelt es sich um ein Zeitfenster zwischen 25-50 ms, welches für die Verarbeitung von schnellen akustischen Reizen (z.B. Übergänge von einzelnen Phonemen) essentiell ist und zum anderen um ein Zeitfenster von 150-300 ms, das für die Wahrnehmung von langsamen Transitionen zur Prosodieerkennung und die Enkodierung von Silben und Wörtern wichtig ist. Nach einer initialen bilateralen Verarbeitung aller Reize, werden nach der AST-Theorie die Informationen des kurzen Zeitfensters von der linken Hemisphäre und die des langen Zeitfensters primär von der rechten Hemisphäre extrahiert, so dass es in der Folge zu einer funktionalen Asymmetrie kommt. Die Präferenzen der Hemisphären für ein bestimmtes Zeitfenster erklärt Poeppel mit Asymmetrie neuronaler Populationen, die entweder verstärkt durch ein kurzes oder ein langes Zeitfenster aktiviert werden. Im Sinne der AST-Theorie sind elektrophysiologisch im EEG kurze Zeitfenster (25 ms) mit Gamma-Oszillationen (~ 40 Hz) assoziiert, während lange Zeitfenster (>200ms) mit Theta-Oszillationen assoziiert sind (4-10 Hz). Demnach wären elektrophysiologisch in der linken Hemisphäre vermehrt Gamma-Oszillationen und in der rechten Hemisphäre vermehrt Theta-Oszillationen zu erwarten.

## **1.4 Die Kinder-gerichtete Sprache (*Infant directed speech*)**

Kinder erlernen ihre Muttersprache mit überraschender Leichtigkeit. Dies geschieht ohne formale Instruktion. Allerdings sprechen Erwachsene in allen Kulturen mit Kindern

## Einleitung

langsamer und mit gesteigerter Prosodie, was als Kind-gerichtete Sprache bezeichnet wird (Infant directed speech; ids). Mütter sprechen instinktiv mit ihrem Kind in Infant directed speech, die durch die Variation der Vokale in Betonung, Länge, Einfühlungsvermögen sowie die Veränderung der spektralen Eigenschaften charakterisiert ist (Kirchhoff und Schimmel 2005). Vokale sind hierbei stärker variabel als Konsonanten und erfahren daher eine stärkere Veränderung als solche (Swanson et al. 1992). Kinder weisen schon, wie mittels Verhaltensstudien gezeigt werden konnte, im Alter von 4-17 Wochen die Fähigkeit auf Vokale zu unterscheiden (Trehub 1973). Ihre Auffassungsgabe für Vokale hängt stark von der Häufigkeit ab, mit welcher sie diese hören (Juszyk et al. 1990). Kuhl et al (1997) führten eine Verhaltensstudie mit amerikanisch/englisch, japanisch und schwedisch sprechenden Müttern und ihren 2-5 Monate alten Kindern durch. Für alle Sprachen ließ sich eine besondere Rolle der Vokale /a, i, u/ erkennen, die stärker betont und gedehnt wurden als andere Vokale, wie z.B. /o/. Die Länge und die extreme Betonung von Vokalen durch die Mutter korreliert positiv mit der Fähigkeit von Kindern im Alter von 6-12 Monaten Vokale voneinander zu unterscheiden. Mütter, die eine extremere Betonung von Vokalen in ihrer Infant directed speech aufwiesen, hatten, abhängig auch von anderen sozioökonomischen Faktoren, Kinder, die ein gutes Sprachverständnis entwickelten. Englund et al (2005) führten eine Studie außerhalb eines Sprachlabors, also im natürlichen Umfeld der Mütter und ihren Kindern durch, um Infant directed speech mit Adult directed speech (ads) zu vergleichen. Es nahmen sechs norwegische Mütter mit ihren sechs Monate alten Kindern an der Studie teil. Es konnte festgestellt werden, dass die Vokal- und damit auch Wortlänge generell immer länger bei Infant directed speech als bei Adult directed speech war, die Tonhöhe signifikant höher bei den Vokalen /a und u/ war und die Tonhöhe auch eine größere spektrale Breite aufwies. Der Vokal /i/ hingegen wurde ähnlich in Adult directed speech wie in Infant directed speech ausgesprochen.



**Abbildung 10:** Mittlere Dauer der drei Vokalqualitäten (a, i, u) bei lang- und kurzgesprochenen Vokalen in der Adult directed speech und der Infant directed speech (aus Englund et al 2005).

## Einleitung

In einer aktuellen NIRS-Studie von Saito (2007) zeigte sich, dass Infant directed speech bei Neugeborenen (mittleres Alter 4,4 Tage) zu einer frontalen Aktivierung im Vergleich zu Adult directed speech führte. Die hyperprosodischen Charakteristika der Infant directed speech scheinen also den kindlichen Spracherwerb zu unterstützen. Auch für den Erwerb von phonotaktischen Regeln wird von einer Unterstützung durch die Infant directed speech ausgegangen. Mittels eines Kopfwende-Präferenz-Versuchs (Jusczyk et al 2000) konnte die Hypothese unterstützt werden, dass Kinder im Alter von neun Monaten phonotaktische Eigenschaften, die in Infant directed speech dargeboten wurden, für die Zerlegung des Wortflusses in einzelne Wörter benutzen.

## **2 Zentrale Fragestellungen und Ziele der Studie**

Ziel dieser Arbeit ist es, die neuronale Verarbeitung von phonotaktischen Regeln zu untersuchen. Weiterhin soll die Studie die Verarbeitung von zwei unterschiedlichen Sprachstilen (Infant directed speech und Adult directed speech) vergleichen. Zur Darstellung kortikaler Aktivierung werden simultan EEG und NIRS genutzt, um die elektrophysiologische und die vaskuläre Antwort aufzuzeichnen.

Aus bisherigen Forschungsergebnissen ergeben sich folgende Hypothesen und Fragen:

- 1) Eine N400 ist bei phonotaktisch legalen Pseudowörtern im EEG nachweisbar.
- 2) Unterscheidet sich die Verarbeitung von Infant directed speech und Adult directed speech auch beim Erwachsenen? Hierzu liegen bisher keine Studien vor.
- 3) Mit dem NIRS lassen sich Lateralisierungseffekte bei phonotaktisch legalen im Vergleich zu phonotaktisch illegalen Pseudowörtern darstellen. Es wird erwartet, dass legale Pseudowörter zu einer stärkeren Aktivierung der linken Hemisphäre führen.
- 4) Lassen sich auch mit der NIRS Unterschiede zwischen Infant directed speech und Adult directed speech nachweisen?



### **3 Material und Methodik**

#### **3.1 *Studienteilnehmer***

An der Studie nahmen 25 junge Erwachsene zwischen 19 und 30 Jahren (11 männliche Probanden, 14 weibliche Probandinnen, durchschnittliches Alter 24,5) teil. Alle Studienteilnehmer waren deutsche Muttersprachler und hatten kein bekanntes Hördefizit oder eine Sprachexposition im slawischen Sprachraum. Ein Studienteilnehmer mit Kenntnissen der tschechischen Sprache wurde nachträglich ausgeschlossen. Außer zwei Probanden waren alle Rechtshänder, was mit dem Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) evaluiert wurde. Nach dieser Evaluation führten die 24 teilnehmenden Probanden (ohne Wertung des Probanden mit Kenntnissen des Tschechischen) im Durchschnitt zu 95,4% Tätigkeiten wie Schreiben, Zeichnen, Werfen etc. mit der rechten Hand durch. Zwei der Probanden waren nach diesem Test ambidexter. Diese Probanden wurden nachträglich aus der Studie ausgeschlossen. Die verbleibenden 22 Probanden führten im Durchschnitt 97,3% aller Tätigkeiten mit der rechten Hand durch. Von den 25 teilnehmenden Probanden konnten somit 22 EEG-Daten in die Analyse eingeschlossen werden.

Für die Auswertung der NIRS-Daten wurden zusätzlich zu den genannten drei Studienteilnehmern noch weitere sieben Probanden ausgeschlossen, da deren NIRS-Signal stark verrauscht war (Bewegungsartefakte oder geringe Signal-Noise-Ratio). Somit gingen in die NIRS-Analyse 15 Probanden ein.

#### **3.2 *Material***

Das Studienmaterial bestand aus 216 einsilbigen Pseudowörtern. Die Hälfte der Pseudowörter entsprach (1) den phonotaktischen Regeln der deutschen Sprache, während die andere Hälfte diesen Regeln nicht folgte (2). Diese zweite Kategorie wurde jedoch so konstruiert, dass sie den phonotaktischen Regeln einer zweiten Sprache gehorchte. Es zeigte sich, dass sich hierfür die slowakische Sprache eignet, da diese viele Phonemkombinationen verwendet, die im Deutschen nicht zulässig sind. Die Konsonantencluster wurden stets am Anfang (Onset) eines Wortes manipuliert, während die Mitte und das Ende des Wortes gleich blieben. Der gesamte Pseudowörterpool umfasste 18 verschiedene deutsche (legale) Konsonantenonsets sowie 18 verschiedene slowakische (illegale) Konsonantenonsets. Jedes deutsche Konsonantenonset

besaß ein verwandtes slowakisches Konsonantenonset. Zu jedem dieser Konsonantenonsets wurden je sechs Pseudowörter konstruiert, was einen Pseudowörterpool von 216 Wörtern ergab. Die sechs Wörter eines Konsonantenonsets entsprachen in ihrer Wortmitte und dem Wortende jeweils den sechs Wörtern des verwandten slowakischen Konsonantenonsets. Folgende Konsonantenonsets wurden verwendet (Tabelle 3):

<b>legal (deutsch)</b>	<b>illegal (slowakisch)</b>
br	bz
bl	bd
dr	dl
ʃn (schn)	dn
zv	dv
kr	km
fl	ft
ps	vs
fr	vk
ʃp (scht)	vp
kn	vn
vr	vd
tr	tk
pl	tl
ʃm (schm)	tm
kv	tv
gr	gv
ʃt (scht)	kt

**Tabelle 3:** Legale und illegale Konsonantenonsets.

Im Folgenden soll ein Beispiel der Materialmanipulation angeführt werden (Tabelle 4):

<i>Pseudowörter</i>	
<b>phonotaktisch legal</b> (bzgl. Deutsch)	<b>phonotaktisch illegal</b> (bzgl. Deutsch, aber legal bzgl. Slowakisch)
<b>BR</b> AK	<b>BZ</b> AK

**Tabelle 4:** Design der Materialmanipulation (inkl. Beispield pseudowort).

Um zu gewährleisten, dass die Pseudowörter (sowohl die legalen als auch die illegalen) tatsächlich als solche und nicht als real existierende Wörter wahrgenommen werden, wurde

ein pre-test Rating mit dem erstellten Pseudowortpool bei 20 deutschen Muttersprachlern durchgeführt. Weiterhin sollte mit dem Rating erprobt werden, ob die konstruierten Pseudowörter auch als mögliche existierende Pseudowörter im Deutschen und im Slowakischen erkannt werden. Die Pseudowörter wurden hierfür in zwei verschiedenen Randomisierungen den jeweiligen Teilnehmern in schriftlicher Form präsentiert. Die Teilnehmer des Ratings sollten alle 216 Pseudowörter bewerten. Es sollte entschieden werden, ob die Pseudowörter bezüglich des phonotaktischen Aufbaus ein legales deutsches Wort sein können oder ein phonotaktisch illegales Wort darstellen. Es wurden 74,4% der 108 legalen (deutschen) Pseudowörter als potenziell mögliche, deutsche Wörter eingeschätzt, während hingegen nur 11,1% der illegalen (slowakischen) Pseudowörter als potenziell mögliche, deutsche Wörter eingeschätzt wurden. Die restlichen 88,9% der illegalen Pseudowörter wurden richtig als im Deutschen nicht mögliche Wörter eingeschätzt.

	Mittelwert	Standardabweichung	N
legale (deutsche) Pseudowörter	74,3995	18,93204	20
illegale (slowakische) Pseudowörter	11,1020	11,05790	20

**Tabelle 5:** Deskriptive Statistik des pre-test Ratings.

	<i>df</i>	<i>p</i>
Einschätzung legaler Pseudowörter als mögliche deutsche Wörter oder nicht mögliche deutsche Wörter	19	<b>,000</b>
Einschätzung illegaler Pseudowörter als nicht mögliche deutsche Wörter oder mögliche deutsche Wörter	19	<b>,000</b>

**Tabelle 6:** *t*-test zum pre test Rating.

Die 216 Pseudowörter wurden von einer deutsch-slowakischen, bilingual aufgewachsenen Einsprecherin in einer schalldichten Kabine bei 16 bits in digitaler Form aufgenommen. Die Samplingrate betrug 44000 Hz. Der Pseudowörterpool wurde zum einen in gewöhnlicher Erwachsenensprache (Adult directed speech) und zum anderen in Kind-gerichteter Sprache (Infant directed speech) gesprochen. Die insgesamt 432 Wörter wurden mithilfe des Programms Cool Edit 2.0 digitalisiert und auf 70% der Lautstärke normalisiert. Vor und nach jedem Wort erfolgte eine Pause von 30 ms. Tabelle 7 zeigt die durchschnittliche Dauer der Pseudowörter sowie die jeweilige Vokaldauer pro Bedingung.

	deutsch <i>Adult</i> <i>directed speech</i>	deutsch <i>Infant</i> <i>directed speech</i>	slowakisch <i>Adult</i> <i>directed speech</i>	slowakisch <i>Infant</i> <i>directed speech</i>
Dauer in ms	<b>603,5</b>	<b>1006,1</b>	<b>617,2</b>	<b>1005,6</b>
Dauer des Vokals in ms	<b>184,7</b>	<b>631,7</b>	<b>202,4</b>	<b>611,4</b>

**Tabelle 7:** Durchschnittliche Dauer der Pseudowörter und der Vokale pro Bedingung.

Es wurden zehn Pseudorandomisierungsversionen erstellt, damit potentielle Reihenfolgeeffekte über Probanden hinweg ausgeschlossen werden konnten. Die Randomisierungskriterien wurden wie folgt definiert:

- Es durften maximal vier deutsche bzw. slowakische Pseudowörter hintereinander dargeboten werden.
- Es durften maximal vier Wörter in ADS bzw. in IDS hintereinander dargeboten werden.
- Es mussten mindestens 18 Pseudowörter zwischen der Wiederholung von einem Pseudowort liegen.
- In jedem der acht Blöcke aus je 54 Pseudowörtern müssen 27 deutsche und 27 slowakische Pseudowörter vorkommen.
- In jedem der acht Blöcke aus je 54 Pseudowörtern müssen 27 Pseudowörter in Adult directed speech und 27 Pseudowörter in Infant directed speech dargeboten werden.
- In beiden Experimentalhälften mit je 216 Pseudowörtern müssen 108 deutsche und 108 slowakische Pseudowörter vorkommen.
- In beiden Experimentalhälften müssen 108 Pseudowörter in Adult directed speech und 108 Pseudowörter in Infant directed speech dargeboten werden.

Die NIRS-Methode misst im Vergleich zum EEG eine langsame hämodynamische Antwort. Um eine Überlappung dieser Antwort über Trials hinweg vorzubeugen, wurde mittels der optseq Software (<http://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/optseq/>) die Länge der Pausen zwischen den einzelnen Pseudowörtern variiert und dadurch der hämodynamischen Antwort angepasst. So konnte eine Überlappung minimiert werden. Die minimale Pause zwischen zwei Wörtern betrug 2 Sekunden, die maximale Pause 28 Sekunden. Es erfolgte im Durchschnitt eine Pause von 5,6 Sekunden zwischen zwei Pseudowörtern.

Die ausgewählten Pseudowörter und die dazugehörigen Pausen zwischen den Trials wurden in Presentation (<http://www.neurobs.com/>) programmiert.

### **3.3 Durchführung**

Die Rekrutierung der Probanden erfolgte ab März 2007 über Aushänge. Die 25 Versuchspersonen wurden zur Durchführung des Experiments in das NeuroImaging Center Berlin einbestellt. Die experimentelle Untersuchung dauerte pro Versuchsperson ca. 2 Stunden, wovon 42 Minuten reine Versuchszeit waren.

