

**Aus dem Neurozentrum
Klinik für Neurologie und Neurophysiologie
des Universitätsklinikums Freiburg im Breisgau**

Differenzierte syntaktische Verarbeitung bei Schlaganfallpatienten

**INAUGURAL - DISSERTATION
zur
Erlangung des Medizinischen Doktorgrades
der Medizinischen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau**

**Vorgelegt 2021
von Carolin Elser
geboren in Stuttgart**

Dekan

1. Gutachter

2. Gutachter

Prof. Dr. Lutz Hein

Prof. Dr. med. Cornelius Weiller

Prof. Dr. med. Horst Urbach

Jahr der Promotion 2021

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1. Einleitung.....	1
1.1 Linguistische Sprachmodelle	2
1.2 Kognitive Sprachmodelle	5
1.3 Anatomische Sprachmodelle	10
1.3.1 Das Broca-Areal	11
1.3.1.1 Natürliche Syntax	11
1.3.1.2 Working Memory	14
1.3.1.2.1 Die Rolle des Hippocampus	15
1.3.1.2.2 Die Rolle des dorsolateralen präfrontalen Cortex	16
1.3.2 Das STG als sensorisches Sprachareal	17
1.3.3 Der Caudatus Kopf	18
1.3.4 Netzwerke der Sprache	18
1.4 Artificial Grammar	21
1.4.1 Künstliche Grammatik vs. natürliche Sprache	21
1.4.2 (AB) _n und AnB _n	25
1.4.3 Implizites und explizites Lernen.....	27
1.5 Ziele und Fragestellung.....	32
2. Material und Methoden.....	34
2.1 Probanden.....	34
2.2 Studiendesign und -ablauf	36
2.2.1 Ablauf des Experiments.....	38
2.3 Statistische Auswertung.....	39
2.3.1 Verhaltensdaten: Probleme und Anpassungen	39
2.3.2 Neuroanatomische Ebene	44
2.3.3 Charakterisierung der Untersuchungsgruppen.....	45
2.3.3.1 Grundgesamtheit.....	45
2.3.3.2 Probanden FSG und PSG.....	47
2.3.3.3 Aphasiestatus.....	49

3.	Ergebnisse	52
3.1	Perfekte Performanz	52
3.2	Lernfortschritt und Leistung (Performanz) aller Probanden	56
3.2.1	Antwortverhalten der Probanden mit linkshemisphärischen Läsionen	57
3.2.1.1	Benutzung nur einer statt beider Tasten	57
3.2.1.2	Abgabe keiner Antwort (0-Runde) in Session 1	59
3.2.1.3	Überhöhte Antwortabgabe	61
3.2.1.4	VLSM: Analyse von Probanden mit besonderem Antwortverhalten	63
3.2.1.4.1	Tastenverwendung.....	63
3.2.1.4.2	Initial keinerlei Antwort	64
3.2.1.4.3	Initial überhöhte Antwortabgabe.....	64
3.2.2	Faktor Grammatiktyp: Gibt es Unterschiede in der Erlernbarkeit der beiden Grammatiken (FSG und PSG)?.....	65
3.2.2.1	Verhaltensdaten: Lernfortschritt und Leistung in den einzelnen Grammatiken.....	65
3.2.2.1.1	Reaktionszeit.....	67
3.2.2.1.2	Fehlerart und –quote	69
3.2.2.2	VLSM: Lernfortschritt und Leistung in den einzelnen Grammatiken	72
3.2.2.2.1	Session 1 / Ausgangsleistung	72
3.2.2.2.2	Session 3 / Maximum	72
3.2.2.2.3	Lerndelta Runde 3 zu 1	73
3.2.2.2.4	Generalisierung	74
3.2.3	Vergleich von FSG zu PSG	76
3.2.4	Faktor Aphasie: Gibt es Unterschiede zwischen Patienten mit Aphasie und ohne Aphasie?.....	76
3.2.4.1	Verhaltensdaten: Einfluss des Aphasie-Status	76
3.2.4.2	VLSM: Einfluss des Aphasiestatus.....	81
3.2.5	Weitere Einflussfaktoren.....	83
4.	Diskussion	84
4.1	Perfekte Erlernbarkeit der Grammatiken bei Probanden mit linkshemisphärischem Schlaganfall	84
4.2	Lernfortschritt aller Probanden.....	86
4.3	Verhaltensauffälligkeiten der linkshemisphärischen Patienten	88
4.3.1	Die Verwendung von nur einer Taste	88
4.3.2	Keine Antwortabgabe in Session 1.....	90
4.3.3	Überhöhte Antwortabgabe.....	91
4.4	Einfluss des Grammatiktyps auf die Erlernbarkeit der Regeln.....	92

4.5	Einfluss spezifischer Hirnregionen	98
4.6	Einfluss der Aphasie	99
4.7	Weitere Einflussfaktoren auf den Lernerfolg	101
5.	Vorgehensweise und Limitationen der Studie	102
6.	Klinische Relevanz der Studie	105
7.	Zusammenfassung	106
8.	Literaturverzeichnis	107
9.	Anhang.....	119
9.1	Probanden mit 0-Runde	119
9.2	Probanden mit überhöhter Antwortabgabe	120
9.3	Subgruppe Session 3.....	121
9.4	Subgruppe Session 1	122
9.5	Subgruppe Aphasiker.....	124
9.6	Modelle S. Kirsch	125
10.	Danksagung.....	130
11.	Lebenslauf	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Chomsky Hierarchie (Fitch und Friederici 2012, S. 1936):.....	3
Abbildung 2: Adaptierte Version des neurokognitiven Sprachverständnismodells (ursprünglich: Friederici, 2002).	9
Abbildung 3: Das dual-stream Modell und die ungefähre anatomische Lokalisation der Modell-Komponenten.....	20
Abbildung 4: zwei Ströme für die Verarbeitung von Syntax (Musso et al. 2015, S. 277)	21
Abbildung 5: Reber 1967 - state diagram	23
Abbildung 6: Overlap aller Probanden für FSG (links) und PSG (rechts).....	47
Abbildung 7: Overlaps Aphasiestatus.....	52
Abbildung 8: Overlap der perfekten Performer.....	56
Abbildung 9: Läsion Proband WP_19194590.....	56
Abbildung 10: Overlap bei einseitiger (N= 24; gelb-rot) oder beidseitiger (N=44; grün) Tastenverwendung	58
Abbildung 11: Overlap aller Probanden mit konstant überhöhter Antwortabgabe	63
Abbildung 12: Liebermeister Tests für die Tastenverwendung sowie für Probanden mit 0- Runde oder überhöhter Antwortabgabe	65
Abbildung 13: Performanz für alle Probanden in PSG sowie der Subgruppe bis Runde 4 ...	67
Abbildung 14: Reaktionszeiten für FSG und PSG getrennt nach Codes und Session.....	68
Abbildung 15: Häufigkeit der Fehlerarten	71
Abbildung 16: Liebermeister Test Probanden in Session 1 < Chance vs. >Chance	72
Abbildung 17: Session 3	73
Abbildung 18: Volume render und multislices des BM des Lerndeltas Session 1-3.....	74
Abbildung 20: Liebermeister und BM Test der Generalisierung	75
Abbildung 21: Vergleich der Mittelwerte der Performanz (FSG und PSG).....	76
Abbildung 22: Mittelwertsvergleich der Subgruppen zum Zeitpunkt T0.....	77
Abbildung 23: Mittelwertsvergleich der Subgruppe zum Zeitpunkt T1.....	79
Abbildung 24: Liebermeister Test nach Aphasiestatus (a) und	83
Abbildung 25: Antwortabgabe und Performanz bei Probanden mit 0-Runde und unterschiedlicher Tastenbenutzung.....	119
Abbildung 26: Antwortabgabe und Performanz (unkorrigiert und korrigiert) für Probanden mit überhöhter Antwortabgabe	120
Abbildung 27: Overlaps S3	121
Abbildung 28: Overlaps der Probanden in Session 1	122
Abbildung 29: Liebermeister Tests des Subgruppen S1	123
Abbildung 30: Liebermeister Test (Lerner/ Nicht-Lerner) Aphasiker und Nicht-Aphasiker in T0 und T1	124
Abbildung 31: Basis Modell.....	125
Abbildung 32: Einfluss der Aphasie in T0	126
Abbildung 33: Einfluss der Aphasie T1	127
Abbildung 34: Einfluss des Alters	128
Abbildung 35: Einfluss des Bildungsalters.....	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Paradigma und Fehlertypen.....	37
Tabelle 2: demografische Daten	46
Tabelle 3: klinische Parameter aller Probanden für FSG und PSG	48
Tabelle 4: statistischer Vergleich klinischer Parameter Probanden FSG zu PSG	48
Tabelle 5: klinische Parameter von "Nie-Aphasikern", Recovery-Probanden und "Immer-Aphasikern"	50
Tabelle 6: statistischer Vergleich Aphasiestatus.....	51
Tabelle 7: Performanz perfekte Performer.....	53
Tabelle 8: klinische Parameter perfekte Performer.....	54
Tabelle 9: Vergleich der klinischen Parameter (perfekte Performer vs. restliche Probanden)	55
Tabelle 10: klinische Parameter Tastennutzung.....	58
Tabelle 11: klinische Parameter von Probanden mit 0-Runde mit ein- und beidseitiger Tastenverwendung.....	60
Tabelle 12: Statistischer Vergleich Probanden mit 0-Runde zu restlichen Probanden	61
Tabelle 13: klinische Parameter von Probanden mit konstant überhöhter Antwortabgabe ...	63
Tabelle 14: Vergleich Performanz FSG und PSG.....	66
Tabelle 15: statistischer Vergleich Lerndelta	66
Tabelle 16: statistischer Vergleich der Reaktionszeit	69
Tabelle 17: Session 1 zu 3 Fehlerquote	71
Tabelle 18: statistischer Vergleich der Fehlertypen	71
Tabelle 19: Vergleich der Lerndeltas für Aphasiker und Nicht-Aphasiker zum Zeitpunkt T0.	78
Tabelle 20: Vergleich der Lerndeltas für Aphasiker und Nicht-Aphasiker zum Zeitpunkt T1.	79
Tabelle 21: statistischer Vergleich von Aphasikern zu Nicht-Aphasikern in T0 und T1	79