Folgender Untersuchungsablauf wurde eingehalten:

- Aufklärung der Studienteilnehmer
- Händigkeitserhebung (Edinburgh Handedness Inventory (EHI Oldfield, 1971))
- Befindlichkeitsfragebogen
- Fragen nach Hörschäden oder neurologischen und psychiatrischen Erkrankungen
- Anbringung der Elektroden sowie der NIRS-Optoden.
- Präsentation der ersten Hälfte des Pseudowörterpools über Lautsprecher (ca. 21 Minuten)
- kurze Pause (ca. 5 bis 10 Minuten)
- Präsentation des zweiten Teils des Pseudowörterpools (ebenfalls ca. 21 Minuten).

Die Probanden wurden instruiert während des Versuchs ruhig und entspannt zu sitzen, ein Fixationskreuz mit den Augen zu fixieren und die Augenbewegungen möglichst gering zu halten. Der Untersuchungsraum war abgedunkelt zur Reduzierung der NIRS-Artefakte und um die Probanden möglichst wenig abzulenken. Während der Präsentation führte der Versuchsleiter ein Ableitungsprotokoll, in dem etwaige Abweichungen von der Norm sofort erfasst werden konnten. Als Aufwandsentschädigung erhielten die Probanden am Ende des Experiments 20 Euro.

### **3.4 Methodik der Elektroenzephalographie**

Seit der Erstbeschreibung durch Berger 1928 ist bekannt, dass sich die elektrische Aktivität des Gehirns mit der Elektroenzephalographie darstellen lässt (Klinke, Silbernagl 2003). Dabei entsteht bei Summierung von langsamen, postsynaptischen Feldpotentialen der Neurone ein

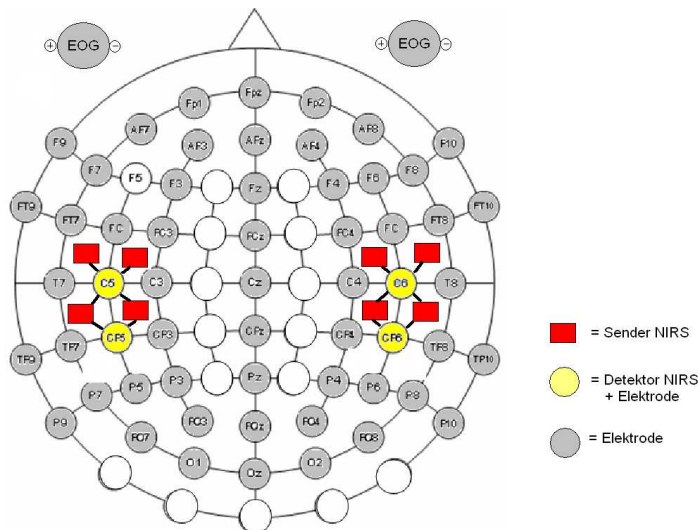
an der Kopfoberfläche ableitbares Potential (Zoschke 2002). Beim Gesunden liegen die Potentialschwankungen in der Größenordnung von 5-159  $\mu\text{V}$  (Zoschke 2002).

Als ERPs (event related potentials) bezeichnet man Antworten des Gehirns, welche in zeitlichem Zusammenhang mit einem sensorischen Stimulus stehen. Das akustisch evozierte Potential (AEP) zeigt sich, wenn ausreichend häufig auf den repetitiv dargebotenen akustischen Reiz gemittelt wird. Die Amplitude der ERPs ist kleiner als die spontanen Potentialschwankungen des EEGs, daher muss zur Darstellung der ERPs repetitiv gereizt und das EEG auf den Reiz gemittelt werden. Die Hypothese ist, dass der repetitive Reiz eine zeitkonstante, immer gleiche Potentialänderung hervorruft, während die spontanen Oszillationen nicht phasenstabil zum Reiz sind und somit in der Mittelung attenuiert werden (Birbaumer und Schmidt 1996). Daraus ergibt sich, dass mit steigender Anzahl der Mittelungen das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) steigt. Nach Mittelung zeigt das ERP eine spezifische Folge von Auslenkungen, deren Polarität (positive oder negative Wellenform), Latenz (Zeit des maximalen Peaks), Sensitivität (Feinheit mit der die experimentellen Manipulationen widergespiegelt werden) und Topographie (Verteilung über die Kopfoberfläche) Rückschlüsse über kognitive Prozesse zulassen. So ist es mit ERPs möglich phonetische, phonotaktische, semantische und syntaktische Prozesse zu untersuchen. ERPs haben eine sehr gute zeitliche aber im Vergleich schlechte räumliche Auflösung und sind damit komplementär zu den bildgebenden vaskulär basierten Methoden (fMRT, PET, NIRS).

### **3.5 Durchführung des EEG**

Das EEG wurde von 59 Kopfelektroden und 7 Elektroden für die Aufzeichnung der Augenbewegungen und der Referenz abgeleitet. Die AgAg/Cl-Ringlelektroden wurden in einer elastischen Kappe (EASY CAP) befestigt. Die Anordnung der Elektroden erfolgte nach dem 10-20 System nach Jasper (Jasper, 1958; Sharbrough et al. 1991). Augenbewegungen und Artefakte durch Augenblinzeln wurden durch das vertikale und horizontale Elektroofokulogramm (HEOG /VEOG) aufgezeichnet. Die Erdung erfolgte über eine auf dem Sternum befindliche Elektrode. Die Aufzeichnung des EEGs erfolgte während des laufenden Versuches monopolar, wobei alle Elektroden auf eine gemeinsame Referenzelektrode am linken Mastoid abgeleitet wurden. Nach dem Experiment erfolgte eine Rereferenzierung durch Mittelung der Elektroden am linken und rechten Mastoid. Alle Impedanzen wurden

unter  $5k\Omega$  gehalten. Das EEG und das EOG wurden durch zwei 32 Kanal-Verstärker verstärkt, die Abtastrate betrug 1000 Hz.



**Abbildung 11:** Positionen der Elektroden nach Sharbrough et al. (1991). Die grau markierten Elektroden wurden im folgenden Experiment verwendet. Rot und gelb markiert sind die zudem verwendeten NIRS-Optoden.

### 3.6 Datenanalyse des EEG

Mit dem Brain Vision Analyzer wurden nur Trials in die Datenanalyse einbezogen, bei denen Artefakte durch Bewegungen oder Augenblinzeln ausgeschlossen bzw. zuvor korrigiert wurden. Die Augenartefakte wurden zunächst automatisch durch die Werte des EOGs detektiert. Anschließend wurden sie manuell nachkontrolliert um gleichzeitig auftretende weitere Artefakte zu erfassen. Die Korrektur wurde mittels des Algorithmus Gratton & Coles vorgenommen. Nun erfolgte eine allgemeine Artefaktbereinigung, durch welche auch Bewegungen der Probanden bzw. Verstärkerartefakte als Störgrößen individuell markiert wurden. Diese erfolgte ebenfalls zunächst automatisch mittels Angabe von verschiedenen Schwellenwerten und wurde dann manuell nachkontrolliert. Insgesamt wurden 12,18 % aller Stimuli ausgemustert. Tabelle 8 zeigt die prozentuale Verteilung der ausgemusterten Trials für jede der vier präsentierten Sprachvarianten (deutsch und Adult directed speech, deutsch und Infant directed speech, slowakisch und Adult directed speech, slowakisch und infant directed speech).

	deutsch <i>Adult directed speech</i>	deutsch <i>Infant directed speech</i>	slowakisch <i>Adult directed speech</i>	slowakisch <i>Infant directed speech</i>
ausgemusterte Wörter in %	<b>12,54</b>	<b>12,58</b>	<b>12,12</b>	<b>11,49</b>

**Tabelle 8:** Nach der Artefaktbereinigung ausgemusterte Stimuli in Prozent für jeden der vier präsentierten Pseudowörterpools.

Nach der Artefaktbereinigung erfolgte ein Downsampling der Abtastrate von 1000 Hz auf 500 Hz.

Die ERPs der einzelnen Versuchspersonen und der verschiedenen Bedingungen wurden zunächst einzeln und dann über die Gruppe ausgewertet. Für die statistische Datenverarbeitung wurde entsprechend der vorliegenden Literatur und der visuellen Inspektion der ERP-Plots ein Zeitfenster von 450-550 ms ausgewählt. Nach einem hierarchischen Schema erfolgte die Berechnung der ANOVAs (Analysis of variance; Varianzanalysen). Als erstes wurde eine allgemeine Analyse für alle lateral der Mittellinie gelegenen Elektroden im relevanten Zeitfenster mit den Faktoren „speech“ (Adult directed speech vs. Infant directed speech), „condition“ (deutsch vs. slowakisch), „hemisphere“ (linke vs. Rechte Hemisphäre), „laterality“ (innere vs. äußere Elektroden einer Hemisphäre) und „region“ (anteriore vs. zentrale vs. posteriore Elektroden einer Hemisphäre) berechnet. Zur Definition der verschiedenen Regionen wurden unterschiedliche ROIs („Regions of interest“) festgelegt, die sich wie folgt zusammensetzten (Tabelle 9):

<b><i>ROIs</i></b>	<b><i>Beteiligte Elektroden</i></b>	<b><i>Hemisphäre</i></b>
links anterior innen	F3, FC3	links
rechts anterior innen	F4, FC4	rechts
links zentral innen	C3, CP3	links
rechts zentral innen	C4, CP4	rechts
links posterior innen	P3, P03	links
rechts posterior innen	P4, P04	rechts
links anterior außen	F5, FC5	links
rechts anterior außen	F6, FC6	rechts
links zentral außen	C5, CP5	links
rechts zentral außen	C6, CP6	rechts
links posterior außen	P5, P07	links
rechts posterior außen	P6, P08	rechts

**Tabelle 9:** In der Datenanalyse für die lateralen Elektroden verwendete ROIs („Regions of interest“).



Daraufhin erfolgte eine weitere ANOVA für alle Elektroden der Mittellinie mit den Faktoren „speech“, „condition“ und „region“. Die ROIs für die Mittellinienelektroden setzten sich wie folgt zusammen (Tabelle 10):

<i>ROIs</i>	<i>beteiligte Elektroden</i>
anterior	Fz, FCz
zentral	Cz, CPz
posterior	Pz, POz

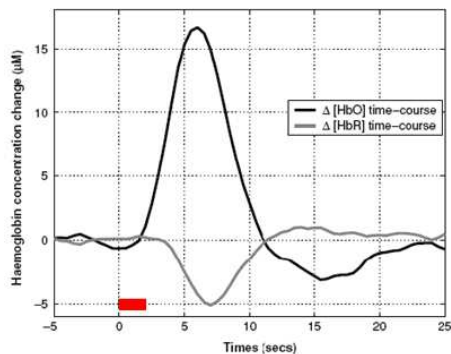
**Tabelle 10:** In der Datenanalyse für die Elektroden der Mittellinie verwendete ROIs („Regions of interest“).

Das Signifikanzniveau wurde gemäß Bonferroni festgesetzt. Wenn eine Signifikanz ( $p < .05$ ) auftrat, wurden anschließend zweiseitig gepaarte  $t$ -tests mit den beiden betroffenen Bedingungen durchgeführt. Wenn der Freiheitsgrad im Zähler 1 überschritt, wurde eine Korrektur nach Greenhouse und Geisser (1959) durchgeführt und im Folgenden als korrekte Signifikanz angegeben.

### 3.7 Methodik der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS)

Die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) misst Änderungen der kortikalen Oxygenierung. Damit misst sie zerebrale Aktivierung aufgrund der vaskulär metabolischen Antwort. Eine Reihe von Studien hat gezeigt, dass die NIRS durch die extrazerebralen Gewebe der Haut und des Knochens funktionelle Veränderungen des Kortex erfasst (Maki et al. 1996; Watanabe et al. 2000; Obrig, Villringer 2003; Homae et al. 2006). Funktionelle NIRS-Studien basieren auf der Theorie der neurovaskulären Kopplung, die eine sehr enge Kopplung der neuronalen Aktivität und der daraus folgenden metabolisch-vaskulären Antwort postuliert. Eine wesentlich deutlichere Steigerung des regionalen zerebralen Blutflusses (rCBF) bei nur geringem Anstieg des lokalen Sauerstoffmetabolismus erklärt die mit der NIRS darstellbare Hyperoxygenierung über dem aktivierten Areal (Fox et al 1986). Die neurovaskuläre Kopplung ist nicht im Detail verstanden, jedoch steht fest, dass eine neuronale Aktivität zu einem überproportionalen Anstieg des oxygenierten Hämoglobins [oxy-Hb] führt, wodurch in der Folge der Gehalt des deoxygenierten [deoxy-Hb] Hämoglobins abfällt (Villringer 2000). Veränderungen in der Blutoxygenierung treten jedoch zeitverzögert mit einer Latenz von ca. 1-2 Sekunden auf und erreichen ihr Maximum etwa 5-7 s nach dem Stimulationsbeginn. Ein Beispiel der hämodynamischen Antwort zeigt Abbildung 12 bei der die Antwort auf ein

motorisches Paradigma gezeigt wird (Zhang et al. 2005). Die Antwort besteht aus einem Anstieg von [oxy-Hb] während [deoxy-Hb] abfällt.

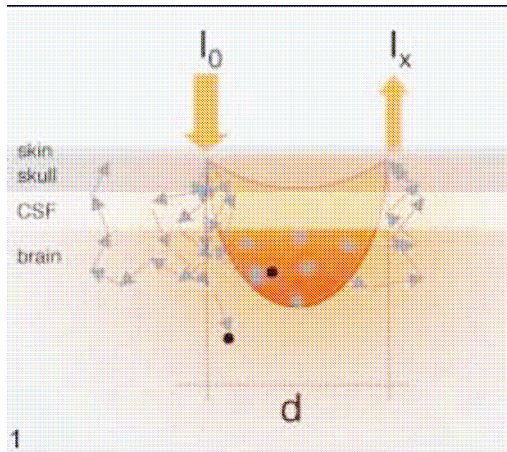


**Abbildung 12:** Zeitverlauf der Konzentrationsveränderungen des oxygenierten [HbO] und deoxygenierten [HbR] Hämoglobins im motorischen Kortex während einer zwei Sekunden dauernden Finger-Tapping-Aufgabe (roter Balken) (aus Zhang et al 2005).

Die NIRS beruht auf der Tatsache, dass sich oxygeniertes und deoxygeniertes Hämoglobin in ihrer Farbe also der Extinktion unterscheiden. Dieser spektrale Unterschied der auch im NIR Bereich des Lichtspektrums besteht, wird genutzt die Chromophore zu differenzieren.

Die Methodik der NIRS ist in zahlreichen Arbeiten beschrieben. Kurz zusammengefasst beruht das Verfahren auf der Tatsache, dass Hämoglobin im Bereich zwischen 600-900 nm je nach Oxygenierung unterschiedliche Extinktionskoeffizienten hat. Dies entspricht dem Farbunterschied im sichtbaren Bereich. Damit wird letztlich der Farbumschlag des zerebralen Kortex bei funktioneller Aktivierung gemessen (für eine Übersicht siehe auch Obrig Habilitationsschrift 2002).

Praktisch werden bei einer NIRS-Untersuchung mehrere Lichtquellen mit bestimmten Intensitäten  $I_0$  an verschiedenen Stellen des Kopfes angebracht und das infrarote Licht durchleuchtet den Kortex, um an einer anderen Stelle von Detektoren mit einer bestimmten Intensität  $I_X$  wieder aufgenommen zu werden.



**Abbildung 13:** Prinzip der Nahinfrarotspektroskopie: Das Licht mit einer Intensität  $I_0$ , das vom Sender ausgestrahlt wird, wird durch Streuung und Absorption mit einer Intensität  $I_x$  vom Detektor wieder aufgenommen. Bei  $d$  handelt es sich um den Abstand zwischen Sender und Detektor und gleichfalls um die zu durchstrahlende Schichtdicke (aus Obrig et al 2003).

Dass die Messung durch die Kalotte hindurch gelingt, liegt an der Tatsache, dass biologisches Gewebe für Licht im Spektralbereich zwischen 650-950 nm relativ durchlässig ist. Dieser Bereich wird auch als optisches Fenster bezeichnet. Er wird im Bereich mit kürzeren Wellen (unter 650 nm) von der zu starken Lichtabsorption des Hämoglobins und im Bereich mit längeren Wellen (über 950 nm) von der zu starken Lichtabsorption des Wassers begrenzt.

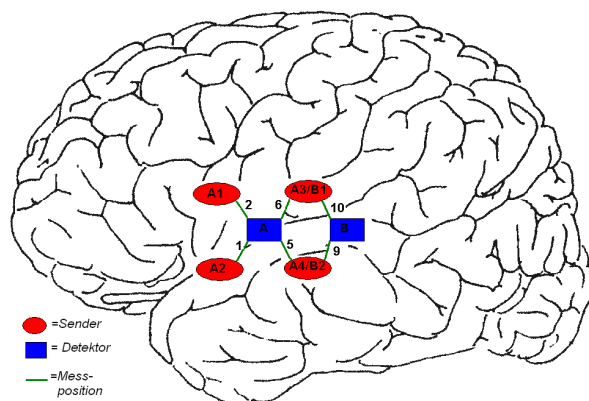
Die Messung mit nahinfrarotem Licht weist einige Nachteile gegenüber anderen Messmethoden wie fMRT oder PET auf. Dazu gehören die geringe Eindringtiefe von nur 2 bis 3 Zentimetern, die geringe räumliche Auflösung und die Tatsache, dass lediglich eine relative Aussage über Konzentrationsunterschiede getroffen werden kann und diese nicht absolut gemessen werden. Ein klarer Vorteil der Nahinfrarotmessungen gegenüber anderen Neuro-Imaging-Methoden (z.B. fMRT, PET) ist die leichte Anwendung sowie der geringe finanzielle und apparative Aufwand. Von Vorteil ist ebenso, dass die NIRS relativ unempfindlich gegenüber Artefakten ist, was insbesondere bei Patienten mit geringer Compliance aber auch bei Kindern relevant ist. Gerade für Studien in der Sprachforschung eignet sich die NIRS gut, da es sich hierbei um ein geräuschloses Verfahren handelt, welches zu keiner Interaktion mit akustisch präsentierten Stimuli führt. Die NIRS ist als nicht-invasives Verfahren unbedenklich und ohne Risiken für die Gesundheit der Probanden.

### 3.8 Durchführung Nahinfrarotspektroskopie

Die Aufzeichnung der NIRS erfolgte simultan zu der Aufzeichnung des EEGs mittels zwölf Optoden, davon vier Detektoren und acht Sender. Das genutzte NIRS-System (Omniat Tissue Oxymeter, ISS Inc., Champaign, IL, U.S.A) hat eine Abtastrate von 10 Hz. Die Sender verfügten über ein Glasfaserkabel mit zwei Enden (Durchmesser je 1 mm), wovon ein Ende Licht der Wellenlänge 690 nm und das andere Licht der Wellenlänge 830 nm aussendet. Die Detektoren verfügten über ein Glasfaserkabel mit einem Durchmesser von 3 mm. Aus der Differenz der Intensität des gesandten Lichtes und der Intensität des detektierten Lichtes wurden die Konzentrationsunterschiede ermittelt. Da man aufgrund des Versuchsdesigns Aktivierungen im Bereich des Gyrus temporalis superior sowie im auditorischen Kortex erwartete, wurden je sechs Optoden über dem Gyrus temporalis superior und Umgebung beider Hemisphären in der elastischen Kappe (EASY CAP) angebracht. Je zwei Optoden pro Hemisphäre wurden über die Ringlelektroden des simultan abgeleiteten EEGs (Positionen C5, CP5, C6 und CP6) platziert, während die restlichen Optoden in nicht belegten Elektrodenpositionen oder neu hinzugefügten Positionen befestigt wurden. Der Interoptodenabstand betrug 2,5 cm. Die Messpositionen liegen für die NIRS zwischen Sender und Detektor und sind in Abbildung 14 und 15 skizziert:

linke Hemisphäre:

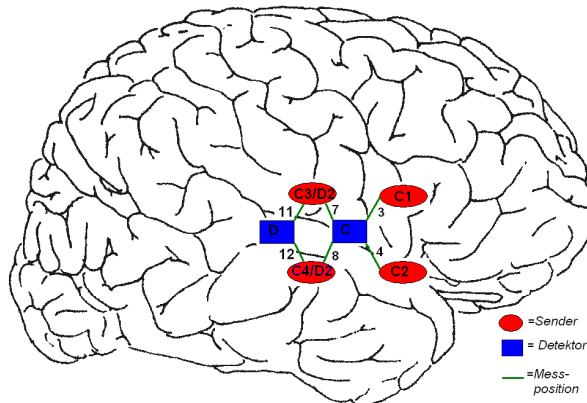
- (1): fronto-temporal inferior; A2-A
- (2): fronto-temporal superior; A1-A
- (5): temporal inferior; A4/B2-A
- (6): temporal superior; A3/B1-A
- (9): temporo-parietal inferior; A4/B2-B
- (10): temporo-parietal superior; A3/B1-B



**Abbildung 14:** Darstellungen der Messpositionen auf der linken Hemisphäre

rechte Hemisphäre:

- (3): fronto-temporal superior; C1-C
- (4): fronto-temporal inferior; C2-C
- (7): temporal superior; C3/D1-C
- (8): temporal inferior; C4/D2-C
- (11): temporo-parietal superior; C3/D1-D
- (12): temporo-parietal inferior; C4/D2-D



**Abbildung 15:** Darstellungen der Messpositionen auf der rechten Hemisphäre

Vor Beginn der Untersuchung wurde die Qualität der NIRS-Signale mittels der BOXY-Software (ISS) überprüft.

### 3.9 Datenanalyse Nahinfrarotspektroskopie

Um ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten, wurde eine Filterung der NIRS-Daten durchgeführt. Der hierfür verwendete „band-pass Filter“ erkennt sehr schnelle ( $> 0,04$  Hz) bzw. sehr langsame ( $< 0,5$  Hz) Oszillationen im Signal, die nicht mit der physiologischen Antwort auf die präsentierten Signale übereinstimmen. Durch den verwendeten Filter lassen sich Überlagerungen des NIRS-Signals mit anderen physiologischen Antworten, wie beispielsweise dem Herzschlag oder der Atmung verkleinern.

Für die während der Signalmessung auftretenden Bewegungsartefakte wurde eine semi-automatische Artefaktkorrektur angewandt. Das verwendete Korrekturprogramm wurde in MATLAB programmiert und hat den Vorteil, dass bei einem Artefakt nicht der gesamte Trial sondern nur der betroffene Abschnitt pro Messposition markiert und korrigiert werden kann.

Als erster Schritt der Artefaktkorrektur wurde die gesamte Pause zwischen den zwei Versuchsblöcken als Artefakt markiert. In dieser Pause war es dem Probanden erlaubt sich trotz der kontinuierlichen Aufzeichnung des NIRS-Signals zu bewegen, da in diesem Abschnitt keine Stimuli dargeboten wurden. Anschließend wurden alle Artefakte markiert, die sich über alle oder viele Messpositionen verteilten. An die Markierung schloss sich das Interpolieren der markierten Abschnitte an. Automatisch wurde nun der Mittelwert aus den Werten vor und nach dem Abschnitt mit Artefakt berechnet. Die so artefaktbereinigten Daten wurden anschließend bei 0,5 Hz gefiltert. Daraufhin wurde das Lambert-Beer'sche Gesetz auf die Daten angewandt und ein allgemeines lineares Modell (General linear model, GLM) berechnet. Das allgemeine lineare Modell beinhaltete die Bedingungen „speech“ (Adult directed speech vs. Infant directed speech) „condition“ (deutsch vs. slowakisch), „hemisphere“ (linke vs. rechte Hemisphäre) und „region“ (anteriore vs. zentrale vs. posteriore Region). Die Regionen wurden wie folgt festgelegt (Tabelle 11):

<i>Regionen</i>	<i>beteiligte NIRS-Messpositionen</i>	<i>Hemisphäre</i>
links fronto-temporal	1, 2	links
rechts fronto-temporal	3, 4	rechts
links temporal	5, 6	links
rechts temporal	7, 8	rechts
links temporo-parietal	9, 10	links
rechts temporo-parietal	11, 12	rechts

**Tabelle 11:** Regionen der statistischen Datenanalyse für die Nahinfrarotspektroskopie.

Das Signifikanzniveau wurde bei  $p < 0.05$  festgelegt und gemäß Bonferroni korrigiert. Wenn eine Interaktion ( $p < .05$ ) zwischen zwei Bedingungen auftrat wurden zweiseitig gepaarte  $t$ -tests durchgeführt.

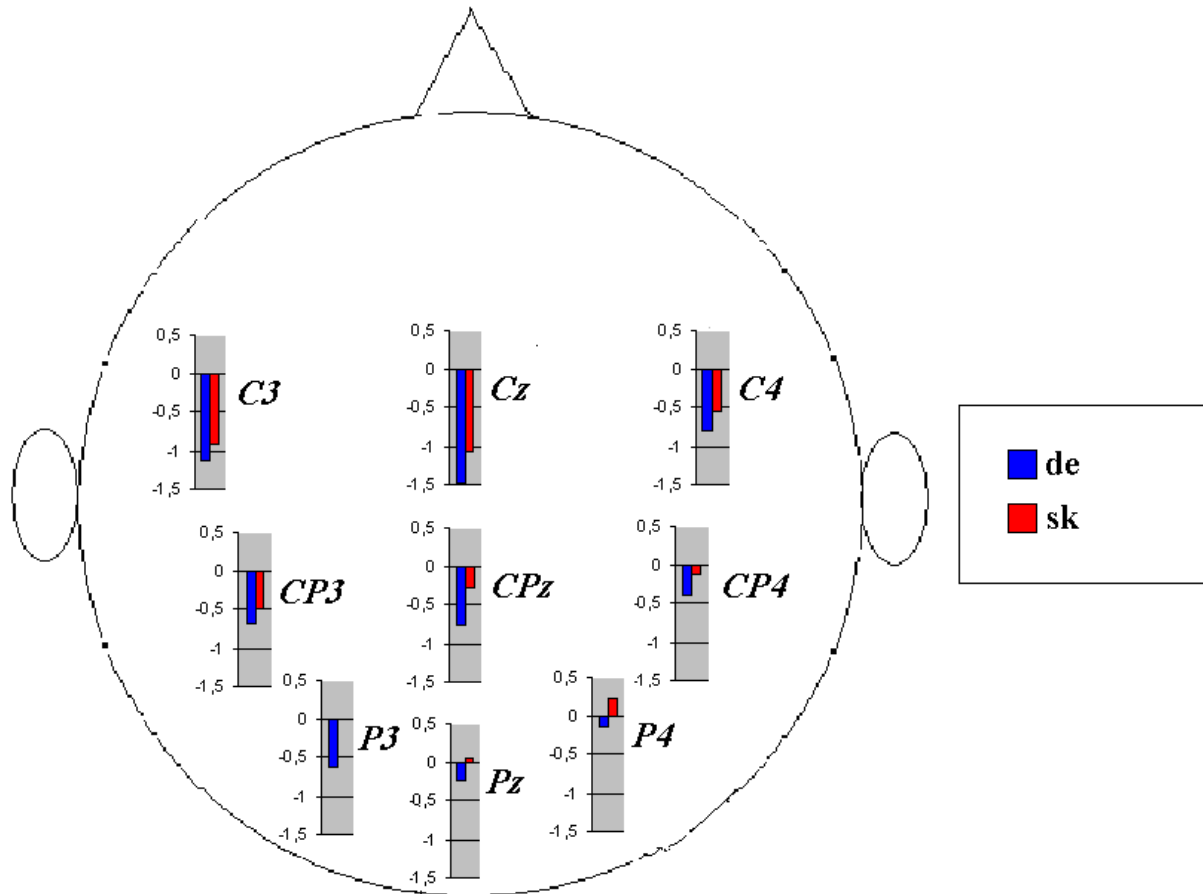
## 4 Ergebnisse

### 4.1 ERP Daten

Die Daten der ERPs sind in Abbildung 16 bis 25 zu den verschiedenen Bedingungen dargestellt. Die Plots zeigen die elektrophysiologischen Antworten aller 22 teilnehmenden Probanden im Grand Average. Die dargestellten Plots wurden zur besseren Darstellung mit einem 8 Hz Filter gefiltert.

Abbildung 16 gibt einen Überblick über die Anordnung der Elektroden. Von den 59 Kopfelektroden sind in dieser Abbildung nur drei Mittellinienelektroden sowie sechs laterale Elektroden abgebildet. Diese Elektroden wurden ausgewählt, da sie im zentroparietalen Bereich liegen. In diesem Bereich wird die N400 Komponente erwartet (Kutas, Hillyard, 1980). Zur Darstellung der interessierenden Potentiale wurde die absolute Größe des Potentials über das Zeitfenster 450 ms bis 550 ms, das der N400 entspricht, bei jedem Probanden ermittelt. Danach wurden die Antworten der 22 am Versuch teilnehmenden Probanden auf die präsentierten legalen (deutschen) und illegalen (slowakischen) Pseudowörter in Adult directed speech und Infant directed speech für jede Elektrode gemittelt. Die Fehlerbalken zeigen den SEM. Die Graphik verdeutlicht, dass die Mittelwerte der Probanden auf die legalen (deutschen) Pseudowörter im Vergleich zu den illegalen (slowakischen) im Zeitfenster von 450 ms bis 550 ms deutlich negativer sind.

## Ergebnisse



**Abbildung 16:** Übersicht der Elektrodenanordnung über beiden Hemisphären. Es sind drei Mittellinienelektroden (Cz, Cpz und Pz), drei linkshemisphärische Elektroden (C3, CP3 und P3) sowie drei rechtshemisphärische Elektroden (C4, CP4 und P4) abgebildet. Die Säulendiagramme stellen die Mittelwerte im Zeitfenster von 450 bis 550 ms der 22 Probanden auf die präsentierten legalen (deutschen, de) und illegalen (slowakischen, sk) Wörter dar. Adult directed speech (ads) und Infant directed speech (ids) wurden gemittelt.

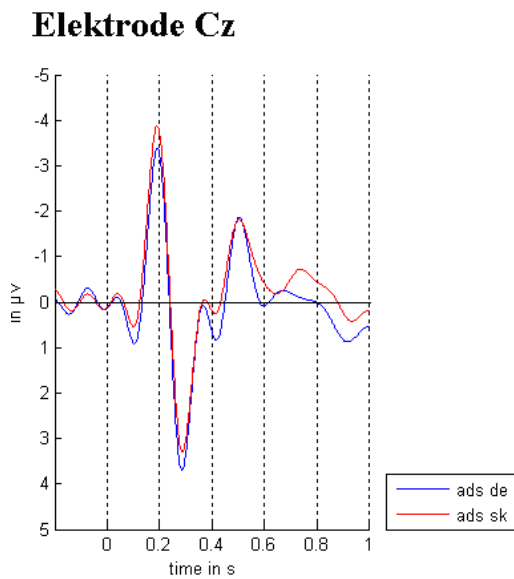
Im nächsten Schritt wurde über den interessierenden Elektroden der Zeitverlauf untersucht. Die folgenden Abbildungen 17 bis 25 erlauben den Vergleich zwischen legalen und illegalen Pseudowörtern über den Elektroden Cz, CPz und Pz. Weiterhin wird dieser Vergleich bei (i) nur Adult directed, (ii) nur Infant directed speech und (iii) einer Mittelung (Adult + Infant directed) dargestellt. Damit sollte geprüft werden, ob ein relevanter N400-Effekt bei der Präsentation von legalen deutschen Pseudowörtern auftritt. Weiterhin sollten die Ergebnisse die Frage klären, ob Adult directed speech zu anderen ERP-Korrelaten als Infant directed speech führt.

Es lässt sich für die Präsentation von legalen deutschen Pseudowörtern eine im Vergleich zu illegalen slowakischen Pseudowörtern relevante Negativierung zwischen 450 ms und 550 ms für die Elektroden Cz, CPz und Pz erkennen. Diese Negativierung ist bei der Präsentation von illegalen deutschen Pseudowörtern weniger ausgeprägt. Auf allen anderen Elektroden ließ sich keine signifikante Negativierung zwischen 450 ms und 550 ms bei der Verarbeitung legaler



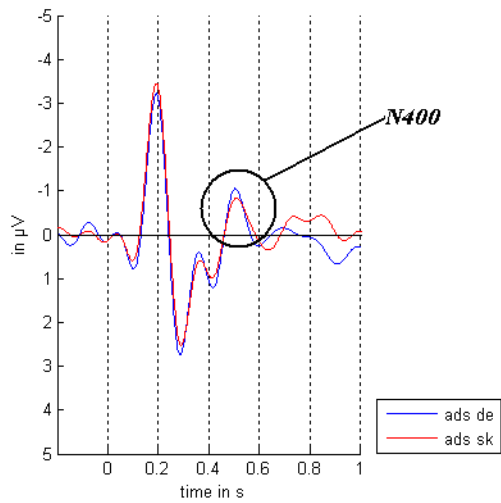
## Ergebnisse

deutscher Pseudowörter feststellen. Die Abbildungen 17 bis 25 liefern eine vergrößerte Darstellung der Elektroden Cz, CPz und Pz. Die Abbildungen 17, 18 und 19 zeigen das Grand Average nach der Präsentation von legalen und illegalen Pseudowörtern in Adult directed speech. Die Abbildungen 20, 21 und 22 stellen das Grand Average für die Reaktion auf legale und illegale Pseudowörter in Infant directed speech dar. In den Abbildungen 23, 24 und 25 sind die präsentierten legalen und illegalen Pseudowörter für Adult directed speech und Infant directed speech gemittelt worden.