Abkürzungsverzeichnis

ACS	associative chunk strength
AF	Fasciculus arcuatus
AGL	artificial grammar learning
BA	Brodman-Areal
DTI	diffusion tensor imaging
ECFS	extreme capsule fibre system
EmC	Capsula extrema
ERP	event-related potentials
F3orb	Gyrus frontalis inferior pars orbitalis
FDR	false discovery rate
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie
FOP	frontales Operculum
FSG	Finite State Grammar
IFG	Gyrus frontalis inferior
IPL	inferiorer Parietallappen
ITL	inferiorer Temporallappen
MdLF	<i>Fasciculus longitudinalis medialis</i>
MFG	Gyrus frontalis medialis
MTG	Gyrus temporalis medialis
MTL	medialer Temporallappen
Ncl	Nucleus
PSG	phrase structure grammar
ptT	paired t-Test
SFG	Gyrus frontalis superior
SLF	Fasciculus longitudinalis superior
SPL	superiorer Parietallappen
STG	Gyrus temporalis superior
STS	Sulcus temporalis superior
UF	Fasciculus uncinatus
VLSM	voxel-based lesion symptom mapping
WM	Working Memory

1. Einleitung

“Der Mensch ist Mensch nur durch die Sprache; um die Sprache zu erfinden müsste er schon Mensch sein.” (Hoffmann 2007)

Auch wenn dieser humanistisch geprägte Ausspruch von Humboldts in seiner ursprünglichen Bedeutung mit Sicherheit anders zu verstehen ist, so macht er dennoch deutlich, mit welchen dramatischen Einschränkungen der Verlust der Sprachfähigkeit einhergeht. Während die Sprache uns in einzigartiger Art und Weise ermöglicht, mit unserer Umwelt zu kommunizieren, so schwerwiegend stellen sich auch deren Einschränkungen, beispielsweise durch eine Aphasie, dar. Auch wenn der Umgang mit Sprache im Alltag selbstverständlich erfolgt, so besteht doch über die genaue neuroanatomische Verarbeitung und die zugrunde liegenden Prozesse Uneinigkeit. Auch darüber, ob und bis zu welchem Grad die menschliche Sprache und ihre Grammatik als einzigartig angenommen werden kann, wird derzeit noch diskutiert (Berwick et al. 2013; Chomsky 2010, 2017; Hauser et al. 2002). Das Ziel der hier durchgeführten Studie liegt insbesondere darin, die Zusammenhänge der syntaktischen Verarbeitung anhand von Regelsystemen unterschiedlicher Komplexität anhand von Probanden in der chronischen Phase nach linkshemisphärischem Schlaganfall zu untersuchen und somit neue Einblicke in die Verarbeitung von Syntax zu gewähren.

„There are many questions we can ask about language. The most fundamental one, surely, is: What is language? To the extent that we have some grasp of this, we can proceed to study other significant questions. Lacking that, inquiry is necessarily curtailed.” (Chomsky 2015a, S. 91)

Hierin sieht auch Chomsky das Problem aller bisherigen Untersuchungen, denn wie sollen Annahmen getroffen werden, wenn das Subjekt der Untersuchungen nicht genau definiert ist? So vielfältig wie die Sprache selbst, so viele unterschiedliche Disziplinen sind an ihrer Erforschung beteiligt. An der Untersuchung ihrer Funktionen, des Erwerbs und ihrer Bedeutung für die Evolution des Menschen sind zum heutigen Zeitpunkt mehrere Forschungsgebiete mit zumeist jeweils eigenen Definitionen für bestimmte Bereiche oder Funktionen beteiligt. Im Folgenden möchte ich daher einen kurzen Überblick über einige linguistische und neuroanatomische Sprachmodelle sowie über mögliche Lernprozesse geben.

1.1 Linguistische Sprachmodelle

Nativismus:

Schon früh befasste sich Noam Chomsky mit der Reduktion der Sprache und ihrer Anteile auf ein allgemeingültiges Modell. Je simpler das Modell hierbei, so laut Chomsky, desto höher sei seine allgemeine Gültigkeit (Chomsky 2013). In den 1950er Jahren stellte er die bis heute genutzte „Chomsky-Hierarchie“ im Rahmen einer „Formal Language Theory“(FLT) auf, mit dem Ziel Grammatiken hierarchisch einzuteilen (Chomsky 1956). Die FLT wurde in ihrer derzeitigen Form durch Noam Chomsky geprägt (Chomsky 2017; Chomsky et al. 2019). Eine Sprache stellt hier die Menge an zulässigen „strings“ aus einem Alphabet „A“ dar; die dazugehörige Grammatik hingegen stellt ein definiertes Set an Regeln dar, um eine prinzipiell unendlich große Menge an zulässigen Sätzen aus dieser Sprache zu generieren. „A grammar is a finite set of rules that specifies some (typically infinite) language.“ (Fitch und Friederici 2012, S. 1937).

In einer späteren Arbeit befassten sich Hauser, Chomsky und Fitch mit einer Unterteilung der Faculty of Language in eine FLB (faculty of language in the broad sense) und eine FLN (faculty of language in the narrow sense). Diese Unterscheidung erscheint essentiell, da im alltäglichen Gebrauch der Begriff Sprache in unterschiedlicher Hinsicht gebraucht werden kann. Die FLB definiert hiernach also die Sprache im Allgemeinen mit allen dazu gehörenden Mechanismen und ihren Überlappungen in andere Bereiche und Spezies. Die FLN hingegen, als Teil der FLB, beschreibt den Teil der Sprache und ihrer Mechanismen im engeren Sinn, welcher für den Menschen spezifisch und einzigartig ist (Fitch et al. 2005, S. 4). Hierbei räumen die Autoren ein, dass es diese Einheit jedoch noch zu untersuchen gilt, und dass es durchaus möglich sei, dass die FLN sich als nicht existent herausstelle, sollten keine für den Menschen allein spezifischen Mechanismen vorliegen. Das Prinzip der Rekursion stellt für die Autoren einen relevanten Teil der FLN dar (Hauser et al. 2002). Rekursion wird generell als ein Vorgang bezeichnet, der es erlaubt, aus einer begrenzten Menge an Regeln eine unendliche Anzahl an Ausdrücken zu generieren (Vries et al. 2012, S. 2065). Rekursion stellt somit eine "[...] procedure that calls itself [...]" (Pinker und Jackendoff 2005, S. 203), also einen Vorgang, welcher sich auf sich selbst bezieht, dar. Syntaktisch gesehen bezeichnet Rekursion somit Satzteile, welche ineinander verschachtelt sind.

Die Chomsky-Hierarchie selbst umfasst vier Typen, Typ 0 bis Typ III, wobei die nächst höheren Typen jeweils eine Untermenge der vorherigen bilden. Somit ergibt sich eine absteigende Komplexität und stärkere Einschränkungen für die höher eingestuft Grammatiken. Die Typ 0-Grammatik, auch rekursive Grammatik, unterliegt keinerlei Einschränkungen. Typ I, auch kontextsensitive, und Typ II, die kontextfreie Grammatik, erfahren weitere Einschränkungen bis hin zur Typ III-Grammatik (reguläre Grammatik), welche somit die speziellste von allen ist. Diese Art der Hierarchie findet bis heute noch ihren Einsatz in formalen Grammatiken der Computerlinguistik.

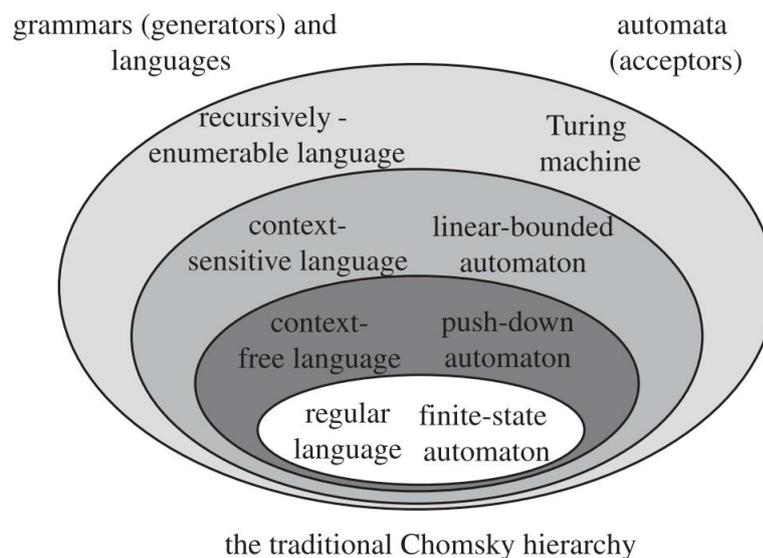


Abbildung 1: Die Chomsky Hierarchie (Fitch und Friederici 2012, S. 1936): Graue Bereiche benötigen supra-reguläre Grammatiken und sind damit über die Finite State Grammatik hinausreichend.