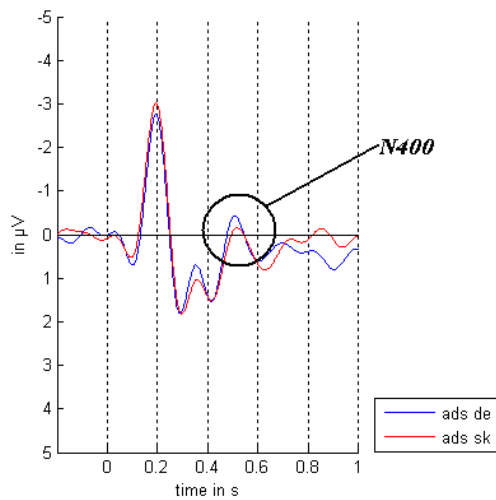
**Abbildung 17:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Cz (legale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech; ads de versus ads sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (ads de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (ads sk). Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

### Elektrode CPz



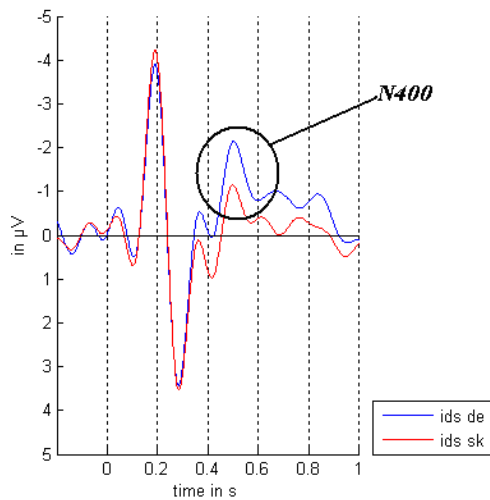
**Abbildung 18:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode CPz (legale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech; ads de versus ads sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (ads de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (ads sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

### Elektrode Pz



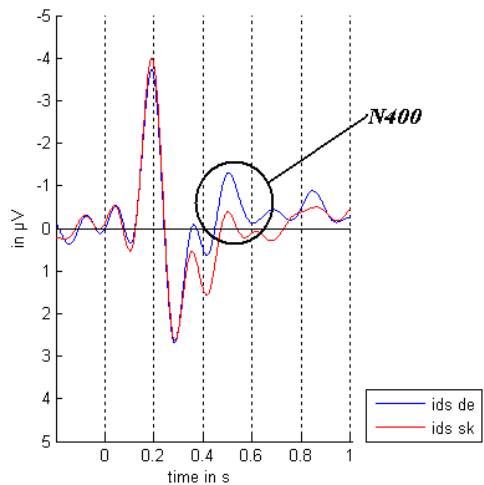
**Abbildung 19:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Pz (legale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech; ads de versus ads sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (ads de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (ads sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

### Elektrode Cz



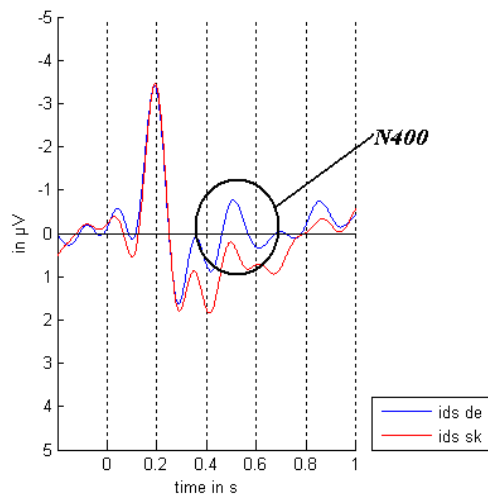
**Abbildung 20:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Cz (legale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech; ids de versus ids sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (ids de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (ids sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

### Elektrode CPz



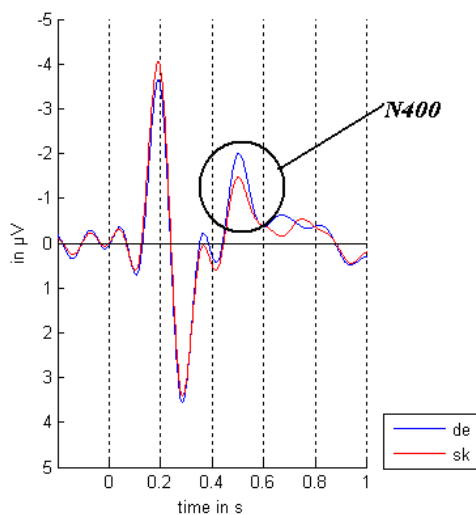
**Abbildung 21:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode CPz (legale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech; ids de versus ids sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (ids de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (ids sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

### Elektrode Pz



**Abbildung 22:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Pz (legale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech; ids de versus ids sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (ids de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (ids sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

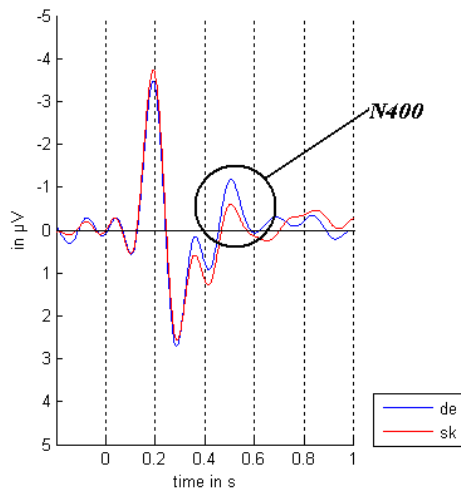
### Elektrode Cz



**Abbildung 23:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Cz (legale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt versus illegale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt; de versus sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

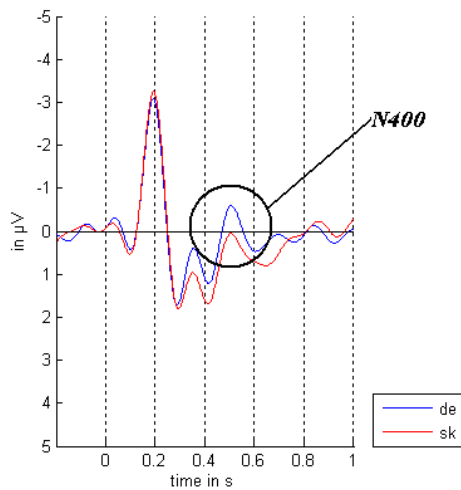
## Ergebnisse

### Elektrode CPz



**Abbildung 24:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode CPz (legale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt versus illegale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt; de versus sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

### Elektrode Pz



**Abbildung 25:** Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Pz (legale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt versus illegale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt; de versus sk). Dargestellt ist der Verlauf von 200 ms vor bis 1000 ms nach Präsentation des Pseudowortes. Die blaue Linie stellt die legalen deutschen Pseudowörter (de) dar und die rote Linie die illegalen deutschen Pseudowörter (sk). Die N400-Komponente ist schwarz umkreist. Negative Spannung ist im Graph mit einem Ausschlag nach oben dargestellt.

## Ergebnisse

Die statistische Auswertung der ERP Daten erfolgte mit dem Programm SPSS 15.

Die Tabellen 12 und 13 stellen die Ergebnisse der statistischen Berechnung im Einzelnen dar.

Für alle lateralen Elektroden zeigte die Varianzanalyse im Zeitfenster von 450 ms bis 550 ms nach Stimulus-Onset keine signifikanten Haupteffekte und Interaktionen zwischen den getesteten Faktoren.

Für die Mittellinienelektroden ergab die globale Analyse einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „condition“. Bei diesem Faktor handelt es sich um die präsentierten legalen bzw. illegalen Pseudowörter. Andere signifikante Effekte konnten nicht gefunden werden.

<i>Source</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech	1,21	3,360	,081
Condition	1,21	1,402	,250
Hemisphere	1,21	3,184	,089
Laterality	1,21	,540	,470
Region	2,42	29,934	,000
speech * condition	1,21	,489	,492
condition * hemisphere	1,21	,023	,880
speech * condition * hemisphere	1,21	,631	,436
condition * laterality	1,21	2,632	,120
speech * condition * laterality	1,21	2,395	,137
condition * hemisphere * laterality	1,21	,706	,410
speech * condition * hemisphere * laterality	1,21	,774	,389
condition * region	2,42	,525	,567
speech * condition * region	2,42	,173	,702
condition * hemisphere * region	2,42	,355	,680
speech * condition * hemisphere * region	2,42	1,475	,242
condition * laterality * region	2,42	1,118	,320
speech * condition * laterality * region	2,42	,827	,394
condition * hemisphere * laterality * region	2,42	,688	,468
speech * condition * hemisphere * laterality * region	2,42	,956	,360

**Tabelle 12:** ANOVAs der ERP Daten im Zeitfenster von 450 bis 550 ms nach Stimulus-Onset für die lateralen Elektroden. Folgende „Regions of interest“ (ROIs) gingen in die Berechnung ein: links anterior innen (F3, FC3), rechts anterior innen (F4, FC4), links zentral innen (C3, CP3), rechts zentral innen (C4, CP4), links posterior innen (P3, PO3), rechts posterior innen (P4, PO4), links anterior außen (F5, FC5), rechts anterior außen (F6, FC6), links zentral außen (C5, CP5), rechts zentral außen (C6, CP6), links posterior außen (P5, PO7) und rechts posterior außen (P6, PO8).

Die Tabelle zeigt die Ergebnisse einer allgemeinen ANOVA für die Faktoren speech \* condition \* hemisphere \* laterality \* region.

## Ergebnisse

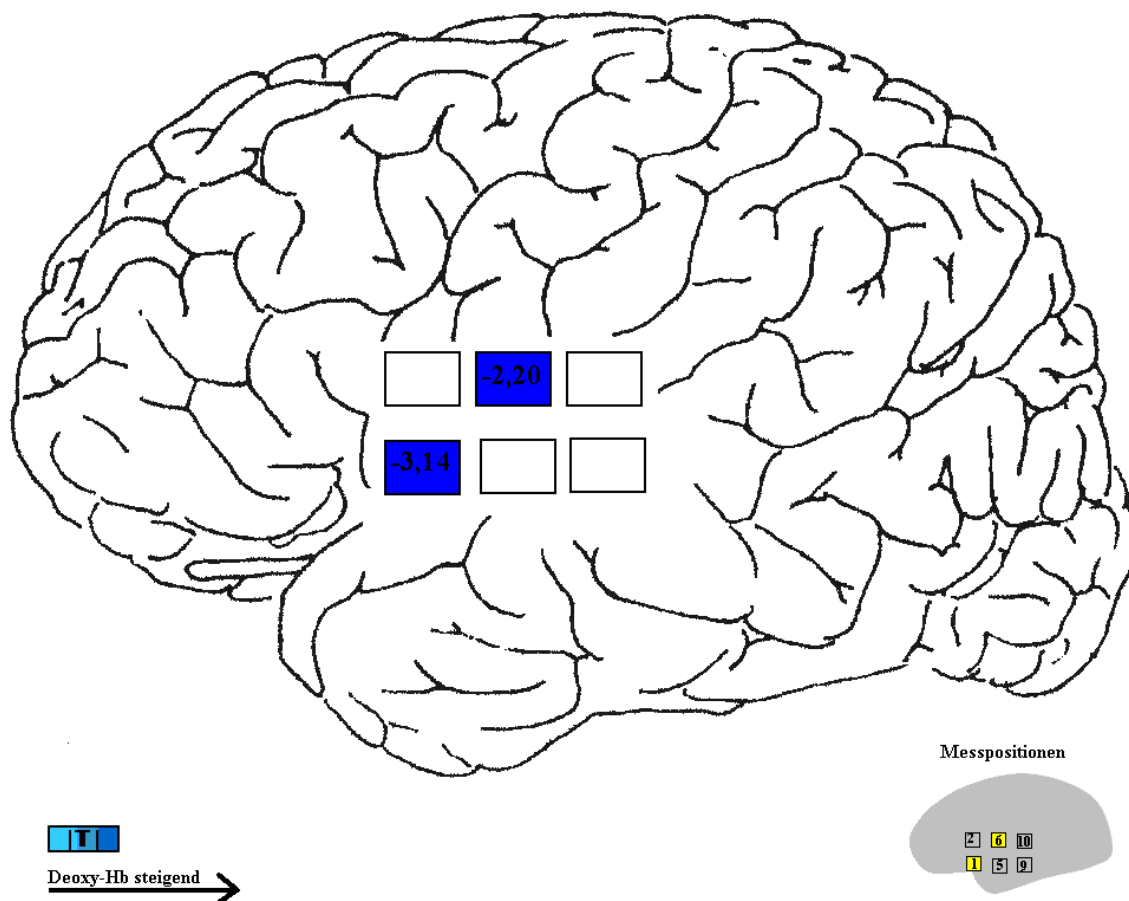
<i>Source</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Speech	1,21	,128	,725
Condition	1,21	5,072	<b>,035</b>
Electrode	2,42	31,907	,000
speech * condition	1,21	2,849	,106
condition * electrode	2,42	,392	,593
speech * condition * electrode	2,42	,599	,481

**Tabelle 13:** ANOVAs der ERP-Daten im Zeitfenster von 450 bis 550 ms nach Stimulus-Onset für die Mittellinienelektroden. Folgende Elektroden gingen in die Berechnung ein: Cz, CPz, Pz (Mittellinienelektroden). Die Tabelle zeigt die Ergebnisse einer allgemeinen ANOVA für die Faktoren speech \* condition \* electrode.

## 4.2 NIRS Daten

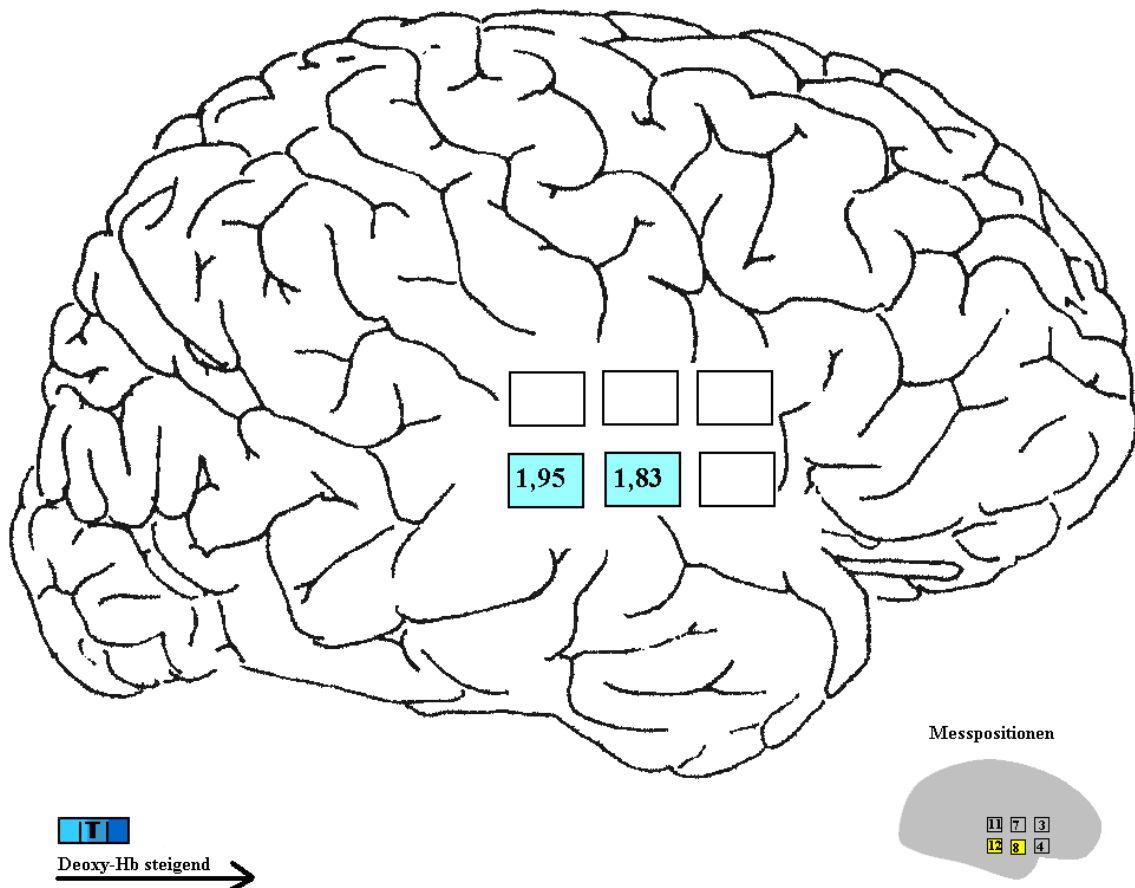
Die Ergebnisse der NIRS Messungen für die verschiedenen Bedingungen sind in Abbildung 26 bis 29 dargestellt.

Abbildung 26 und 27 verdeutlichen die Anordnung der Messpositionen über der linken und der rechten Hemisphäre. In diese Abbildungen sind weiterhin die signifikanten  $t$ -Werte der ereigniskorrelierten Änderungen des deoxy-Hb auf der linken bzw. rechten Hemisphäre dargestellt. Bei den  $t$ -Werten der rechten Hemisphäre handelt es sich um marginal signifikante Werte. In Abbildung 26 lassen sich für die Messpositionen 1 und 6 signifikante  $t$ -Werte darstellen. In Abbildung 27 zeigen sich zwei marginal signifikante  $t$ -Werte für die Messposition 8 und 12.



**Abbildung 26:** Darstellung der signifikanten  $t$ -Werte für die linke Hemisphäre. Die signifikanten Werte sind an der zutreffenden Messposition eingetragen und blau unterlegt.



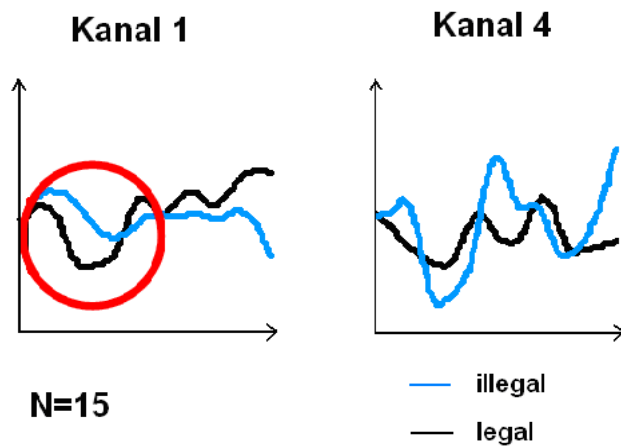


**Abbildung 27:** Darstellung der signifikanten  $t$ -Werte für die rechte Hemisphäre. Die marginal signifikanten Werte sind an der zutreffenden Messposition eingetragen und hellblau unterlegt.

Die in Abbildung 28 dargestellten Plots zeigen die Oxygenierungsantworten der 15 teilnehmenden Probanden im Grand Average für die verschiedenen Bedingungen für die Kanäle 1 und 4. Diese Kanäle befinden sich fronto-temporal links (Kanal 1) bzw. rechts (Kanal 4). Die Abbildung wurde ausgewählt um am Beispiel von Kanal 1 und 4 den Zeitverlauf der Oxygenierungsantworten auf die Präsentation von legalen und illegalen Pseudowörtern zu verdeutlichen. Abbildung 28 stellt die Zeitverläufe der Konzentrationsveränderungen im deoxy-Hämoglobin [deoxy-Hb] für die Bedingung legale (deutsche) Pseudowörter versus illegale (slowakische) Pseudowörter an den Messpositionen 1 und 4 für beide Spracharten (Adult directed speech und Infant directed speech gemittelt) dar. Es lässt sich für Kanal 1 ein stärkerer Abfall des deoxygenierten Hämoglobins als Indikator einer stärkeren Aktivierung der linken Hemisphäre für die phonotaktisch legalen im Gegensatz zu den phonotaktisch illegalen Wörtern erkennen. Für die rechte Hemisphäre (Kanal 4) stellt sich kein Unterschied der

## Ergebnisse

Oxygenierungsänderung für phonotaktisch legale im Vergleich zu phonotaktisch illegalen Pseudowörtern dar.



**Abbildung 28:** Grand Average NIRS für die Kanäle 1 und 4 (legale versus illegale Pseudowörter, Adult und Infant directed speech gemittelt). Kanal 1 befindet sich links fronto-temporal inferior und Kanal 4 befindet sich rechts fronto-temporal inferior. Die rote Markierung umkreist die nur auf der linken Hemisphäre auftretende Aktivierung für legale im Gegensatz zu illegalen Pseudowörtern. Die schwarze Linie stellt die legalen Pseudowörter dar und die blaue Linie die illegalen Pseudowörter.

Legale Pseudowörter (deutsche Pseudowörter) führten im Gegensatz zu illegalen Pseudowörtern (slowakische Pseudowörter) zu einem Absinken der linkshemisphärischen [deoxy-Hb]-Konzentration. Rechtshemisphärisch ließ sich keine absinkende [deoxy-Hb]-Konzentration feststellen. Die Abnahme der deoxy-Hb Konzentration resultiert aus einem vermehrten „Auswaschen“ des lokal anfallenden deoxy-Hb bei gesteigertem regionalen zerebralen Blutfluß. Die Tabellen 14 bis 17 stellen die statistischen Berechnungen der NIRS-Daten dar.

<i>Source</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
condition	1,14	,317	,582
condition * hemisphere	1,14	5,247	<b>,038</b>
condition * region	1,14	,801	,393
condition * hemisphere * region	2,22	,906	,397
speech	1,14	,649	,434
speech * condition	1,14	1,724	,210
speech * condition * hemisphere	1,14	1,132	,305
speech * condition * hemisphere * region	1,15	1,197	,298

**Tabelle 14:** ANOVA der NIRS Daten (legale versus illegale Pseudowörter). Die Tabelle zeigt die Ergebnisse einer allgemeinen ANOVA mit den Faktoren condition \* hemisphere \* region.

## Ergebnisse

Die globale ANOVA für legale versus illegale Pseudowörter zeigt eine signifikante Interaktion der Bedingungen „condition“ und „hemisphere“. Die Signifikanz betrug  $p = ,038$ .

Aufgrund der Ergebnisse der ANOVA wurden gepaarte  $t$ -tests für beide Hemisphären separat durchgeführt.

<i>legale Pseudowörter (deutsch; ads und ids gemittelt) versus illegale Pseudowörter (slowakisch; ads und ids gemittelt)</i>	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
linke Hemisphäre	14		<b>,077</b>
rechte Hemisphäre	14		,132

**Tabelle 15:** Ergebnisse des  $t$ -tests für die NIRS Daten (legale versus illegale Pseudowörter; ads und ids gemittelt).

Der  $t$ -test mit den Bedingungen legale versus illegale Pseudowörtern sollte vergleichen wie stark die Stimuli linkshemisphärisch oder rechtshemisphärisch verarbeitet werden. Es ergab sich eine marginal signifikante Interaktion zwischen den legalen Pseudowörtern und der Verarbeitung auf der linken Hemisphäre von  $p = ,077$ . Um diesen Effekt genauer zu lokalisieren wurden weitere  $t$ -tests für jeden einzelnen Kanal für die Bedingung legale versus illegale Pseudowörter erstellt.

<i>legale Pseudowörter (deutsch; ads und ids gemittelt) versus illegale Pseudowörter (slowakisch; ads und ids gemittelt)</i>	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Kanal 1 linke Hemisphäre	14		<b>,007</b>
Kanal 2 linke Hemisphäre	14		,389
Kanal 3 rechte Hemisphäre	14		,228
Kanal 4 rechte Hemisphäre	14		,331
Kanal 5 linke Hemisphäre	14		,323
Kanal 6 linke Hemisphäre	14		<b>,046</b>
Kanal 7 rechte Hemisphäre	14		,220
Kanal 8 rechte Hemisphäre	14		,088
Kanal 9 linke Hemisphäre	14		,335
Kanal 10 linke Hemisphäre	14		,248
Kanal 11 rechte Hemisphäre	14		,480
Kanal 12 rechte Hemisphäre	14		,071

**Tabelle 16:** Ergebnisse der  $t$ -tests für die NIRS Daten für jeden Kanal einzeln (legale versus illegale Pseudowörter; Adult directed speech (ads) und Infant directed speech (ids) gemittelt).

## Ergebnisse

Die *t*-tests zeigen signifikante Interaktionen für legale versus illegale Pseudowörter für die Kanäle 1 und 6, die sich beide auf der linken Hemisphäre befinden. Weiterhin zeigen sich tendenzielle Interaktionen für illegale versus legale Pseudowörter für die Kanäle 8 und 12, die rechtshemisphärisch liegen.

Bezüglich der Fragestellung ergab die statistische Auswertung der NIRS-Daten eine signifikant stärkere Verarbeitung legaler deutscher Pseudowörter für die Messpositionen 1 und 6.

Weiterhin ergab sich eine tendenziell verstärkte Verarbeitung von illegalen slowakischen Pseudowörtern für die rechte Hemisphäre. Es konnte keine unterschiedliche Verarbeitung der Pseudowörter in Adult directed speech und Infant directed speech festgestellt werden.

## 5 Diskussion

Das Hauptziel der Studie war es neuronale Korrelate phonotaktischer Informationen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde ein Versuchsdesign entwickelt, welches die neuronale Verarbeitung von unterschiedlich konstruierten Pseudowörtern (legal und illegal) bei deutschen Muttersprachlern testet. Zur Messung der neuronalen Korrelate von Sprachverarbeitung dienen in dieser Studie das elektrophysiologische Verfahren der Ereignis-korrelierten Potentialen (event-related potentials; ERPs) sowie die Nahinfrarotspektroskopie, die Änderungen der kortikalen Oxygenierung erfasst.

### 5.1 *Interpretation der ERP-Daten*

#### 5.1.1 **Korrelate der phonotaktischen Verarbeitung**

Mit der Aufzeichnung von ERPs zielte diese Studie darauf, elektrophysiologische Korrelate der Sprachverarbeitung zu finden. Akustisch präsentiert wurden während der Aufzeichnung eines EEGs Pseudowörter. Zur einen Hälfte entsprachen diese den phonotaktischen Regeln des Deutschen (legale Pseudowörter). Zur anderen Hälfte folgten sie nicht den Regeln des Deutschen (illegale Pseudowörter), waren jedoch nach den Regeln des Slowakischen konstruiert. Das Ziel dieses Versuchsaufbaus war es, Verarbeitungsprozesse darzustellen, die sich durch spezielle elektrophysiologische Komponenten ausdrücken. Wichtigster Vertreter der phonotaktischen und semantischen Verarbeitung ist die N400, bei der es sich um eine zentroparietale Negativierung handelt. Bisherige Studien fanden zum größten Teil eine N400, wenn die Probanden mit semantischer oder phonotaktischer Verarbeitung beschäftigt waren. Auch mit diesem Versuchsdesign konnte eine N400 festgestellt werden. Die N400 war zentral über dem posterioren Teil der Mittellinie zu finden. Wurden einzelne Elektroden betrachtet, so ergab sich eine signifikante N400 für die Elektroden CPz und Pz, wobei die N400 über der Pz Elektrode deutlich stärker war. Es gab keine lateralen Lokalisationen der N400, wie es in anderen Studien der Fall war (Bentin et al. 1999; Friedrich, Friederici 2005), weshalb eine Beschreibung von Hemisphärenunterschieden nicht erfolgen kann. Es zeigte sich eine N400 Differenz bei dem Vergleich von phonotaktisch legalen und illegalen Pseudowörtern. Die N400 war deutlich geringer bei der neuronalen Verarbeitung von illegalen phonotaktischen Wörtern, im Vergleich zu der N400 bei legalen Pseudowörtern. Die gefundene Negativierung stellt eine N400 dar, wie

sie allgemein in Paradigmen der semantischen Passung oder der phonotaktischen Verarbeitung vorkommt. Die hier aufgezeichnete N400 begann bei 450 ms bis 550 ms und entsprach in ihrer Morphologie den N400 Komponenten anderer Studien (z.B. Kutas, Hillyard 1980; Friedrich, Pfeiffer, Hahne 1993; Friedrich, Friederici 2005).

Die Phonotaktik wird als Teil der Sprache neuronal erfasst und verarbeitet. Bisherige Studien legen nahe, dass phonotaktische Regeln erst frühestens sechs Monate postnatal erlernt werden (Mugitani et al. 2007, Kajikawa et al. 2006; Friedrich, Friederici 2005), jedoch bei Erwachsenen einer Sprachgemeinschaft ähnliche neuronale Korrelate hervorrufen. Die Ergebnisse dieser Studien differieren in Bezug auf das Lebensalter mit welchem Kinder in der Lage sind verschiedene phonotaktische Eigenschaften zu diskriminieren. Eine Studie an 6, 12 und 18 Monate alten japanischen Kindern (Mugitani et al. 2007) kommt zu dem Schluss, dass Kinder mit 12 und 18 Monaten in der Lage waren kanonische, d.h. reale japanische Wörter von nicht kanonischen, jedoch phonotaktisch legalen Pseudowörtern zu unterscheiden. Dies war Kindern im Alter von sechs Monaten noch nicht möglich. Jedoch gelang es den Kindern in allen drei Altersklassen nicht phonotaktisch legale von phonotaktisch illegalen Wörtern zu differenzieren. Eine vergleichbare deutsche ERP-Studie (Friedrich, Friederici 2005) wurde an 12 und 19 Monate alten Kindern sowie an Erwachsenen durchgeführt um Mechanismen phonotaktischer Verarbeitung näher zu beleuchten. Diese Studie ergab eine ähnliche Verarbeitung von phonotaktischen Stimuli bei 19 Monate alten Kindern sowie Erwachsenen. Bei beiden Gruppen fand sich eine N400 für legale Pseudowörter, während die N400 für illegale Pseudowörter deutlich geringer war. Eine noch stärkere N400 Differenz ergab sich für den Vergleich von legalen Pseudowörtern und realen Wörtern, die zu einem passenden Bild präsentiert wurden. Kinder im Alter von 12 Monaten hingegen zeigten keine N400 Differenz zwischen legalen und illegalen Pseudowörtern, sondern lediglich eine frühe, frontale Negativierung bei Exposition mit legalen Pseudowörtern. Dieser Effekt wird als „phonotactic familiarity effect“ bezeichnet und zeigt sich auch in der ERP- Aufzeichnung bei 19 Monate alten Kindern, jedoch nicht bei der erwachsenen Vergleichsgruppe. Die frühe Negativierung bei Kindern wird als Vorläuferkomponente einer erwachsenen N400 interpretiert.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen ebenfalls eine deutliche, allerdings nur zentral lokalisierte N400 bei legalen (deutschen) Pseudowörtern, während dieser Effekt bei illegalen (slowakischen) Pseudowörtern deutlich geringer war. Es liegt nahe, dass die phonotaktisch legalen Eigenschaften der deutschen Pseudowörter in diesem Experiment dazu führten, dass eine

## Diskussion

neuronale Integration stattfand. Es wird angenommen, dass phonotaktisch legale Pseudowörter erwachsene Probanden dazu veranlassen, diese Pseudowörter lexikalisch zu aktivieren und möglicherweise teilweise zu integrieren. Die vollständige Integration in einen den Versuchspersonen bekannten lexikalischen Zusammenhang bleibt jedoch unmöglich, da die präsentierten Pseudowörter zwar nach den phonotaktischen Regeln des Deutschen aufgebaut sind, jedoch keine realen, den Probanden bekannte Wörter sind. Dieser Prozess löst im ERP eine N400 Komponente aus. Im Gegensatz dazu führt ein illegaler, nicht deutscher Onset eines Pseudowortes zu einer geringeren lexikalischen Aktivierung, da die präsentierten Konsonantencluster unbekanntes phonotaktischen Regeln folgen. Es wird angenommen, dass ein illegales Onset-Cluster bei den deutschen Probanden eine neuronale lexikalische Deutung verhindert. Durch die in der Muttersprache nicht vorhandenen Konsonantencluster am Anfang eines Wortes wird eine neuronale lexikalische Aktivierung erschwert und folglich die N400 abgeschwächt. Diese Ergebnisse sind kongruent zu der oben erwähnten Studie von Friedrich und Friederici (2005).