Die Naturalisten, zu deren Hauptvertretern Noam Chomsky zählt, gehen davon aus, dass die Grundzüge der Grammatik nicht erlernbar, sondern angeboren seien, da der Input, aus dem Kinder auf die richtige Grammatik rückschließen sollen, hierfür allein nicht ausreicht („poverty of stimulus“). Noam Chomsky entwickelte mehrere Modelle, um die syntaktische Struktur ohne Einbeziehung der Semantik unter Reduktion der Menge an Phrasenstrukturen zu analysieren um im Endeffekt eine Art Grundgerüst zu erhalten, mit der durch eine begrenzte Anzahl an Operationen eine unbegrenzte Möglichkeit an Sätzen geschaffen werden konnte. Chomsky ging mit diesem als generative Grammatik bezeichneten Modell der Frage auf den Grund, wie aus einer Sprache mit endlicher Anzahl an Regeln eine unendliche Anzahl an Sätzen produziert werden kann. Gleichzeitig stellt Chomsky sich hiermit gegen Skinner und die Auffassung des Behaviorismus, dass Sprachen durch operante Konditionierung erlernt

werden, sprich Kinder würden Sprachen durch positive Verstärkung erlernen. Dies spricht aber laut Chomsky gegen die Geschwindigkeit, mit der Kinder eine Sprache erlernen, und legt vielmehr das Vorhandensein einer sogenannten Universalgrammatik („*Universal Grammar*“) nahe. Diese soll allen natürlichen Sprachen zugrunde liegen und als grundlegende Eigenschaft zum Spracherwerb von Geburt an angelegt sein, sodass lediglich das Vokabular sowie die richtige Auswahl an Regeln erlernt werden muss (Christiansen und Chater 2008). Um die Aussagekraft seiner Theorie zu verbessern wurden zahlreiche Veränderungen und eine weitere Reduzierung der Universal Grammar im Laufe der Jahre vorgenommen, bis hin zu *the minimalist program* (ursprünglich 1995 (Chomsky 2015b)), dennoch blieb die Grundidee des Naturalismus erhalten. In der Theorie des *minimalist programs* sieht Chomsky die Sprache eher als „an instrument of thought“, dessen Teile sich grob in drei Module gliedern lassen: Syntax, Semantik und Phonologie (damit in einen generating process und einen sensomotorischen sowie einen „conceptual-intentional (CI) output). Hierbei können syntaktische Strukturen als autonome Komponente unabhängig von ihrer Bedeutung analysiert werden. Der lineare Satzaufbau existiert für ihn daher nur im Output, während des generating process allerdings beruhe Grammatik auf hierarchischer Ordnung (minimal structural distance).

Empirismus:

Der wahrscheinlich bedeutendste Unterschied der Construction Grammar zur Universal Grammar ist, dass hierbei Form (Syntax, aber auch Morphologie und Phonologie) und Bedeutung (Semantik) untrennbar miteinander verknüpft werden und daher eher als symbolische Einheiten (Konstruktionen) erfasst werden. Diese Konstruktionen können jegliche Form von grammatikalischen Strukturen sein (ganze Sätze bis hin zu Wörtern) und befinden sich damit in einem Kontinuum zwischen Syntax und Lexikon. Sprache wird folglich als Teil allgemeiner kognitiver Fähigkeiten angesehen und nicht als autonomes Modul. Diese symbolischen Einheiten befähigen uns Menschen auch, uns über Dinge zu unterhalten, die abstrakter Natur sind oder zu diesem Zeitpunkt nicht anwesend sind, ebenso wie sie es uns ermöglichen, andere Sichtweisen anzunehmen („change of perspectives“). Diese Fähigkeit wird von Tomasello als einzigartige Fähigkeit unserer menschlichen Spezies angenommen, denn keine andere Spezies auf der Welt befasst sich mit Symbolen (Diessel et al. 2013). Hilke Elsen charakterisiert die Grundzüge der kognitiven Grammatik sowie ihre Abgrenzung von der Universal

Grammar sehr treffend und zitiert gleichzeitig mit John Taylor einen bedeutenden Linguisten: "Sprache entsteht durch die Sprecher, die mit ihrer Hilfe ihre Gedanken weitergeben. Ein angeborenes Regelsystem ist unnötig. ‚A language, namely, is understood as a set of resources that are available to language users for the symbolization of thought, and for the communication of these symbolizations‘ (Taylor 2002: 30)." (Elsen 2009).

Beruhend auf Langackers Studien zur kognitiven Linguistik entstanden mehrere Ansätze zur Erklärung des Spracherwerbs, am ehesten setzte sich hier jedoch das „usage-based“ Modell durch, wonach Kinder ihre Muttersprache zunächst durch Gebrauch häufiger Wörter und Satzstrukturen erlernen und diese erst später im Verlauf auf seltenere und neue Wörter ausweiten. Tomasello sieht diesen Ansatz sowohl ontogenetisch als auch historisch belegt durch die Tatsache, dass sowohl Primaten als auch Kleinkinder ihre Kommunikation mit der Umwelt im Sinne von Aufforderungen zunächst gestisch als Fingerzeig präsentieren und nur aufgrund eines eindeutigeren Verständnisses verbale Hilfsmittel nutzen (Tomasello 2012; Viegas 2018). Dies setzt also für den Spracherwerb eine gemeinsame Intention voraus sowie die Fähigkeit für kulturelles Lernen und Mustererkennung, um gemeinsame kommunikative Konstruktionen zu erschaffen. Unterstützt wird dieses Modell durch zahlreiche Studien zum frühen Spracherwerb. Für die englische Sprache erforschte Tomasello 1992 den Spracherwerb seiner eigenen Tochter und stellte die sogenannte Verb-Insel Theorie auf, wonach für jedes Verb in der frühen Entwicklung zunächst ein Wissen angehäuft wird, beispielsweise über den Gebrauch in bestimmten Sätzen oder die Deklination für verschiedene Personen und Zeiten (Tomasello 1992). Dies unterscheidet den Ansatz signifikant von dem der UG, da Kinder nicht in der gleichen Art und Weise kommunizieren wie Erwachsene. Vielmehr erlernen sie die Sprache von konkreten Dingen hin zu abstrakten Bedeutungen (wie „I see what you mean“), aufbauend auf Wörtern und Satzarten, die sie zuvor schon richtig erlernt hatten, werden neue Satzteile hinzugefügt (Slots).

1.2 Kognitive Sprachmodelle

Im Rahmen der Kognitionswissenschaft als interdisziplinäres Forschungsgebiet werden mehrere Fachrichtungen miteinander verknüpft, unter anderem die der Psycholinguistik und Neurolinguistik. Das Gebiet der Psycholinguistik untersucht

hierbei, welche kognitiven und mentalen Systeme es ermöglichen, Sprache zu verwenden und zu erlernen. Insbesondere Phänomene, bei denen es zu Schwierigkeiten in der Sprachverarbeitung kommt, wie z.B. das Tip-of-tongue-Phänomen, wurden hierbei klassischerweise als geeignet angesehen, um verschiedene Modelle zu überprüfen. Zunächst befassten sich die Kognitionswissenschaftler mit der Frage nach mentalen Korrelationen der Sprachproduktion, des Spracherwerbs und des Sprachverständnisses. Dies führte jedoch im weiteren Verlauf zur Aufteilung der einzelnen Disziplinen und unterschiedlichen Modellen für die Sprachproduktion von Levelt bis Dell. Um hier einen kurzen Einblick zu geben, möchte ich zunächst das Sprachproduktionsmodell nach Dell beschreiben. Allen Modellen ist zunächst gemein, dass sie bei der Sprachproduktion von einer Hierarchie ausgehen und die Produktion sequenziell abläuft. Somit wird der eigentliche Sprachgenerierungsprozess vom Input und dem Output als motorischer Prozess abgegliedert. Levelt gliedert den Prozess der Sprachproduktion in verschiedene Module, welche nur auf Informationen innerhalb ihres Moduls Zugriff haben und alle hintereinander ablaufen. Zunächst wird das, was ausgedrückt werden möchte, also die „message“ des Satzes, aus dem mentalen Lexikon herausgesucht, wobei hier zunächst nur das Lemma gesucht wird. Lemma wird hier die nichtphonologische Repräsentation des Wortes genannt, bestehend aus der Verknüpfung der grammatikalischen Information (syntaktische Kategorie, Anzahl, Geschlecht...) mit der semantischen Information des Wortes. Morphologie und Phonologie werden getrennt als Lexem bezeichnet und erst später dem gefundenen Lemma zugeordnet. Gleichzeitig zur Suche nach dem passenden Lemma soll die syntaktische Struktur des Satzes Stück für Stück entstehen, da das jeweils aufgerufene Lemma das jeweils nächste bedingt und so weiter. Während das Modell von Levelt nur unidirektional verläuft, ist das interaktive Aktivierungsmodell von Dell bidirektional. Auch hier soll zunächst eine Auswahl getroffen werden, was gesagt werden soll, nur dass hierfür gleich mehrere Lemmata aktiviert werden, die auf das Konzept passen. Basierend auf der Ausbreitung in einem neuronalen Netzwerk wird hier das Lemma ausgewählt, welches die höchste Aktivierung hat, hierzu werden dann die am ehesten passenden Morpheme und Phoneme aktiviert, wobei auch hier nur die am besten passenden und somit am stärksten aktivierten ausgewählt werden (Dell 1986; Dell et al. 1999; Foygel und Dell 2000). In dem Modell von Dell kann dieser Prozess nicht nur von oben nach unten ablaufen, die einzelnen Ebenen haben auch die Möglichkeit im

Sinne eines Feedback-Mechanismus Korrekturen vorzunehmen (Foygel und Dell 2000).

Eine Abwandlung des Modells fand durch Chang statt, welcher hier bei der Sprachproduktion und -verständnis ein dual-path Modell vorschlägt, bestehend aus einem *meaning pathway* und einem separaten *sequencing pathway*, welche an bestimmten Schnittstellen zusammenlaufen. Der *sequencing pathway* soll helfen, das für diese Stelle grammatikalisch richtige Wort zu finden, während der *meaning pathway* dafür sorgt, dass das Wort in dem Kontext mit dem gemeinten Satzinhalt übereinstimmt. Diese Weiterentwicklung führt zu dem sogenannten p-Chain Modell von Dell und Chang, : dieses Modell verbindet sowohl das Sprachverständnis mit der Sprachproduktion als auch den Spracherwerb (Dell und Chang 2014). Dell und Chang argumentieren, dass für die Verarbeitung („Processing“) eines Satzes eine Vorhersage („Prediction“) für das jeweils nachfolgende Wort getroffen wird, also aufgrund der vorangegangenen Satzstruktur eine probabilistische Entscheidung getroffen wird, welches Wort als nächstes am ehesten zu erwarten ist. Somit ist für sie ein prädiktives Element auch produzierbar; *Prediction* ist also gleich *Production*. Chang und Dell sehen die Vorhersage und insbesondere den Vorhersagefehler („Prediction error“) als Form des impliziten Lernens an: jeder neue Input führt zu neuen Verbindungen zwischen den mentalen Repräsentationen und Fehler-basiertes Lernen tritt dort auf, wo die Vorhersage über ein Wort nicht zutrifft. Hier werden die Wahrscheinlichkeiten dann so korrigiert, dass beim nächsten Mal effektiver auf die vorangegangenen Wörter reagiert werden kann. Somit werden unerwartete Inhalte besser erinnert, als vorhersehbare. Diese verstärkten Verbindungen nennen sich *priming* und werden, als Form des impliziten Lernens, wiederum als Mechanismus für das Erlernen und Adaptieren des *Processings*, der *Prediction* und der *Production* angesehen. Jeder weitere Input dient hierbei als Training. Auch elektrophysiologische Daten stützen das Modell, z.B. zitieren Dell und Chang hier eine ERP-Studie von DeLong, welche zeigt, dass ein Vorhersagefehler einen größeren Ausschlag zeigt, als wenn die Vorhersage zutrifft:

„DeLong et al. [14] collected ERPs as readers saw sentence fragments like ‘The day was breezy and so the boy went outside to fly a/an ...’. Clearly, ‘kite’ is expected. But if the actual phonological form of ‘kite’, that it is consonantinitial, is predicted, then the comprehension system further expects to see ‘a’ rather than ‘an’. [...] There was a greater negativity after the unexpected ‘an’ compared to ‘a’ over electrode sites often

associated with the N400, an ERP component that reflects violated lexical-semantic expectations.” (Dell und Chang 2014, S. 2)

Diese Daten sind kongruent zu den Daten von Friederici et al des nächsten Abschnitts.