Die eingeschränkte Lokalisation der N400 auf den posterioren Anteil der Mittellinie lässt sich zum einen durch die alleinige Präsentation von Pseudowörtern ohne Präsentation von realen, deutschen Wörtern erklären. Auch in dem Experiment von Friedrich und Friederici (2005) ließ sich eine leicht abgeschwächte N400 Differenz von legalen und illegalen Pseudowörtern im Vergleich zu legalen Pseudowörtern und zu einem passenden Bild präsentierten realen Wörtern feststellen. Dies deutet darauf hin, dass die N400 Differenz zwischen legalen und illegalen Pseudowörtern geringer ist als zwischen Pseudowörtern und realen, deutschen Wörtern. Zum anderen wurde in dieser Studie keine Aufgabe an die Probanden gestellt. Vielmehr mussten die Probanden der Präsentation der Pseudowörter lediglich konzentriert folgen. Es ist jedoch möglich, dass eine konkrete Aufgabenstellung die Konzentration der Probanden erhöht und so die neuronalen Verarbeitungsmechanismen der präsentierten Pseudowörter klarer elektrophysiologisch darstellt. Studien, wie von Friederici, Pfeifer, Hahne (1993), Bentin et al. (1999) und Friedrich, Friederici (2005) verfügten über ein Versuchsdesign mit Aufgabenstellung (z.B. in Friederici, Pfeifer, Hahne 1993 wurde eine Bewertungsaufgabe verwendet). Die weitere Ausdehnung der N400 über den gesamten zentroparietalen Bereich, wie er durch jene Studien beschrieben wird, kann möglicherweise auch durch eine höhere Konzentration bedingt sein. Es ist anzunehmen, dass die in dieser Studie nur über dem Bereich des zentralen, posterioren

Hirnareals vorhandene N400 durch verminderte Konzentration weniger weit über dem Kortex ausgedehnt blieb.

### 5.1.2 Die Verarbeitung von Infant directed speech und Adult directed speech

Infant directed speech (ids) ist eine Sprachform, die sich insbesondere durch die erhöhte Intonation von Adult directed speech (ads) unterscheidet. Dieser Sprachstil weist eine hohe Tonhöhe, häufiges Gleiten zwischen Tonhöhen sowie eine überbetonte Dehnung der Vokale, insbesondere von /a/ und /u/ auf. Zahlreiche Verhaltensstudien konnten bisher belegen, dass Infant directed speech von Neugeborenen und Kindern bevorzugt wird (Werker, McLeod 1989, Cooper, Aslin 1990, Cooper, Aslin 1994, Hayashi et al 2001) und Kindern beim Erwerb von phonetischen, semantischen und lexikalischen Eigenschaften ihrer Muttersprache hilft (Kuhl et al 1997, Trainor, Desjardins 2002, Werker et al 2007). Auch mittels ERP-Studien und optisch, topographischen Studien konnten verstärkte Hirnaktivierungen bei Kindern, die Infant directed speech hörten festgestellt werden (Saito et al 2007, Santesso et al 2007).

Bei Erwachsenen wurde Infant directed speech bisher selten experimentell untersucht und es ist bisher nicht eindeutig geklärt, ob Infant directed speech auch die Sprachverarbeitung und den Spracherwerb von Erwachsenen beeinflusst. Eine Studie von Golinkoff und Alioto (1995) untersuchte mittels eines Lernexperiments den Einfluss von Infant directed speech auf das lexikalische Lernen von Chinesisch bei englischsprachigen Erwachsenen. Diese Studie kommt zu dem Schluss, dass Erwachsene ein Zielwort in einem unbekanntem chinesischem Satz erkannten, wenn dieses ihnen vorher in Infant directed speech präsentiert worden war, jedoch nicht, wenn das Zielwort in Adult directed speech präsentiert wurde. Eine weitere Studie von Bryant und Barrett (2007) kommt lediglich zu dem Ergebnis, dass Erwachsene Adult directed speech und Infant directed speech auch in einer ihnen fremden Sprache unterscheiden können. Diese Studie liefert jedoch keinen Hinweis zu einer verbesserten oder veränderten Sprachverarbeitung durch Präsentation von Wörtern in Infant directed speech bei Erwachsenen.

Die durch dieses Experiment gewonnenen ERP-Daten, lassen keinen Rückschluss auf eine verbesserte Sprachverarbeitung von Pseudowörtern bei Erwachsenen zu. Es zeigte sich kein signifikanter, elektrophysiologischer Unterschied in der Verarbeitung von Pseudowörtern, dargeboten in Infant directed speech bzw. Adult directed speech. Weiterhin wurde keine Hemisphärendifferenz in der Verarbeitung von Infant directed speech und Adult directed speech bei Erwachsenen festgestellt. Die gefundenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass Erwachsene



Infant directed speech und Adult directed speech zwar differenzieren können, jedoch nicht unterschiedlich neuronal verarbeiten. Legale und illegale Pseudowörter werden von Erwachsenen in beiden Sprachstilen von den entsprechenden elektrophysiologischen Korrelaten (N400) verarbeitet. Es zeigte sich keine signifikant bessere oder schnellere Verarbeitung von legalen oder illegalen Pseudowörtern, wenn diese in Infant directed speech dargeboten wurden. Die Sprachverarbeitung von Pseudowörtern in Infant directed speech und Adult directed speech stellte sich bei Erwachsenen in diesem Experiment als gleich dar. Eine mögliche Erklärung für die Ergebnisse ist eine für Erwachsene im Gegensatz zu Kindern nicht mehr bestehende Präferenz für Infant directed speech. Es ist denkbar, dass Erwachsene auf keine Überbetonung von Dehnung von Vokalen angewiesen sind um Pseudowörter neuronal zu verarbeiten, da sie bereits über ein gefestigtes Wissen von phonotaktischen sowie syntaktischen Eigenschaften ihrer Muttersprache verfügen.

## **5.2 Interpretation der NIRS Daten**

### **5.2.1 Korrelate der phonotaktischen Verarbeitung**

Die Nahinfrarotspektroskopie erfolgt parallel zur Ableitung des EEGs, weshalb die präsentierten Stimuli dieselben waren. Bei diesen Stimuli handelte es sich um legale (deutsch) und illegale (slowakische) Pseudowörter, die einmal in Infant directed speech (ids) und einmal in Adult directed speech (ads) dargeboten wurden. Alle in die Datenauswertung eingeschlossenen Versuchspersonen waren Rechtshänder und hatten während der Aufnahme des NIRS keine andere Aufgabe zu erfüllen, als den präsentierten Pseudowörtern konzentriert zuzuhören. Mit der Durchführung der Nahinfrarotspektroskopie zielte die Studie auf die Darstellung von Lateralisierungseffekten in der Sprachverarbeitung ab. Es sollte untersucht werden, ob schnell variierende, phonotaktische Sprachreize nach der Asymmetric sampling in time (AST)- Theorie (Poeppel 2003) wie erwartet in die neuronale Verarbeitungsgruppe des kurzen Zeitfensters fallen und somit linkshemisphärisch verarbeitet werden. Die Übergänge von einzelnen Phonemen und die Kombination von Konsonanten erfolgten im Stimulusmaterial dieser Studie innerhalb einer Zeitspanne von 20- 40 ms. Sie gehören damit zu den schnellen Sprachreizen, die nach der AST-Theorie auf der dominanten Sprachhemisphäre (in diesem Fall links, da am Experiment nur Rechtshänder teilnahmen) verarbeitet werden. Mittels der NIRS gelang es in diesem Experiment

## Diskussion

eine signifikante Dominanz für die Verarbeitung von legalen Pseudowörtern auf der linken Hemisphäre festzustellen. Zwei Kanäle der linken Hemisphäre (Kanal 1 und 6) zeigten eine deutliche Signifikanz für die linkshemisphärische Verarbeitung der legalen Pseudowörter. Kanal 1 befand sich über dem fronto-temporalen inferioren Kortex, während Kanal 6 über dem temporal superioren Kortex abgeleitet wurde (siehe Abbildung 14, Seite 36). Für illegale Pseudowörter bestand keine Signifikanz für eine linkshemisphärische Verarbeitung. Es zeigten sich jedoch marginal signifikante Ergebnisse für die rechtshemisphärische Verarbeitung von illegalen Pseudowörtern. Insbesondere Kanal 8 und 12 deuten auf eine tendenziell verstärkte rechtshemisphärische Verarbeitung von illegalen Pseudowörtern hin. Kanal 8 lag über dem temporal inferioren Kortex und Kanal 12 über dem temporo-parietalen inferioren Kortex (siehe Abbildung 15, Seite 37). Die hämodynamische Antwort auf die präsentierten Stimuli lag im vorher durch andere Studien (Villringer 2000, Obrig et al 2003, Zhang et al 2005) bestätigten und somit erwarteten Zeitfenster von 2 bis 16 Sekunden mit einem Höhenpunkt bei ca. 6 Sekunden. Weiterhin entsprach die hämodynamische Antwortfunktion dieses Experiments in ihrer Morphologie ebenfalls den hämodynamischen Antwortfunktionen der oben erwähnten Studien.

Zahlreiche Studien mit bildgebenden Verfahren konnten erfolgreich zeigen, dass sprachliche Verarbeitung im Vergleich zur Verarbeitung von Musik mit einer Lateralisierung verschiedener Areale, insbesondere der auditorischen Cortices, der linken Hemisphäre einhergeht (für einen Überblick vgl. z.B. Tervaniemi & Hugdahl, 2003). Des Weiteren führten Zatorre und Kollegen (Zatorre, Belin 2001, Zatorre, Belin, Penhune, 2002, Schönwiesner, Rübsamen, von Cramon 2005) einen weiteren Aspekt ein, der für Lateralisierungseffekte relevant ist. Sie postulierten, dass temporale Eigenschaften von Sprachinput mehr die linke Hemisphäre und spektrale Eigenschaften mehr die rechte Hemisphäre in Anspruch nehmen. In einer etwas anderen aber kongruenten Betrachtungsweise postulierte Poeppel (Poeppel 2003, Boemio et al 2005), dass schnelle temporale Variationen (20-40 ms) eine erhöhte Aktivierung in der linken Hemisphäre und langsamere Variationen (150-300 ms) eine stärkere Aktivierung in der rechten Hemisphäre mit sich führen. Zur neuronalen Verarbeitung von phonotaktischen Stimuli existieren bislang wenige bildgebende Studien. Ein Experiment von Majerus et al (2005) vergleicht die Verarbeitung von realen Wörtern und legalen Pseudowörtern mit hochfrequenten bzw. niederfrequenten phonotaktischen Variationen mittels fMRT. Weiterhin wurde die Gehirnaktivität nach Gewöhnung durch mehrfaches Wiederholen der Wörter und Pseudowörter

## Diskussion

gemessen. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass reale Wörter, wie auch legale Pseudowörter zu einer Aktivierung im hinteren Teil des linken temporalen Gyrus sowie des bilateralen temporalen Pols und des mittleren temporalen Gyrus führen. Diese Aktivierung nimmt mit zunehmender Gewöhnung an die Stimuli ab.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie kommen ebenfalls zu einer verstärkten linkshemisphärischen Verarbeitung von legalen Pseudowörtern, jedoch hauptsächlich im fronto-temporal inferioren und temporal inferioren Bereich der linken Hemisphäre. Gemäß dem parameterspezifisch asymmetrischen Ansatz werden phonotaktische Eigenschaften eher linksdominant verarbeitet. Dies konnte mittels dieser Studie für legale Pseudowörter bestätigt werden. Auch nach der Ast-Theorie verfügten die hier präsentierten legalen Pseudowörter über eine schnelle temporale Variation und wurden wie angenommen linksdominant verarbeitet. Die linkshemisphärische phonotaktische Verarbeitung der legalen Pseudowörter kann jedoch auch als segmentaler Sprachverarbeitungsschritt nach dem „Dynamic dual pathway“-Modell von Friederici und Alter 2004 aufgefasst werden. Nach diesem Modell erfolgt die Verarbeitung von Sprache und ihren Eigenschaften (z.B. Phonotaktik, Semantik, Syntax) bevorzugt temporo-frontal linkshemisphärisch, während suprasegmentale Bestandteile (z.B. Prosodie, Musik) eher rechtshemisphärisch verarbeitet werden.

In dem hier durchgeführten Experiment zeigte sich eine marginal signifikante rechtshemisphärische Verarbeitung der illegalen Pseudowörter. Diese zeigte sich jedoch nur im inferioren temporalen und inferioren temporo-parietalen Bereich des rechten Kortex und auch dort nur tendenziell. Für die anderen gemessenen Regionen ließ sich weder eine linksdominante noch eine rechtsdominante Verarbeitung für illegale Pseudowörter feststellen. Eine mögliche Erklärung für die hier gewonnenen Resultate liefert der „Dynamic dual pathway“-Ansatz von Alter und Friederici (2004). Da die präsentierten Pseudowörter bereits in ihrem ersten Konsonantencluster eine illegale Kombination von Konsonanten enthielten, wurden sie in ihrer folgenden Verarbeitung als suprasegmentale Sprachinformation eher rechtsdominant verarbeitet und führten zu einer leichten Verminderung des Einbezugs der linken Hemisphäre. Im Gegensatz zu den legalen Pseudowörtern verfügten die illegalen Pseudowörter nicht über einen dem Deutschen ähnlichen phonotaktischen Aufbau. Wie vor der Durchführung des Versuchs angenommen, führte die mangelnde Bekanntheit der illegalen Pseudowörter im Vergleich zu legalen deutschen Wörtern zu einer geringeren Aktivierung der linken Hemisphäre. Einen Hinweis dafür, dass die illegalen Pseudowörter nicht komplett rechtshemisphärisch verarbeitet werden, sondern nur zu einer tendenziellen rechtshemisphärischen Verstärkung führen, liefert

die AST-Theorie nach Poeppel (2003). Denn trotz der enthaltenen phonotaktischen Verletzung innerhalb der illegalen Pseudowörter, verfügen diese dennoch über eine schnelle temporale Variation (20-40 ms), die nach der AST-Theorie zu einem vermehrten Ansprechen der linken Hemisphäre führt. Die in diesem Experiment präsentierten illegalen Pseudowörter sind zwar als solche im Deutschen phonotaktisch falsch, gehorchen jedoch den phonotaktischen Regeln des Slowakischen und variieren temporal im schnellen Zeitfenster.

Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen steht das Ergebnis einer aktuellen fMRT-Studie von Raettig und Kotz (2007). In dieser Studie konnten keine signifikanten Unterschiede in der Verarbeitung von legalen und illegalen Pseudowörtern gefunden werden. Jedoch konnten die Autoren nicht klar belegen, ob in ihrer Studie die illegalen Pseudowörter tatsächlich gleich verarbeitet werden wie die legalen Pseudowörter oder ob die in ihrem Experiment verwendeten illegalen Pseudowörter eine zu schwache phonotaktische Verletzung aufwiesen. Raettig und Kotz (2007) stellten fest, dass uneinheitliches phonotaktisches Material auch zu unterschiedlichen hemisphärischen Verarbeitungsmechanismen führt.

### **5.2.2 Die Verarbeitung von Infant directed speech und Adult directed speech**

Infant directed speech (ids) wurde in den letzten Jahren vermehrt auch durch bildgebende Verfahren an Kindern und Neugeborenen getestet (Dehaene-Lambertz, Houston 1998, Casey, de Haan 2002, Dehaene-Lambertz et al 2002, Pena et al 2003, Aslin, Mehler 2005, Saito et al 2007). Bisher gibt es jedoch keine Studie, die über eine erwachsene Vergleichsgruppe verfügt oder nur Erwachsene auf ihre neuronale Verarbeitung und kortikale Aktivierung durch Infant directed speech im Vergleich zu Adult directed speech (ads) testet.

Dieses Experiment präsentierte legale und illegale Pseudowörter sowohl in Adult directed speech als auch in Infant directed speech. Dabei zeigte sich keine signifikante Steigerung der Hirnaktivität in einer bestimmten Region oder auf einer Hemisphäre bei der Darbietung der Pseudowörter in Infant directed speech. Die neuronale Aktivierung durch Wörter in Infant directed speech und Adult directed speech stellt sich als gleich dar. Es ist anzunehmen, dass Erwachsene keine Überbetonung von Wörtern brauchen um phonotaktische Eigenschaften zu erkennen und zu verarbeiten. Diese Ergebnisse sind kongruent zu den ERP-Daten, die in diesem Experiment gefundenen wurden.

### 5.3 Kritik am Versuchsdesign

Die durchgeführte Studie kombinierte die Verfahren EEG und NIRS in einem parallel ablaufenden Versuchsdesign.

Insgesamt nahmen 25 Probanden am Versuch teil. Alle Probanden gehörten der Alterklasse zwischen 19 und 30 Jahren an. Interessant wäre in diesem Zusammenhang die Weiterführung des Experiments an anderen Altersklassen (z.B. Neugeborene, Drei-, Sechs-, 12-Monate alte Kinder, eventuell Schulkinder). Die Untersuchung an Kindern lässt nämlich zusätzlich zu der Beurteilung der bereits ausgebildeten neuronalen Strukturen auch die Veränderung dieser in der Entwicklungs- und Spracherwerbsperiode zu. Mit Hilfe des vorliegenden Versuchsdesigns gelang es lediglich bei Erwachsenen fertig ausgebildete Strukturen der phonotaktischen Verarbeitung zu untersuchen. Allerdings eignet sich das Versuchsdesign mit erwachsenen Probanden auch als Kontrollgruppe für folgende, bereits geplante Versuche mit Neugeborenen, Säuglingen und Kleinkindern.

Die bei diesem Versuch teilnehmenden Probanden gehörten alle einer Bildungsklasse an und verfügten mindestens über ein Abitur, teilweise zusätzlich auch über einen Hochschulabschluss. Für ein Probandenkollektiv, das der deutschen Bevölkerungsstruktur entspricht, wäre es nötig, auch Versuchsteilnehmer aus niedrigeren Bildungsschichten sowie ältere Versuchsteilnehmer in die Studie einzuschließen.

Ein weiterer Kritikpunkt ist die fehlende Aufgabe, die die Probanden während des Versuchs zu erfüllen hatten. Eine Entscheidungs- oder Bewertungsaufgabe führte in anderen Versuchen (Friederici, Pfeiffer, Hahne 1993, Friedrich, Friederici 2005) zu einer stärkeren elektrophysiologischen Antwort bezüglich der dargebotenen Stimuli. In diesem Versuch konnte hingegen eine N400-Komponente nur für die Mittellinie und nicht für den gesamten zentroparietalen Bereich festgestellt werden. Grund für die fehlende Aufgabenstellung war das Ziel die Studie auch an Kindern und sogar Säuglingen durchzuführen, die nicht in der Lage sind bestimmte Aufgabenstellungen durchzuführen. Um das Versuchsdesign sowohl für die Erwachsenen- als auch für die Kinderstudien konstant zu halten, wurde in dieser Studie auf eine konkrete Aufgabenstellung verzichtet. Die Ergebnisse aus der vorliegenden Studie sollten möglichst vergleichbar sein mit den Studien, die an Kindern geplant sind.

Für diese Studie kam erschwerend hinzu, dass die technischen Möglichkeiten der Nahinfrarotspektroskopie bisher noch eingeschränkt sind. Es ließ sich eine typische hämodynamische Antwortfunktion für phonotaktische Stimuli nachweisen und damit

## Diskussion

verifizieren, dass die NIRS prinzipiell für die Darstellung von akustisch präsentierten Sprachstimuli geeignet ist. Jedoch verfügt das NIR-Licht bisher nur über eine Eindringtiefe von 2 bis 3 cm bei Erwachsenen, was Aussagen über tiefer gelegene Hirnstrukturen nicht zulässt. Weiterhin weisen Erwachsene eine dickere Schädelkalotte sowie dichtere und dickere Haare auf als Kinder (Axelsson et al 2003), was zu einer geringeren Eindringtiefe des NIR-Lichtes bei Erwachsenen im Vergleich zu Kindern führt. Dass sich die Methode der NIRS für die Untersuchung von Aktivierungsunterschieden zwischen den beiden Hemisphären bei drei Monate alten Säuglingen und vier Jahre alten Kindern sehr gut eignet, konnten Homae et al. (2006) und Wartenburger et al. (2007) zeigen.

Für eine höherwertige Aussagekraft der NIRS bei Erwachsenen bedarf es einer technischen Verbesserung der Methode, die zurzeit im Mittelpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen steht.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Phonotaktik ist das jeder Sprache zugrunde liegende Regelmuster bestimmter Lautkombinationen. Jede Sprache verfügt über eigene phonotaktische Regeln (die Kombination der Buchstaben „fr“ ist im Deutschen beispielsweise möglich wie im Wort „Frage“, die Kombination der Buchstaben „rf“ ist allerdings nicht möglich.)

Zur näheren Erforschung der phonotaktischen Grundlagen von Sprache dient diese Studie, die das bislang wenig erforschte Gebiet der Phonotaktik in der Sprachforschung näher beleuchten will. Methodische Grundlagen für diese Studie sind die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) und die Elektroenzephalographie (EEG). Erstere Methode soll hauptsächlich dazu dienen Lateralisierungseffekte in der neuronalen Verarbeitung von Phonotaktik zu untersuchen, während das EEG, welches über eine sehr gute zeitliche Auflösung verfügt, Veränderungen zeigen soll, sobald phonotaktische Regeln neuronal erkannt und verarbeitet werden.

Folgende Ergebnisse können in der durchgeführten Studie festgehalten werden:

- *EEG/ERP*: Es kann eine zentral lokalisierte N400 Komponente bei der Verarbeitung von legalen (deutschen) Pseudowörtern gezeigt werden, die sich insbesondere auf die Elektroden Cz, CPz und Pz bezieht. Für illegale Pseudowörter kann nur eine weniger stark ausgeprägte N400 Komponente festgestellt werden.
- *EEG/ERP*: Bei den erwachsenen Probanden zeigt sich kein signifikanter Unterschied in der neuronalen Verarbeitung von Adult directed speech im Gegensatz zu Infant directed speech.
- *NIRS*: Es zeigt sich eine signifikante Interaktion zwischen der Verarbeitung von legalen (deutschen) Pseudowörtern und dem Abfall der [deoxy-Hb]-Konzentration auf der linken Hemisphäre. Dies spricht für eine verstärkte Aktivität der linken Hemisphäre beim Verarbeiten von legalen Pseudowörtern. Für die illegalen (slowakischen) Pseudowörter zeigen sich hingegen marginal signifikante Interaktionen für die rechtshemisphärische Verarbeitung.
- *NIRS*: Für die Verarbeitung von Adult directed speech und Infant directed speech zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der Verarbeitung und keine Lateralisierungseffekte.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Studie legt nahe, dass Erwachsene die in ihrer Muttersprache vorkommenden phonotaktischen Regeln anders verarbeiten als phonotaktische Regeln, die in dieser Sprache nicht vorkommen. Es kann gezeigt werden, dass legale phonotaktische Regeln zu einer verstärkten neuronalen Aktivierung führen, die bei illegalen Pseudowörtern ausbleibt. Weiterhin kann eine linkshemisphärische Dominanz für die Verarbeitung von legalen Pseudowörtern gezeigt werden, wie sie nach dem AST-Modell (Poeppel 2003) zu erwarten war.

Ein weiteres Ziel der Studie ist es zu untersuchen, ob Adult directed speech und Infant directed speech von erwachsenen Probanden unterschiedlich verarbeitet werden. Nach den in dieser Studie gewonnenen Ergebnissen ist dies nicht zu bestätigen.

Eine weitere sinnvolle Fortführung dieser Studie ist die Anwendung desselben Versuchsdesigns auf Kinder. Dabei bieten sich Studien an Neugeborenen, Säuglingen und Kleinkindern an, um den Verlauf der phonotaktischen Sprachentwicklung beurteilen zu können. Darüber hinaus wäre es bei der Untersuchung von Kindern auch möglich, die unterschiedliche Verarbeitung von Pseudowörtern in Adult directed speech und Infant directed speech zu bewerten.



## 7 Literaturverzeichnis

- Axelsson, S., Kjaer, I., Bjornland, T. et al. (2003). Longitudinal cephalometric standards for the neurocranium in Norwegians from 6 to 21 years of age. *Eur. J. Orthod.*, 25, 185-198.
- Aslin, R.N., Mehler, J. (2005). Near-infrared spectroscopy for functional studies of brain activity in human infants: promise, prospects, and challenges. *J. Biomed. Opt.*, 10, 11009.
- Bastiaansen, M.C., van Berkum, J.J., Hagoort, P. (2002). Event-related theta power increases in the human EEG during online sentence processing. *Neuroscience Letters*, 323, 13-16.
- Bastiaansen, M.C., van Berkum, J.J., Hagoort, P. (2002). Syntactic processing modulates the theta rhythm of the human EEG. *Neuroimage*, 17, 1479-1492.
- Belin, P. (1998). Lateralization of speech and auditory temporal processing. *J. Cogn. Neurosci.*, 10, 536-540.
- Bentin, S. (1995): Semantic processing and memory for attended and unattended words in dichotic listening: behavioral and electrophysiological evidence. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 21, 54-67.
- Bentin, S., Mouchetant-Rostaing, Y., Giard, M.H. et al. (1999). ERP manifestation of processing printed words at different psycholinguistic levels: Time course and scalp distribution. *J. Cogn. Neurosci.*, 11, 235-260.
- Besson, M. and Macar, F. (1987). An event-related-potential analysis of incongruity in music and other non-linguistic contexts. *Psychophysiology*, 24, 14-25.
- Binder, J., Frost, J., Hammeke, T. et al. (2000). Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cerebral Cortex*, 10, 512-528.
- Birbaumer, N., und Schmidt, R.F. (1996). *Biologische Psychologie* (3. Auflage). Springer Verlag Berlin.
- Boemio, A., Fromm, S., Braun, A. et al. (2005). Hierarchical and asymmetric temporal sensitivity in human auditory cortices. *Nat. Neurosci.*, 8, 389-395.
- Bryant, G.A., Barrett, H.C. (2007). Recognizing intentions in infant-directed speech: evidence for universals. *Psychology Science*, 18, 746-751.
- Casey, B.J., de Haan, M. (2002). Introduction: new methods in developmental science. *Dev. Sci.*, 5, 265-7.
- Cooper, R.P., Aslin, R.N. (1990). Preference for infant-directed speech in the first month after birth. *Child Development*, 61, 1584-1595.

## Literaturverzeichnis

- Cooper, R.P., Aslin, R.N. (1994). Developmental differences in infant attention to the spectral properties of infant-directed speech. *Child Development*, 65, 1663-1677.
- Dehaene-Lambertz, G., Houston, D. (1998). Faster orientation latencies toward native language in two-month-old infants. *Lang Speech*, 41, 21–43.
- Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., Hertz-Pannier, L. (2002). Functional neuroimaging of speech perception in infants. *Science*, 298, 2013–2015.
- Eimas, P.D. (1975). Auditory and phonetic coding of the cues for speech: Discrimination of the /r-l/ distinction by young infants. *Percept. Psychophys.*, 18, 341-347.
- Englund, K.T., Behne, D.M. (2005). Infant directed speech in natural interaction-Norwegian vowel quantity and quality. *Journal of Psycholinguistic Research*, 34, 259-280.
- Fiebach, C.J., Friederici, A.D., Müller, K. et al (2002). FMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 11–23.
- Friederici, A.D., Friedrich, M., Christophe, A. (2007). Brain responses in 4-month-old infants are already language specific. *Current biology*, 17, 1208-1211.
- Friederici, A.D. (2005). Neurophysiological markers of early language acquisition: from syllables to sentences. *Trends of cognitive science*, 9, 481-488.
- Friederici, A.D., Alter, K. (2004). Lateralization of auditory language functions: a dynamic dual pathway model. *Brain Lang.*, 89, 267-276.
- Friederici, A.D., Pfeifer, E., Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials during natural speech processing: Effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Cogn. Brain Res.*, 1, 183-192.
- Friederici, A.D. and Wessels, J.M. (1993). Phonotactic knowledge of word boundaries and its use in infant speech perception. *Percept. Psychophys.*, 54, 287-295.
- Friedrich, M. and Friederici, A.D. (2005). Phonotactic knowledge and lexical-semantic processing in one-year-olds: brain responses to words and nonsense words in picture contexts. *J.Cogn. Neurosci.*, 17, 1785-1802.
- Friedrich, M., Friederici, A.D. (2005). Lexical priming and semantic integration reflected in the ERP of 14-month-olds. *Neuroreport*, 16, 653-656.
- Friedrich, M., Friederici, A.D. (2005). Semantic sentence processing reflected in the event-related potentials of one- and two-year-old children. *Neuroreport*, 16, 1801-1804.
- Friedrich, M., Weber C., Friederici, A.D. (2004). Electrophysiological evidence for delayed mismatch response in infants at risk for specific language impairment. *Psychophysiology*, 41, 772-782.

## Literaturverzeichnis

- Friedrich, M., Friederici, A.D. (2004). N400-like semantic incongruity effect in 19-month-old infants: Processing known words in picture context. *J. Cogn. Neurosci.*, 16, 1465-1477.
- Golinkoff, R.M., Alioto, A. (1995). Infant-directed speech facilitates lexical learning in adults hearing Chinese: implications for language acquisition. *Journal of child language*, 22, 703-726.
- Hagoort, P., Indefrey, P., Brown, C. et al. (1999). The neural circuitry involved in the reading of German words and pseudowords: A PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 383–398.
- Hahne, A., Eckstein, K., Friederici, A.D. (2004). Brain signatures of syntactic and semantic processes during children's language development. *J. Cogn. Neurosci.*, 16, 1302-1318.
- Hald, L.A., Bastiaansen, M.C., Hagoort, P. (2005). EEG theta and gamma responses to semantic violations in online sentence processing. *Brain and Language*, 96, 90-105.
- Hayashi, A., Tamekawa, Y., Kiritani, S. (2001). Developmental change in auditory preferences for speech stimuli in Japanese infants. *Journal of speech, language and hearing research*, 44, 1189-1200.
- Holcomb, P.J. (1993). Semantic priming and stimulus degradation: Implications for the role of the N400 in language processing. *Psychophysiology*, 30, 47-61.
- Homae, F., Watanabe, H., Nakano, T. (2006). The right hemisphere of sleeping infants perceives sentential prosody. *Neurosci. Res.*, 54, 276-280.
- Hoogenboom, N., Schoffelen, J.M., Oostenveld, R. et al. (2006). Localizing human visual gamma-band activity in frequency, time and space. *Neuroimage*, 29, 764-773.
- Jasper, H.H. (1958). The ten-twenty system of the International Federation. *Electroencephalography Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
- Jöbsis, F.F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency circulatory parameters. *Science*, 198, 1264-1267.
- Jusczyk, P.W., Cutler, A., Redanz, N.J. (1993). Infant's preference for the predominant stress patterns of English words. *Child Dev.*, 64, 675-687.
- Jusczyk, P.W., Bertoni, J., Bijeljac-Babic, R. et al. (1990). The role of attention in speech perception by infants. *Cognitive Development*, 5, 265-286.
- Kajikawa, S., Fais, L., Mugitani, R. et al. (2006). Cross-language sensitivity to phonotactic patterns in infants. *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 2278-2284.
- Klinke, R., Silbernagl, S. (2003). Lehrbuch der Physiologie. *Georg Thieme Verlag*, 4.Auflage, 732-734
- Koelsch, S., Fritz, T., Schulze, K. et al. (2004). Adults and children processing music: an fMRI study. *Neuroimage*, 25, 1068-1076.