Neurokognitiv:

Im Zuge der neuen Bildgebungen, wie dem fMRT, entstanden auch neue Möglichkeiten, die räumlichen Strukturen und den zeitlichen Verlauf bei der Verarbeitung von Syntax besser zu erfassen. Friederici schlägt, um das Prozessieren von syntaktischen Informationen und somit die Basis für das Sprachverständnis besser zu verstehen, folgendes Modell, basierend auf multiplen ERP Studien, vor (Friederici 2002; Friederici und Kotz 2003): Das Sprachverständnis findet in drei Phasen statt, in Phase 1 (100-300 ms) wird, anhand der Wortkategorie, die grundlegende syntaktische Struktur geformt. In Phase 2 (300-500 ms) findet die semantische und morphosyntaktische Zuordnung statt und in Phase 3 (500-1000 ms) werden diese Informationen zusammengefügt. Die Erstellung der syntaktischen Satzstruktur erfolgt zwar schon am Anfang des Prozesses, jedoch findet nur in Phase 3 eine Verknüpfung der Informationen statt (daher ist ihr Modell sowohl kompatibel mit Syntax-first Modellen als auch mit interaktiven Modellen). Gestützt wird dieses Modell durch elektrophysiologische Untersuchungen im Hinblick auf den Zeitablauf und die Interaktion zwischen Semantik und Syntax.

Die N400 Welle (mit einem Peak nach 400 ms) tritt auf nach Wörtern, welche nicht in den vorherigen Kontext passen und somit eine semantische Regelverletzung darstellen, eine *left anterior negativity* (LAN) (100-500 ms) eher bei Übereinstimmungsfehlern. Je früher dieser Fehler auffällt desto früher ist auch die LAN messbar, und wird somit in Zusammenhang mit morphosyntaktischen Fehlern gesehen. Eine *early left anterior negativity* (ELAN) konnte hingegen im zeitlichen Verlauf schon früh und im Zusammenhang mit leichter zu entdeckenden Satzstruktur- oder Wortkategorie-Fehlern gemessen werden. Eine späte bilaterale, zentroparietale P600 (600-1000ms) tritt häufig bei Sätzen auf, welche nochmaliger syntaktischer Überarbeitung bedürfen, wobei P600 aber auch oft mit der syntaktischen Integration im Allgemeinen in Verbindung gebracht wird. In Friedericis Studie von 2003, in der durch doppelte Regelverletzung (syntaktisch und semantisch) mit Wörtern, deren Wortstamm selbst keine Bedeutung besitzt, kam es, obwohl die semantische Information eher verfügbar war als die Wortkategorie-Information, zu keiner N400, dafür aber zu einer

ELAN und P600 (Friederici und Kotz 2003). Dies spricht Friederici's Ansicht nach für eine funktionelle Unabhängigkeit des strukturellen Prozesses von der semantischen Information und somit für die Syntax-first Sprachmodelle. Die elektrophysiologischen Daten stützen die drei Phasen Hypothese (s. Abb.2)

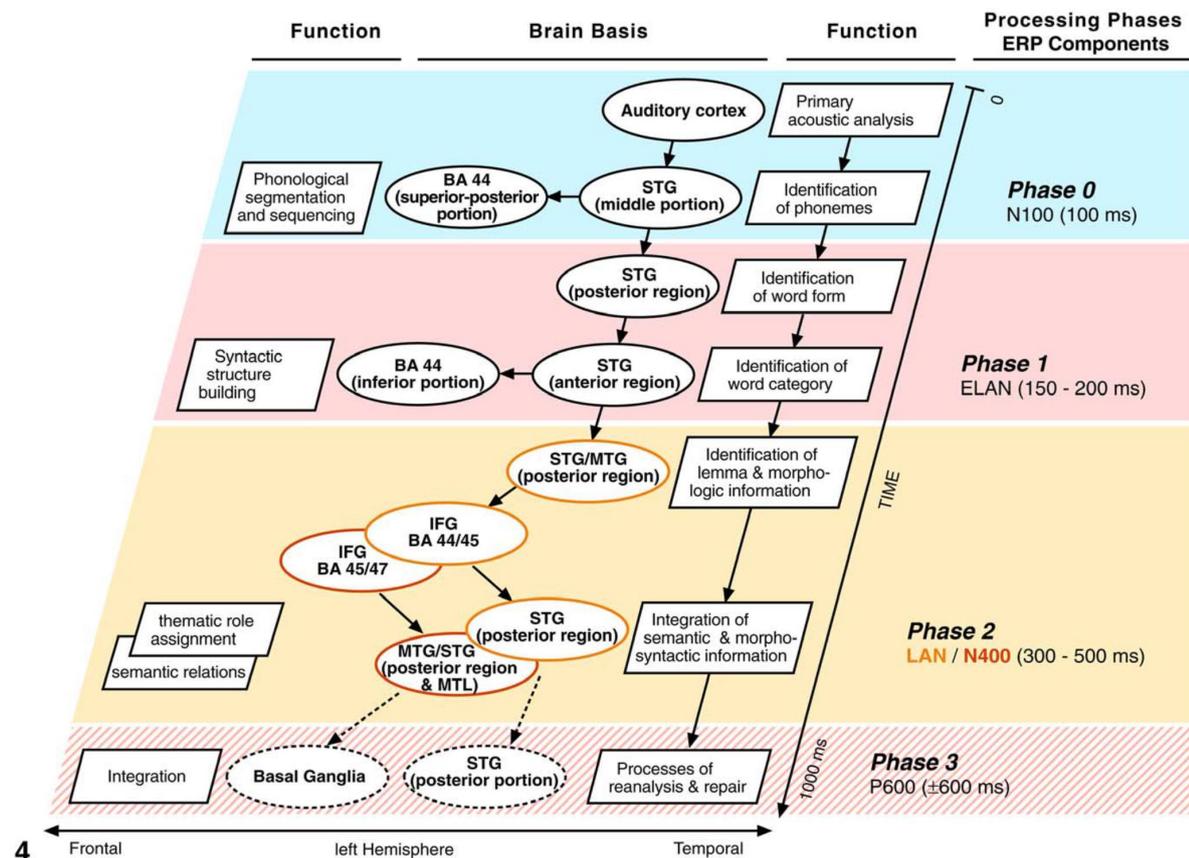


Abbildung 2: Adaptierte Version des neurokognitiven Sprachverständnismodells (ursprünglich: Friederici, 2002). Farblich abgestuft finden sich hier auf der rechten Seite die einzelnen Phasen im zeitlichen Verlauf mit ihren elektrophysiologischen Korrelaten. Die Kästen zeigen die zu den in Ovalen dargestellten neuroanatomischen Korrelaten assoziierte Funktion an. (Friederici und Kotz 2003, S. 3)

In späteren Studien wurde dieses Modell der räumlich-zeitlichen Sprachverarbeitung immer wieder aufgegriffen und mit anatomischen Strukturen und linguistischen Operationen korreliert. Grodzinsky und Friederici (2006) verweisen in einem Review auf die anatomische Beziehung der linguistischen Operatoren MERGE, MOVE und BIND, und hierbei insbesondere auf die Defizite von Broca-Aphasikern mit der Operation MOVEXP (welches die Position von Substantivsätzen verändert) im Vergleich zur erhaltenen Kompetenz von MOVEV (welches die Position von Verben im Satz verändert). Eine Verortung dieser Operation konnte in mehreren Studien im Zusammenhang mit einer Aktivierung des linken IFG gezeigt werden (Ben-Shachar et al. 2004; Bornkessel et al. 2005; Santi und Grodzinsky 2010). Friederici unterstützt diese Ansicht, da die Rollenzuordnung, welche für Object-first Sätze schwieriger angesehen wird, durch den IFG (BA 44/45) in Phase II unterstützt wird und ihre

Aktivität von der Komplexität und somit der Anzahl an Operatoren (meist MOVE), abhängig zu sein scheint. Wenn das WM konstant gehalten wird, ist die Aktivierung damit von MOVE abhängig (Grodzinsky und Friederici 2006). Eine Aktivierung der FOP in Phase I der Sprachverarbeitung deutet auf eine Beteiligung der FOP bei der Satzstrukturbildung und somit als Teilaspekt der Operation MERGE hin. Da jedoch eine Aktivierung sowohl der FOP als auch des ventralen prämotorischen Cortex bei unerwarteter Wortfolge vorkommt, bleibt es unklar, ob diese Bereiche funktionell unterschiedlich sind. Eine weitere Aktivierung zeigt sich für den anterioren STG bei der „online“ Verarbeitung lokaler Regelverletzungen sowie der schnellen Entdeckung fehlender Übereinstimmung zwischen der erwarteten und der tatsächlichen Satzfolge. Der linke posteriore STG hingegen zeigt sich in Phase III aktiv, insbesondere, wenn die auftretende Struktur grammatikalisch unmöglich in den Satz zu integrieren sei, bei Änderungen der Wortabfolge („Scrambling“ im Vgl. zu normaler Wortfolge) oder beim Vergleich von Object-first mit Subject-first Sätzen. Eine Aktivierung des linken sowie rechten posterioren STG bei der Verarbeitung von verbbasierten Hierarchien legt eine Beteiligung an der Integration lexikalischer und syntaktischer Informationen nahe (Friederici et al. 1993; Kaan et al. 2000). Die beiden bei Broca-Aphasikern intakte Operatoren, MOVEV und BIND, projizierten sich außerhalb dieses Areals (li SFG, li MFG, re MFG, li MTG, li Gyrus orbitalis, nicht überschneidend mit MOVE-Areal). Friederici bildet daher zwei Subnetzwerke: in ersterem, bestehend aus anteriorem STG in Verbindung mit dem FOP über den Fasciculus uncinatus, sieht sie die lokale Satzstrukturbildung verankert, in dem zweiten Netzwerk aus Broca-Areal über den Fasciculus longitudinalis superior zum posteriorem STG die Beteiligung an Abhängigkeitsrelationen und syntaktischer Integration (Friederici et al. 2006a; Grodzinsky und Friederici 2006).