## Literaturverzeichnis

- Koelsch, S., Friederici, A.D. (2003). Towards the neural basis of processing structure in music: comparative results of different neurophysiological investigation methods (EEG, MEG, fMRI). *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 999, 15– 27.
- Kotz, S.A., Cappa, S.F., von Cramon, D.Y. et al. (2002). Modulation of the lexical–semantic network by auditory semantic priming: An event-related functional MRI study. *NeuroImage*, 17, 1761–1772.
- Kuhl, P.K. (2005). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nat. Rev. Neurosci.*, 5, 831-841.
- Kuhl, P.K., Andruski, J.E., Chistovich, I.A. et al. (1997). Cross language analysis of phonetic units in language addressed to infants. *Science*, 277, 684-686.
- Kuhl, P.K., Tsao, F.M., Liu, H.M. et al (Hrsg.) (New York 2001). The Convergence of Natural and Human Science, 136-174.
- Kurth, C., Uher, B. (1997). Cerebral hemoglobin and optical pathlength influence near-infrared spectroscopy measurement of cerebral oxygen saturation. *Anesth. Analg.*, 84, 1297-1305.
- Kutas, M. and Hillyard, S.A. (1980). Reading senseless sentences brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207, 203-205.
- Kutas, M. and Hillyard, S.A. (1983). Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Mem. Cognit.*, 11, 539-550.
- Kutas, M. et al (1987). A preliminary comparison of the N400 response to semantic anomalies during reading, listening and singing. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 39, 325-330.
- Kutas, M. and Federmeier, K.D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends Cogn. Sci.*, 4, 463-470.
- Loritz, D. (1999). How the Brain evolved Language. *Oxford University Press, USA*.
- Majerus, S., Van der Linden, M., Collette, F. et al.(2005). Modulation of brain activity during phonological familiarization. *Brain and language*, 92, 320-331.
- Maki, A., Yamashita, Y., Watanabe, E. et al. (1996). Visualizing human motor activity by using non-invasive optical topography. *Front. Med. Biol. Eng.*, 7, 285-297.
- McCarthy, G. and Nobre, A.C. (1993). Modulation of semantic processing by spatial selective attention. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 88, 210-219.
- Mehlhorn, G. (2006). Phonotaktik.  
[http://www.ilg.unistuttgart.de/Mehlhorn/Handout\\_Phonotak.pdf](http://www.ilg.unistuttgart.de/Mehlhorn/Handout_Phonotak.pdf).
- Meibauer, J. (2002). Einführung in die germanistische Linguistik. *J.B. Metzler*, 2. Auflage, 84-85.

## Literaturverzeichnis

- Näätänen, R., Gaillard, A.W., Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta psychologica (Amst.)*, 42, 313-329.
- Meyer, M., Alter, K., Friederici, A.D. (2002). fMRI reveals brain regions mediating slow prosodic modulation in spoken sentences. *Hum. Brain Mapp.*, 17, 73-88.
- Miyawaki, K. et al (1975). An effect of linguistic experience: The discrimination of /r/ and /l/ by native speakers of Japanese and English. *Percept. Psychophys.*, 18, 331-340.
- Mugitani, R., Fais, L., Kajikawa, S. et al. (2007). Age-related changes in sensitivity to native phonotactics in Japanese infants. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122, 1332.
- Obrig, H. (2002). Nahinfrarotspektroskopie des Gehirns (Habilitationsschrift). *Diss. Humboldt-Universität zu Berlin, Medizinische Fakultät - Universitätsklinikum Charité*.
- Obrig, H., Steinbrink, J., Villringer, A. (2003). The blushing brain: Changes in brain colour indicate the functional state of the cerebral cortex. *Med. Laser Appl.*, 18, 206-216.
- Obrig, H. und Villringer, A. (2003). Beyond the visible: Imaging the human brain with light. *Journal of cerebral blood flow metabolism*, 23, 1-18.
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Pena, M., Maki, A., Kovacic, D. (2003). Sounds and silence: an optical topography study of language recognition at birth. *Natl. Acad. Sci.*, 100, 702-715.
- Pfurtscheller, G., Graimann, B., Huggins, J.E. et al. (2003). Spatiotemporal patterns of beta desynchronization and gamma synchronization in corticographic data during self-paced movement. *Clin. Neurophysiol.*, 114, 1226-1236.
- Poeppel, D. (2003). The analysis of speech in different temporal integration windows: cerebral lateralization as "asymmetric sampling in time". *Speech Communication*, 41, 245-255.
- Poeppel, D. und Hackl, M. (2006). The functional architecture of speech perception. *Cognitive Neuroscience of Language Laboratory, Department of Linguistics and Department of Biology, University of Maryland College Park*.
- Pulvermüller, F., Lutzenberger, W., Preissl, H. (1999). Nouns and verbs in the intact brain: Evidence from event-related potentials and high-frequency cortical responses. *Cerebral Cortex*, 9, 497-506.
- Raettig, T., Kotz, S.A. (2007). Auditory processing of different types of pseudo-words: An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 26.
- Ramers, K. H. (1998). Einführung in die Phonologie. *Wilhelm Fink Verlag, München*, 12-18.
- Saito, Y., Aoyama, S., Kondo, T. et al. (2007). Frontal cerebral blood flow change with infant-directed speech. *Arch. Dis. Child Fetal Neonatal. Ed.*, 92, 113-116.

## Literaturverzeichnis

- Santesso, D.L., Schmidt, L.A., Trainor, L.J. (2007). Frontal brain electrical activity (EEG) and heart rate in response to affective infant-directed (ID) speech in 9-month-old infants. *Brain and Cognition*, 65, 14-21.
- Schönwiesner, M., Rubsamen, R., von Cramon, D. Y. (2005). Hemispheric asymmetry for spectral and temporal processing in the human antero-lateral auditory belt cortex. *Eur.J.Neurosci.*, 22, 1521-1528.
- Shannon, R.V. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270, 303-304.
- Sharbrough, F., Chatrian, G. E., Lesser, R. P. et al. (1991). American Electroencephalographic Society Guidelines for standard electrode position nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 8, 200-202.
- Silva-Pereyra, J., Rivera-Gaxiola, M., Kuhl, P.K. (2005). An event-related brain potential study of sentence comprehension in preschoolers: Semantic and morphosyntactic processing. *Brain Res. Cogn. Brain Res.*, 23, 247-258.
- Singer, W. (1993). Synchronization of cortical activity and its putative role in information processing and learning. *Annual Review of Physiology*, 55, 349-374.
- Svaasand, L. et al. (1993). Tissue characterization and imaging using photon density waves. *Optical engineering*, 32, 258-266.
- Swanson, L.A., Leonard, L.B., Gandour, J. (1992). Vowel duration in mothers' speech to young children. *J. Speech Hear Res.*, 35, 617-625.
- Tallon-Baudry, C., Bertrand, O. (1999). Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends in Cogn. Science*, 3, 151-162.
- Tervaniemi, M., Hugdahl, K. (2003). Lateralization of auditory-cortex functions. *Brain Research. Brain Research Reviews*, 43, 231-246.
- Trehub, S.E. (1973). Infant's sensitivity to vowel and tonal contrasts. *Developmental Psychology*, 9, 91-96.
- Tsushima, T. et al (2001). Proceedings of the International Conference on Spoken Language Processing Vol S28F-1, 1695-1698.
- Valdois, S., Carbonnel, S., Juphard, A. et al.(2006). Polysyllabic pseudo-word processing in reading and lexical decision: converging evidence from behavioral data, connectionist simulations and functional MRI. *Brain research*, 1085, 149-162.
- Villringer, A. (2000). Physiological changes during brain activity and cerebral blood flow: basis of functional imaging. *Cerebrovasc. Brain Metab. Rev.*, 7, 240-276.
- Wartenburger, I., Steinbrink, J., Telkemeyer, S. (2007). The processing of prosody: Evidence of interhemispheric specialization at the age of four. *Neuroimage*, 34, 416-425.

## Literaturverzeichnis

- Watanabe, E., Maki, A., Kawaguchi, F. et al.(2000). Noninvasive cerebral blood volume measurement during seizures using multichannel nearinfrared spectroscopy topography. *J. Biomed. Opt.*, 5, 287-290.
- Weber, C., Hahne, A., Friedrich, M. et al (2004). Discrimination of word stress in early infant perception: Electrophysiological evidence. *Cogn. Brain Res.*, 18, 149-161.
- Werker, J.F., McLeod, P.J. (1989). Infant preference for both male and female infant-directed talk: a developmental study of attentional and affective responsiveness. *Canadian Journal of Psychology*, 43, 230-246.
- Werker, J.F., Pons, F., Dietrich, C. et al.(2007). Infant-directed speech supports phonetic category learning in English and Japanese. *Cognition*, 103, 147-162.
- West, W.C., Holcomb, P.J. (2002). Event-related potentials during discourse-level semantic integration of complex pictures. *Cogn. Brain Res.*, 13, 363-375.
- Xiao, Z., Zhang, J.X., Wang, X. et al. (2005). Differential activity in left inferior frontal gyrus for pseudowords and real words: an event-related fMRI study on auditory lexical decision. *Hum. Brain Mapp.*, 25, 212–221.
- Zatorre, R.J., Belin, P. (2001). Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral Cortex*, 11, 946-953.
- Zatorre, R.J., Belin, P., Penhune, V.B. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *TICS*, 6, 37-46.
- Zatorre, R.J., Evans, A.C., Meyer, E. et al. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256, 846-849.
- Zatorre, R.J., Evans, A.C., Meyer, E. (1994). Neural mechanism underlying melodic perception and memory for pitch. *J.Neurosci.*, 14, 1908-1919.
- Zhang, Y., Brooks, D. H. und Boas, D. A. (2005). A haemodynamic response function model in spatio-temporal diffuse optical tomography. *Phys.Med.Biol.*, 50, 4625-4644.
- Zschocke, S. (2002). Klinische Elektroenzephalographie, *Springer Berlin*, 2. Auflage.

## 8 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Darstellung einer gemittelten, zentroparietalen N400 Antwort nach Exposition mit einer semantischen Verletzung (aus Friederici und Alter 2004)
- Abb. 2 Darstellung des Theta-Frequenzbandes (aus Hald et al 2005)
- Abb. 3 Darstellung des Gamma-Frequenzbandes (aus Hald et al 2005)
- Abb. 4 Darstellung der Mismatch Negativity (aus Kujala, Näätänen 2001)
- Abb. 5 Die MMN bei Erwachsenen und Kindern (aus Friedrich, M. 2004)
- Abb. 6 ERPs auf Pseudowörter und Nichtwörter für 12 Monate alte Kinder, 19 Monate alte Kinder und Erwachsene (aus Friederici, Friedrich 2005)
- Abb. 7 Seitliche Ansicht der linken Hemisphäre mit Darstellung der beiden traditionellen Sprachzentren, dem Broca und dem Wernicke Areal (aus NIC publication 97-4257, 1997)
- Abb. 8 Seitliche Ansicht des Gehirns mit Darstellung der für den Sprachverarbeitungsprozess wichtigen neuronalen Strukturen (aus: <http://www.ims.uni-stuttgart.de/phonetik>)
- Abb. 9 FMRT nach Exposition mit normaler, syntaktischer und prosodischer Sprache (aus Meyer et al 2002)
- Abb. 10 Mittlere Dauer der drei Vokalqualitäten (a, i, u) bei lang- und kurzgesprochenen Vokalen in der Adult directed speech und der Infant directed speech (aus Englund et al 2005)
- Abb. 11 Positionen der Elektroden nach Sharbrough et al (1991)
- Abb. 12 Zeitverlauf der Konzentrationsveränderungen des oxygenierten [HbO] und deoxygenierten [HbR] Hämoglobins im motorischen Kortex während einer zwei Sekunden dauernden Finger-Tapping-Aufgabe (aus Zhang et al 2005)
- Abb. 13 Prinzip der Nahinfrarotspektroskopie (aus Obrig et al. 2003)
- Abb. 14 Darstellungen der Messpositionen auf der linken Hemisphäre
- Abb. 15 Darstellungen der Messpositionen auf der rechten Hemisphäre
- Abb. 16 Übersicht der Elektrodenanordnung über beiden Hemisphären. Die Säulendiagramme stellen die Mittelwerte der 22 Probanden auf die präsentierten Wörter in Adult directed speech und Infant directed speech dar.



## Abbildungsverzeichnis

- Abb. 17 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Cz (legale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech; ads de versus ads sk)
- Abb. 18 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode CPz (legale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech; ads de versus ads sk)
- Abb. 19 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Pz (legale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Adult directed speech; ads de versus ads sk)
- Abb. 20 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Cz (legale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech; ids de versus ids sk)
- Abb. 21 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode CPz (legale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech; ids de versus ids sk)
- Abb. 22 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Pz (legale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech versus illegale deutsche Pseudowörter nur in Infant directed speech; ids de versus ids sk)
- Abb. 23 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Cz (legale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt versus illegale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt; de versus sk)
- Abb. 24 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode CPz (legale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt versus illegale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt; de versus sk)
- Abb. 25 Vergrößerte Darstellung des Grand Average der Elektrode Pz (legale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt versus illegale deutsche Pseudowörter Adult und Infant directed speech gemittelt; de versus sk)
- Abb.26 Darstellung der signifikanten  $t$ -Werte für die linke Hemisphäre. Die marginal signifikanten Werte sind an der zutreffenden Messposition eingetragen und blau unterlegt.
- Abb. 27 Darstellung der signifikanten  $t$ -Werte für die rechte Hemisphäre. Die marginal signifikanten Werte sind an der zutreffenden Messposition eingetragen und hellblau unterlegt.
- Abb. 28 Grand Average NIRS für die Kanäle 1 und 4 (legale versus illegale Pseudowörter, Adult und Infant directed speech gemittelt)

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zweigliedrige erlaubte und verbotene Konsonantencluster (Deutsch)
Tabelle 2	Zweigliedrige erlaubte und verbotene Konsonantencluster (Slowakisch)
Tabelle 3	Legale und illegale Konsonantenonsets
Tabelle 4	Design der Materialmanipulation (inkl. Beispielpseudowort)
Tabelle 5	Deskriptive Statistik des pre-test Ratings
Tabelle 6	<i>t</i> -test zum pre-test Rating
Tabelle 7	Durchschnittliche Dauer der Pseudowörter und der Vokale pro Bedingung
Tabelle 8	Nach der Artefaktbereinigung ausgemusterte Stimuli in Prozent für jede der vier präsentierten Pseudowörterpools
Tabelle 9	In der Datenanalyse für die lateralen Elektroden verwendete ROIs („Regions of interest“)
Tabelle 10	In der Datenanalyse für die Elektroden der Mittellinie verwendete ROIs („Regions of interest“)
Tabelle 11	Regionen der statistischen Datenanalyse für die Nahinfrarotspektroskopie
Tabelle 12	ANOVAs der ERP Daten im Zeitfenster von 450 bis 550 ms nach Stimulus-Onset für die lateralen Elektroden
Tabelle 13	ANOVAs der ERP-Daten im Zeitfenster von 450 bis 550 ms nach Stimulus-Onset für die Mittellinienelektroden
Tabelle 14	ANOVAs der NIRS Daten (legale versus illegale Pseudowörter; ads und ids gemittelt)
Tabelle 15	Ergebnisse des <i>t</i> -tests für die NIRS Daten (legale versus illegale Pseudowörter; Adult directed speech und Infant directed speech gemittelt)
Tabelle 16	Ergebnisse der <i>t</i> -tests für die NIRS Daten für jeden Kanal einzeln (legale versus illegale Pseudowörter; Adult directed speech und Infant directed speech gemittelt)

## **Erklärung**

„Ich, Ina Barbara Jürgenson, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Neuronale Korrelate phonotaktischer Verarbeitung“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Datum

Unterschrift

## **Danksagung**

Bei Herrn PD Dr. Hellmuth Obrig möchte ich mich recht herzlich für die freundliche Vergabe des Dissertationsthemas und die ausgesprochen gute Betreuung bedanken.

Zu großem Dank bin ich weiterhin Frau Dr. Sonja Rossi verpflichtet, die mich zu jedem Zeitpunkt des Projektes stets unterstützt und motiviert hat. Ich danke ihr für ihre Geduld und ihre fachliche Anleitung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Weiterhin möchte ich mich bei den Mitgliedern der AG Sprache um Frau Prof. Isabell Wartenburger bedanken.

Zuletzt danke ich von ganzem Herzen meiner Mutter, die mir durch ihre großen Mühen und ihre liebevolle Unterstützung mein Studium und meine Dissertation ermöglicht hat.

Dieses Dissertationsprojekt wurde durch die studentische Forschungsförderung der Charité Universitätsmedizin Berlin unterstützt.