1.3 Anatomische Sprachmodelle

Seit jeher stellen sich Wissenschaftler unterschiedlichster Fachrichtungen die Frage der anatomischen Korrelate für den Sitz der Sprache und ihrer assoziierten Funktionen im menschlichen Gehirn. Schon vor der Entwicklung und Etablierung von modernen bildgebenden Verfahren versuchten Wissenschaftler, anhand klinischer Bilder die Prozesse des Sprachverständnis und der Produktion mit den Strukturen des Gehirns in Einklang zu bringen. Prominentes Beispiel hierfür stellen das Broca Areal sowie das

Wernicke Areal als kritische Region bei Vorliegen bestimmter Aphasietypen dar. Da Patienten mit Läsionen in der Region um die BA 44/45 zu agrammatischer Satzbildung neigen, wurde diese Hirnregion lange als Sitz der Syntax angesehen.

Die Beteiligung des Broca Areals wird auch heute noch als wesentlich für die Verarbeitung von Syntax angesehen. Umstritten ist jedoch, ob dessen Aktivierung und Integrität zwingend notwendig bei der Verarbeitung von Grammatik ist und inwiefern dieses Areal sprachspezifisch ist.

1.3.1 Das Broca-Areal

Auch heute noch ist die wissenschaftliche Meinung, dass das Broca-Areal an der syntaktischen Verarbeitung beteiligt ist. Während frühere Ansichten von einer spezifischen Aufgabe des Broca Areals einzig für die Verarbeitung von Sprache ausgegangen sind, steht heute eher eine Aktivierung als Teil eines größeren, komplexen Netzwerkes im Vordergrund. Eine funktionelle Differenzierung des Broca Areals wird unterstützt durch zytoarchitektonische als auch phylogenetische Unterschiede der Areale (Sanides 1962; Brodmann 1909).

Im Folgenden soll ein Überblick über die verschiedenen Funktionen des Broca Areals gegeben werden.

1.3.1.1 Natürliche Syntax

Das Broca Areal wurde auch in mehreren neurolinguistischen Studien als Sitz der Syntax untersucht. Die Operation „movement“ wird als Komponente innerhalb der Syntax-Verarbeitung gesehen. Movement tritt in einer Vielzahl von Satzarten auf, wie beispielsweise Fragesätzen oder Objekt-Relativsätzen. Movement kann allgemein als Bewegung eines Wortes beschrieben werden, also wenn ein Wort aus seiner ursprünglichen Position an eine andere Satzstelle „verschoben“ wird und eine Art Lücke an der ursprünglichen Stelle hinterlässt. Ben-Shachar und Kollegen untersuchten eine spezielle Art von movement (repräsentiert durch Thematisierung und wh-Fragen) und konnten hierfür eine spezifische Aktivierung des linken IFG zeigen (Ben-Shachar et al. 2004). Ebenfalls aktiviert wurden der ventrale präfrontale Sulcus sowie der posteriore STS. Da Scrambling, also das Vertauschen von Elementen innerhalb eines Satzes, und Movement beide das gleiche neuronale Netzwerk

aktivieren, wird Scrambling linguistisch auch als besonderer Fall von Movement gesehen (Makuuchi et al. 2013).

Folia und Petersson (2014) halten dagegen, dass die BA 44/45 eher im Zusammenhang mit implizitem Lernen von AGL aktiviert wird und der linke IFG somit eher als eine Art übergreifender, online Strukturprozessor gesehen werden sollte, da eine Aktivierung auch bei einer einfachen rechtslinearen unification grammar auftrat, welche weder centre-embeddings noch movement aufwies (Petersson et al. 2012).

Musso und Kollegen konnten in einer Studie 2003 zeigen, dass eine Aktivierung des Broca Areals bei der Verwendung von Regeln, welche den Prinzipien der universellen Grammatik nach Chomsky entsprachen, stattfand, während Regeln, welche diese verletzten (lineare Anordnung) zwar durchaus erlernt werden konnten, jedoch keine Aktivierung der Broca Region aufwiesen (Musso et al. 2003). Dieses Muster war unabhängig von der verwendeten linguistischen Sprachfamilie (in diesem Fall italienisch und japanisch). Diese Ergebnisse sprechen für eine automatische Aktivierung des Broca Areals bei der Erlernung neuer, natürlicher Sprachen und somit für eine universelle aber auf syntaktische Hierarchien spezialisierte Funktion des Broca Areals.

Der linke IFG wird zwar für die syntaktische Analyse bevorzugt, die rechtshemisphärische Region ist aber auch zu metalinguistischen Entscheidungen fähig. Moro und Kollegen untersuchten das Erlernen von grammatikalischen Regeln unter der Verwendung einer unreellen Sprache, die Pseudowörtern („quasi-Italian“) benützte, und fanden hierbei neben einer Aktivierung des linken IFG auch eine rechtshemisphärische Aktivierung im Homolog der BA 44 (Moro et al. 2001). Friederici (2002) schlug eine Aufteilung des Broca Areals vor, ein anteriorer Teil (BA 47/45) soll für semantische Relationen aktiv sein, das frontale operculum für lineare syntaktische Abhängigkeiten und der posteriore Anteil (BA 44) eher bei der Verarbeitung syntaktischer Relationen, insbesondere bei weit entfernten grammatikalischen Abhängigkeiten. Andere Autoren hingegen setzen der Aufgabe von BA 44 entgegen, dass dessen Verbindung zu dem dorsalen Pfad und deren Aktivierung bei komplexen syntaktischen Operationen auch auf einer erhöhten Arbeitslast des working memory beruhen könnte und somit nicht zwangsläufig bei der

syntax-spezifischen Verarbeitung aktiv seien (Musso et al. 2015; Weiller et al. 2009). Dem BA 45 wird hier hingegen eine stärkere Rolle in der Verarbeitung syntaktischer Prozesse eingeräumt und, gemeinsam mit dem ventralen Trakt, sogar eine Schlüsselrolle in der Verarbeitung von Grammatik zugewiesen. Santi und Grodzinsky (2007) konnten eine Beteiligung der BA44 sowie eine selektive Beteiligung der BA 45 für die syntaktische Operation MOVE zeigen.

Manche Autoren sehen die Rolle des Broca Areal als einzigartig und spezifisch für die Verarbeitung linguistische Syntax an (Friederici 2011). Immer mehr Studien zeigen jedoch, dass diese Region nicht notwendig für die Verarbeitung von Syntax sei (Dronkers et al. 2004; Indefrey et al. 2001a; 2001b).Kaan und Swaab verweisen in ihrem Review darauf, dass eine Schädigung des Broca Areal nicht zwangsläufig zum klinischen Bild einer Aphasie mit syntaktischen Defiziten (Broca-Aphasie) führe und umgekehrt, auch Läsionen anderer Strukturen zu dieser Art von Aphasie führen können (Kaan und Swaab 2002). Sie schlussfolgern daraus, dass die geschädigten Areale in Patienten mit einer Broca-Aphasie nicht zwangsläufig die Speicher für syntaktisches Wissen sein müssen, sondern auch Schäden, welche zu Defiziten in der Verarbeitung führen, hierfür ausreichen: *„In this view, the problems of Broca’s aphasics with syntax are a result of a temporal processing deficit in activating or integrating information, or a shortage of resources needed for these processes“*. (Kaan und Swaab 2002, S. 352). Das Broca Areal selbst sei daher nicht zwangsläufig an der Verarbeitung von Syntax beteiligt, sondern für die Verarbeitung und Speicherung noch nicht verarbeiteten Satzmaterials zuständig und diene somit als Arbeitsgedächtnis bei der Verarbeitung komplexer grammatikalischer Sätze (*„This suggests that Broca’s area is not unique for syntactic processing but is additionally activated when processing load increases because of lexical or other factors“* (Kaan und Swaab 2002, S. 353)). Die Verbindung dieser Region mit anderen syntax-relevanten Arealen scheint hingegen notwendig für das Syntaxlernen. Eine DTI Studie zeigt, dass die Integrität der weißen Masse um das Broca Areal notwendig ist, um für gesunde Probanden das Erlernen neuer syntaktischer Regeln zu ermöglichen (Flöel et al. 2009).

Im Hinblick auf die Aktivierung des Broca’s Areal mit nicht-linguistischen Aufgaben, wird diese Region von einigen Autoren als supramodaler Prozessor für hierarchische

Handlungssequenzen gesehen (Christiansen et al. 2010; Tettamanti und Weniger 2006).

Mehrere Studien zeigten eine Aktivierung des linken IFG auch in vielen nicht sprachbezogenen Prozessen; beispielsweise der Erkennung von Gesten, der mentalen Vorstellung, Vorbereitung und Ausführung von Handbewegungen und Handlungsplanung, hierarchisch organisiertes, aber nicht-linguistisches Verhalten wie z.B. mathematische Aufgaben, räumlich-visuelle Hierarchien, Verarbeitung von Musik (Bahlmann et al. 2008; Christiansen et al. 2010; Fadiga et al. 2009; Musso et al. 2015). So konnten insbesondere Musso und Kollegen zeigen, dass die inferioren Teile der Pars triangularis und opercularis sowohl in der Verarbeitung von Sprache als auch von Musik aktiv sind (Musso et al. 2015). Diese Ergebnisse bestätigen frühere MEG und EEG Studien, welche ebenfalls auf eine gemeinsame Verarbeitung von linguistischen und musikalischen Hierarchien im Broca Areal hindeuteten (Koelsch et al. 2005; Maess et al. 2001). Diese Studien liefern somit einen Hinweis auf eine Aktivierung des Broca Areals bei hierarchisch-organisierten, nicht zwangsläufig linguistischen, Aufgaben, wie der Handlungsplanung, bei mathematischem Denken oder der Verarbeitung melodischer und rhythmischer Strukturen.

Aus den Ergebnissen diesen Studien kann man schlussfolgern, dass der neuronale Schaden, welcher zu dem klinischen Bild des Agrammatismus führt, zunächst für kognitive Defizite, inklusive des sequenziellen Lernens, verantwortlich ist. Patel zeigten dass Patienten mit einer Broca Aphasie auch Defizite in der Verarbeitung der Tonalität von Musik zeigten (Patel et al. 2008).

1.3.1.2 Working Memory

Die Bedeutung des Broca Areals für das Working Memory wurde in mehreren Studien untersucht. Diese deuten auf eine Beteiligung anderer Regionen hin, als es für die reine Verarbeitung von Syntax der Fall ist. Makuuchi et al. (2009) konnten eine initiale Beteiligung des dorsalen IFG (BA 44) bei Sätzen mit *centre-embedding* zeigen, eine Aktivierung für das nicht-syntaktische, verbale WM hingegen wurde im IFS gesehen (Makuuchi et al. 2009). Des Weiteren konnte eine Beteiligung der Broca Region bei der Verarbeitung von sogenannten „*filler-gap dependencies*“ gezeigt werden (Makuuchi et al. 2013). Diese Aktivierung wurde als Ausdruck einer erhöhten working memory Last

gewertet und zeigte sich hier sowohl in der Pars opercularis als auch in dem posterioren Anteil der Pars triangularis. Zudem zeigte sich hier ein Netzwerk, bestehend aus dem IFS, mittleren MTG und IPS zu den bereits genannten Arealen aktiv (ebd.).

Friederici befürwortet ein Modell mit einer Unterteilung der BA 44 in einen superioren Anteil für das working memory und einen inferioren Anteil für erhöhte syntaktische Komplexität (Friederici 2011). Sie sieht zwar das Broca Areal an der Aufgabe des working memory beteiligt, dennoch ist für sie das verbale WM spezifisch für Syntax, da für die Verarbeitung syntaktisch komplexer Sätze die Beteiligung des WM notwendig sei.

Hieraus resultieren jeweils zwei getrennte dorsale Pfade (I) vom temporalen Cortex zum prämotorischen Cortex (bottom-up Info) und (II) vom temporalen Cortex zu BA 44 (Top-down Prozesse), sowie für den ventralen Trakt eine funktionelle Unterteilung (I) von BA 45 via ECFS und (II) vom FOP via UF zum temporalen Cortex (Friederici et al. 2006a).

1.3.1.2.1 Die Rolle des Hippocampus

Der Hippocampus nimmt eine wichtige Rolle im Abruf episodischer Gedächtnisinhalte ein und spielt zudem eine wichtige Rolle beim expliziten Lernen (Strange et al. 1999). Strange und Kollegen (1999) untersuchten, unter der Verwendung von trial-by-trial Feedback, Änderungen in der Schriftart (*perceptual novelty*) sowie das Erlernen eines neuen Vokabulars (*exemplar novelty*). Es zeigte sich eine Aktivierung des linken anterioren Hippocampus für beide Aspekte, jedoch mit einer exponentiellen Abnahme bei Adaptierung an den neuen Reiz. Der posteriore Hippocampus hingegen wurde bilateral aktiviert, jedoch nur bei Anpassung an sich wiederholende Beispiele, nicht jedoch für eine Anpassung an die Schriftart, sodass diese Aktivität mit einer Familiarisierung für bedeutungsvolle Reize einhergehend angesehen wurde. Im Gesamtbild der Memory Funktion ergibt sich somit die Rolle des anterioren Hippocampus für die Bewertung von Neuerungen, die des posterioren Hippocampus für den Abruf von Gedächtnisinhalten. In einer zweiten Studie (Strange 2001) untersuchten sie *rule change vs. vocabulary change*, ebenfalls wieder mit Feedback über die gegebene Antwort nach jedem Trial. Auch hier konnte die Aktivierung des Hippocampus wieder der Verarbeitung neuer Reize zugeordnet werden (Aktivierung bei Änderung der verwendeten Buchstaben, wobei hier aber auch eine Aktivierung im

Sinne ähnlichkeitsbasierter Kategorisierung denkbar wäre). Bei einer Änderung der Regel hingegen wurde der fronto-polare präfrontale Cortex bilateral aktiviert, dieser ist somit an komplexen Problemlösungen und dem Lernen expliziter Regeln beteiligt. Zudem konnte gezeigt werden, dass in der Therapie chronischer, aphasischer Schlaganfallpatienten der Erfolg der Sprachtherapie von der Integrität des Hippocampus sowie dessen umgebenen Strukturen abhängig ist (Meinzer et al. 2010).

Auch bei dem Erlernen neuer syntaktischer Regeln einer Pseudo-Sprache konnte eine Aktivierung des Hippocampus festgestellt werden. Opitz und Friederici (2003) zeigten, dass die Probanden die erlernten syntaktischen Regeln auch auf neue Beispiele übertragen konnten. Beim Erlernen der Regel konnte eine abnehmende Aktivität im linken posterioren Hippocampus festgestellt werden, welche jedoch nach Beenden der Lernphase nicht mehr signifikant vorhanden war. Die Aktivierung des linken fronto-opercularen Cortex nahm stattdessen zu. Die Autoren assoziierten die Aktivierung des Hippocampus mit einer initialen ähnlichkeitsbasierten Lernphase. „We attribute this hippocampal response pattern to similarity-based learning, which apparently governs the initial state of learning the artificial grammar and which is no longer used once the grammatical rules of the artificial language have been acquired.“ (Opitz und Friederici 2003, S. 1733) . Diese Beobachtung stützen sie durch eine Aktivierung des Hippocampus bei Regelverletzungen lokaler Satzstrukturen, da hier zunächst eine neue Verbindung zwischen dem Wort und seiner syntaktischen Rolle hergestellt werden müsse, was wiederum in einer erhöhten Anforderung des Hippocampus und seiner Rolle bei ähnlichkeitsbasiertem Lernens resultiert (Opitz und Friederici 2007). Auch hier konnte eine Aktivierung des ventralen prämotorischen Cortex festgestellt werden, insbesondere für die Verletzung lokaler Abhängigkeiten. Diese Aktivierung wurde in Zusammenschau mit früheren Studien als Hinweis auf die Funktion des vPMC bei der Entdeckung von lokalen Regelverstößen in natürlichen Sprachen gesehen (Opitz und Friederici 2007).

1.3.1.2.2 Die Rolle des dorsolateralen präfrontalen Cortex

Für die Verarbeitung sequenzieller Strukturen, wie beispielsweise SRT Aufgaben, konnte die Aktivierung eines frontostriatalen Netzwerkes gezeigt werden. Hierbei zeigte sich eine Aktivierung des dlPC sowohl an impliziten als auch an expliziten Prozessen beteiligt. Kane et al sehen in dem dlPC in Bezug auf WM Aufgaben die Rolle,

Informationen in einem aktiven und abrufbaren Zustand zu halten. Während Aufgaben, welche eine Aufrechterhaltung von Informationen benötigen, (sog. Delay-Aufgaben) auch eine Assoziation mit posterioren Regionen zeigten, blieb jedoch nur der dlPC aktiv, wenn eine weitere, der Ablenkung dienende Aufgabe, eingeführt wurde. Probanden mit Schädigungen des dlPC zeigten zudem Schwierigkeiten bei Gedächtnisaufgaben, welche eine Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit und eine Abschirmung von zielrelevanten Informationen gegenüber Ablenkungen erforderte (Kane und Engle 2002). Des Weiteren wurden Probleme in der Fokussierung und dem Wechsel von Aufmerksamkeit berichtet (Hornak et al. 2004; Kane und Engle 2002). Robertson konnten 2001 zeigen, dass eine selektive Aktivierung insbesondere für visuelle Hinweise stattfand und plädieren demnach für eine zentrale Rolle des dlPC für das visuospatiale WM (Robertson et al. 2001). Im Gegensatz zu dem MTL scheint der dlPC eher an einem kurzzeitigen Abruf von WM Funktionen beteiligt, welche ein gewisses Ausmaß nicht übersteigen (Schendan et al. 2003).

1.3.2 Das STG als sensorisches Sprachareal

Der STG nimmt ebenfalls eine zentrale Rolle in der Verarbeitung von syntaktischen Strukturen ein und lässt sich ebenfalls funktionell weiter unterteilen. Mehrere Studien konnten einen Zusammenhang mit der Aktivierung des anterioren STGs bei der Verarbeitung von Syntax zeigen (Friederici und Kotz 2003). Friederici und Kollegen sehen in der Aktivierung des anterioren STGs gemeinsam mit dem FOP eher einen Zusammenhang bei lokalen Regelverletzungen (Friederici 2011; Friederici et al. 2006a; Rüschemeyer et al. 2005). Humphries et al. (2001) konnten dem anterioren STG jedoch auch eine Rolle bei syntaktischem Verständnis zuweisen. Der posteriore STG als ursprünglich sensorisches Sprachareal nimmt eine zentrale Rolle im Sprachnetzwerk ein. Hier soll eine Zuordnung thematischer Rollen und die Integration von syntaktischer sowie semantischer Information stattfinden (Bornkessel et al. 2005; Friederici 2011; Grodzinsky und Friederici 2006). Einige Autoren assoziieren den posterioren STG allerdings auch mit der Verarbeitung von syntaktisch komplexen Strukturen und Sätzen (Bornkessel et al. 2005; Friederici 2009). Allgemein wurde eine bilaterale Aktivierung des STG/MTGs bei der Verarbeitung semantischer Prozesse beobachtet (Friederici et al. 2010), sowie bei der Verwendung natürlicher Sprachen im Vergleich zu AGL (Friederici 2009).

1.3.3 Der Caudatus Kopf

Die Basalganglien werden klassischerweise der Verarbeitung von stimulus-response Verhältnissen und dem prozeduralen Memory zugeordnet (Ullman 2004; Rose et al. 2002; s. auch Abs. 1.4.3). Insbesondere unter der Verwendung von feedback-basiertem Lernen konnte eine Aktivierung des Caudatus Kopfes festgestellt werden (Poldrack et al. 2001; Vries et al. 2010). Mehrere Studien verweisen auf die Rolle eines fronto-striatalen Netzwerks in der Verarbeitung impliziten Lernens insbesondere auch bei sequenzieller Verarbeitung wie es beispielsweise bei AGL der Fall ist (Forkstam et al. 2006; Janacsek et al. 2020; Petersson et al. 2004). Verbindungen des Caudatus Kopf und Körper konnten für den präfrontalen Cortex, den Gyrus präcentralis, IFG, orbitofrontalen und frontopolen Cortex gezeigt werden (Kotz et al. 2013). Der Ncl. caudatus selbst scheint jedoch nicht direkt an der Verarbeitung von AGL Stimuli beteiligt zu sein. Mehrere Studien konnten hier eine erhaltene Fähigkeit für das Erlernen von AGL bei Probanden mit einer Parkinsonerkrankung, und somit eine beeinträchtigte Funktion der Basalganglien aufwiesen, feststellen (Meulemans et al. 1998; Smith et al. 2001).

1.3.4 Netzwerke der Sprache

Schon Carl Wernicke befasste sich 1874 bereits mit der Verarbeitung von Sprache, schlug ein Modell vor, in dem die Sprachverarbeitung als Interaktion zwischen mehreren Arealen zu verstehen war und schuf somit die Grundidee der Netzwerkmodelle. In seinem Modell wurde das „sensorische Sprachareal“ (Wernicke-Areal) über einen Fasertrakt, den Fasciculus arcuatus, mit dem „motorischen Sprachareal“ (Broca Areal), verbunden. Außerdem sah er eine Verbindung dieser beiden Areale durch einen ventral gelegenen Fasertrakt vor. Die Idee einer ventralen Verbindung geriet lange Zeit in Vergessenheit und wurde erst einige Zeit später wieder aufgegriffen und auf ein „dual stream Modell“ ausgeweitet (Weiller et al. 2011). Mesulam sprach 1990 erstmals von einem „Large Scale“ Ansatz für neurokognitive Funktionen und somit von einem allumfassenden Netzwerkmodell mit modalitätsspezifischen Epizentren. Er beschreibt für das menschliche Gehirn mindestens fünf unterschiedliche Netzwerke, eines davon das Sprachnetzwerk, mit

Epizentren in Broca und Wernicke (Mesulam 1998, 1990). Als grundlegende anatomische Strukturen sind hieran hauptsächlich beteiligt der anteriore Temporallappen sowie die mittleren und hinteren Anteile des STG und MTG, mittlere frontale Regionen, der linke IFG (BA 44,45), und daran angrenzende Regionen sowie die Basalganglien (Friederici 2011; Moro et al. 2001; Petersson et al. 2012). Ebenso rechtshemisphärische homotope Regionen werden genannt, diese zeigen jedoch eine unterschiedliche Sensitivität im Vergleich zur linken Hemisphäre und scheinen insbesondere bei der Wahrnehmung von Sprache in beiden Hemisphären eine Rolle zu spielen (Hickok und Poeppel 2004, 2007). Basierend auf den visuellen „what“ und „where“ pathways (Mishkin et al. 1983) sowie der dorsal-ventralen Einteilung des auditorischen Systems nach (Rauschecker 1998) entwickelten Hickok und Poeppel 2004 ein duales Modell für die Sprachverarbeitung. Sie plädieren hier für eine aufgabenabhängige Aktivierung der sprachrelevanten Gehirnareale, sodass beispielsweise andere Aufgaben und andere Strukturen für Sprachverständnis als für die Wiederholung oder Produktion benötigt werden. Es wird nicht automatisch immer das gleiche Areal aktiviert, sondern abhängig von der genauen Aufgabe und ihren Anforderungen werden unterschiedliche Teile des übergreifenden Sprachnetzwerks aktiv.

Als Modell für die Verarbeitung von Sprache hat sich daher ein bilaterales fronto-temporales Netzwerk mit linkshemisphärischer Prädominanz für Syntax und Semantik etabliert. Zwei unterschiedliche Ströme verbinden den posterior gelegenen STG mit den frontal gelegenen Sprachverarbeitungszentren. Diese liegen in den posterior-inferioren, frontalen Regionen und beinhalten unterschiedliche Anteile des Broca Areal, das FOP/Insula, „motor face area“ sowie dorsale prämotorische Regionen. Ein ventraler Trakt, welcher ventrolateral verläuft, verbindet den STS und posterioren ITL (Teile des MTG und ITG) mit posterior-inferioren frontalen Regionen, sowie ein dorsaler Stream aus der Tiefe der Sylvischen Fissur (Area Spt), dorsoposterior verlaufend, zieht in Richtung inferior parietalen und posterioren frontalen Lappenregionen. Der ventrale Trakt wird als eine Art Schnittstelle zwischen klangbasierten Repräsentationen und der Sprache gesehen („sound-to-meaning“, Lemma Level bei Levelt), während der dorsale der auditorisch-motorischen Integration („sound-to-articulation“) dient (Hickok und Poeppel 2004, 2007; Saur et al. 2008; Weiller et al. 2009).

Saur und Kollegen (Saur et al. 2008) konnten mittels fMRT und DTI-basiertem fibre tracking den wahrscheinlichsten Verlauf der zwei Trakte zeigen, mit dem dorsalen Pfad entlang des AF/SLF (aktiv bei Wortwiederholungen = sound-to-articulation) und dem ventralen durch die EmC (aktiv bei Sprachverständnis = sound-to-meaning). Auch Frey et al. (2008) konnte diese Ergebnisse bestätigen, mit einer Verbindung der anterioren BA45 zum mittleren STG via ECFS und der posterioren BA 44 zum inferioren parietalen Cortex via SLF, und somit eine gewisse Übertragbarkeit der Ergebnisse von Makaken Affen auf den Menschen beweisen.

Über die Direktionalität der beiden Trakte kann hier keine Aussage gemacht werden, bisher werden sie als bidirektional angenommen. Hickok und Poeppel (2004) beschreiben diese Bidirektionalität des dorsalen Trakts sogar als "[...] functional anatomic basis for verbal working memory (Baddeley, 1992), that is, the ability to use articulatory-based processes (rehearsal) to keep auditory-based representations (storage) active." (Hickok und Poeppel 2004, S. 73).

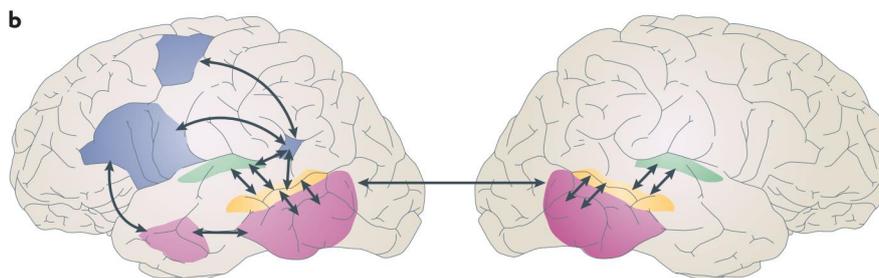


Abbildung 3: Das dual-stream Modell und die ungefähre anatomische Lokalisation der Modell-Komponenten
Grüne Fläche bezeichnet Regionen an der dorsalen Oberfläche des STGs. Gelbe Areale in der posterioren Hälfte des STS sind auf phonologischer Ebene beteiligt. Pinke Areale repräsentieren den ventralen Trakt mit einer bilateralen aber schwach linksdominanten Verteilung. Blaue Regionen repräsentieren den dorsalen Trakt mit starker linkshemiphrischer Dominanz. (Hickok und Poeppel 2007, S. 395)

Eine weitere populäre Methode zum näheren Verständnis des dual stream Modells stellen Läsionsbasierte Studien dar. Ueno et al. (2011) konnten ein rechnergestütztes Modell erstellen, welches bei simulierten Läsionen der einzelnen Trakte das zu erwartende klinische Sprachmuster erreichte. Durch diese gezielte Verletzung einzelner Strukturen konnte anhand des Modells gezeigt werden, dass es eine zumindest partielle Aufgabenteilung für die Trakte stattfindet: während dorsale Läsionen einen größeren Einfluss auf die Wiederholung hatten, führten ventrale Schäden eher zu Verständnisproblemen und Schwierigkeiten beim Benennen. In einer späteren Studie von Kümmerer und Kollegen konnte mittels des Läsions-Defizit Ansatzes und der Untersuchung von Patienten mit akuter Aphasie das dual stream Modell und insbesondere die Beteiligung von Fasern der weißen Hirnsubstanz in

Aphasiepatienten bestätigt werden (Kümmerer et al. 2013). Der dorsale Trakt schien hier hauptsächlich in Bereichen der Wortwiederholung beeinträchtigt zu sein und somit für die Verarbeitung neuer Stimuli zuständig, evtl. auch im Sinne eines verbalen Kurzzeitgedächtnisses.

Während einige Wissenschaftler die Verarbeitung hierarchisch angeordneter, syntaktischer Sequenzen hauptsächlich als Aufgabe dorsalen Trakts vermutet (Friederici et al. 2006a; Friederici 2009; Wilson et al. 2011), sehen andere in der Verarbeitung von Syntax sowohl den ventralen als auch den dorsalen Trakt beteiligt (Griffiths et al. 2013; Musso et al. 2015; Rolheiser et al. 2011). Musso und Kollegen konnten 2015 anhand eines fMRT Experiment zeigen, dass die Entdeckung sprachlicher als auch musikalischer syntaktischer Regelverletzungen zu einer Aktivierung von Cortexarealen führte, welche sowohl durch den ventralen als auch durch den dorsalen mit weiter posterior gelegenen Arealen verbunden sind (Musso et al. 2015).

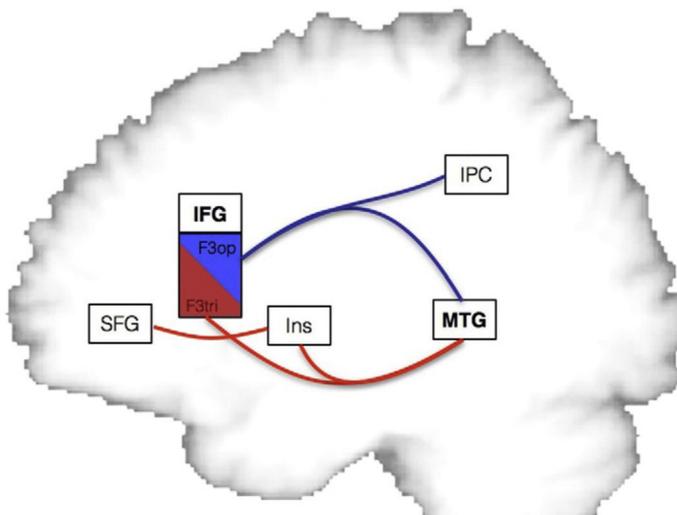


Abbildung 4: zwei Ströme für die Verarbeitung von Syntax (Musso et al. 2015, S. 277)

Dargestellt ist hier sowohl der ventrale (rot) als auch der dorsale (blau) Trakt mit der jeweiligen Beziehung zum IFG. Während der dorsale Trakt einer Verbindung zwischen der Pars opercularis und dem MTG sowie dem inferioren parietalen Cortex darstellt, zeigt der ventrale Trakt Verbindungen des MTGs sowohl in die Pars triangularis als auch zu dem Gyrus frontalis superior, ggfs. mit Zwischenstation über die Insula.

1.4 Artificial Grammar

1.4.1 Künstliche Grammatik vs. natürliche Sprache

In der Verarbeitung von natürlicher Sprache sind alle ihre Komponenten (Morphologie, Semantik, Syntax, Phonologie) eng miteinander verbunden und in ihrer natürlichen Form kaum voneinander zu trennen. Hier sollte jedoch, um ein möglichst differenziertes

und unverfälschtes Bild der zu untersuchenden Komponente, der Syntax, eine starke Reduzierung und eine möglichst große Elimination aller anderen Faktoren, erfolgen. Diese Art der Reduzierung kann durch die Verwendung einer künstlichen Grammatik erreicht werden.

Eine künstliche Grammatik wird von Strange et al. (1999) als ein System künstlicher Regeln verstanden, welches dazu dient, die Verkettung von Symbolen zu bestimmen. Eine Grammatik ist hierbei jedoch nur das Regelwerk, um eine unendliche Menge an Buchstaben oder Symbolen auf eine endliche Menge zulässiger Sätze zu beschränken, und ist daher vom Grundsatz her zunächst vom Inhalt komplett unabhängig (Fitch und Friederici 2012). Zudem sind die einzelnen Variablen flexibel anpassbar und einfach zu kontrollieren, das Erlernen der Sprachkompetenz ist somit unter allen Probanden konstant und untereinander vergleichbar (Friederici 2011).

Eine Möglichkeit stellt hier die Verwendung von Pseudosprachen wie beispielsweise BROCANTO (s.u.) oder „Quasi-Sprache“ dar. Morpho-syntaktische Eigenschaften wie Wortkategorie (Nomen, Verben, etc.) aber auch phonologische Konventionen werden hier beibehalten, das Wort ist jedoch nicht im Lexikon der zugrunde liegenden Sprache zu finden. Um hier eine korrekte Einordnung der syntaktischen Struktur vornehmen zu können, muss jedoch eine Einordnung bzw. eine Abstraktion beruhend auf jenen Kategorien erfolgen. Diese Einordnung in syntaktische Kategorien soll unabhängig von ihrer Morphologie und Semantik erfolgen. Viele Studien, die sich mit der Erlernung von Syntax und dessen anatomischen Korrelat beschäftigen, verwendeten hierzu unterschiedlichste Formen der Pseudosprache (Indefrey et al. 2001b; Moro et al. 2001; Opitz und Friederici 2003). Opitz und Friederici führen an, dass die Verwendung von linguistischen Grammatiken in ihrer neuronalen Aktivierung derer der natürlichen Sprachverarbeitung aufgrund ihrer Ähnlichkeit eher gleichen würde, als es unter der Verwendung von nicht-linguistischen AGL Paradigmen der Fall sei (Opitz und Friederici 2003). Dennoch sollte hier erwähnt werden, dass gerade durch die Nähe der linguistischen Grammatiken zu natürlichen Sprachen eine Verzerrung der Ergebnisse durch den Versuch der Probanden vorliegen könnte, diese Wörter nicht nur syntaktisch, sondern ebenfalls semantisch und lexikalisch einzuordnen.

Eine andere Möglichkeit, um die Syntax von anderen Komponenten der Sprache zu trennen, stellt die Verwendung von artificial grammar dar. Hierbei werden die einzelnen Elemente vollständig abstrahiert und werden nur noch durch eine Abfolge von Buchstaben oder Silben repräsentiert. Die syntaktischen Beziehungen werden als

„*pattern-based representation*“ erkannt, somit allein aufgrund ihrer perzeptuellen Charakteristika eingeteilt. Ein derartiges Paradigma wurde ursprünglich durch Reber 1967 eingeführt. In seinem Experiment verwendete er ein AGL Paradigma, bestehend aus einer Verkettung unterschiedlicher Buchstaben in einer bestimmten Reihenfolge, um eine FSG nach Chomsky zu erstellen. Im Falle seiner Studie wurde diese Grammatik durch folgendes Modell abgebildet, welche zur Bildung der verwendeten Sätze führte. Ein Satz begann bei S_0 und endete, wenn S_0' erreicht wurde (s. Abb. 4). Der Vorteil dieses Paradigmas liegt in der vollständigen Abstraktion, sodass hier die Syntax, soweit wie möglich, von der Semantik und anderen Bestandteilen der natürlichen Sprache getrennt wird und man ein möglichst unbeeinträchtigt Bild der Grammatikverarbeitung erhält. Reber zeigte hierbei, dass Menschen in der Lage sind, durch implizites Lernen Regeln zu erkennen und anzuwenden, also diese Regel weder bewusst erlernt zu haben noch diese beschreiben zu können. Reber sieht diesen Prozess als wesentlich für das Erlernen natürlicher Sprachen an, sodass AGL häufig als Modell zur Erforschung des Erlernens von Sprachen genutzt wird. Eine weitere häufige Verwendung findet es allerdings auch in der Erforschung impliziten Lernens. Obwohl es einige Kritikpunkte an seiner Arbeit gab, beispielsweise dass hierbei eher auf die Art des Lernens und weniger Augenmerk auf die Grammatiken selbst gelegt wurde, wurde AGL als Prinzip doch häufig wiederverwendet.

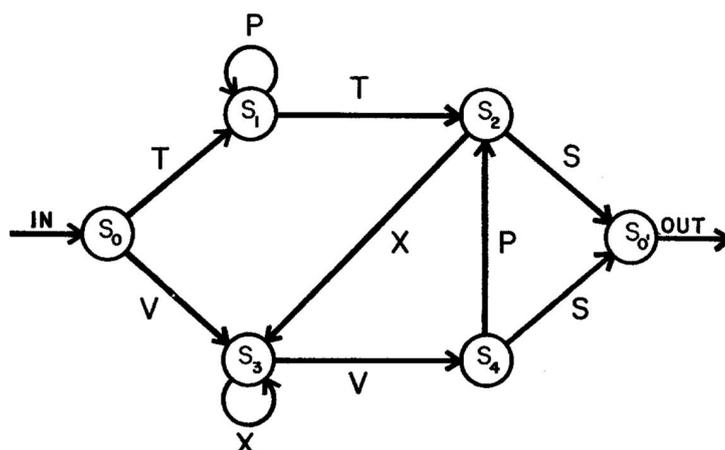


Abbildung 5: Reber 1967 - state diagram für das klassische AGL Paradigma nach Reber zur Generierung einer einfachen rechtslinearen Grammatik. Ein Satz beginnt in seiner Buchstabenfolge bei S_0 und endet, sobald S_0' erreicht wurde. (Reber 1967, S. 856) (Reber 1967, S. 856)

Dennoch gibt es einige Unterschiede von künstlicher zu natürlicher Sprache, auf die ich hier kurz näher eingehen möchte.

Ähnlichkeit der artificial und natural grammar

Bei der Verwendung und der Konstruktion von weit entfernten Satzbeziehungen in AGL werden **meist zentral eingebettete Strukturen** verwendet, welche in der natürlichen Sprache so oft nicht vorkommen und eher asymmetrisch angeordnet sind (Fitch und Friederici 2012). Für das Verständnis eines solch asymmetrischen Satzes benötigt man daher eine mehrschichtige hierarchische Abhängigkeitsordnung, für eine zentral eingebettete Struktur, wie es $A_n B_n$ ist, jedoch nicht zwangsläufig. Dennoch kommt diese Art zentral eingebetteter Strukturen in unserem alltäglichen Leben vor, wie beispielsweise in mathematischen oder computertechnischen Formeln.

In den meisten Fällen lernen die Studienteilnehmer hierbei, Beispiele als grammatikalisch oder ungrammatikalisch, diese also als einer Regel entsprechend oder entgegen, einzuordnen.

Verhaltensdaten zeigten ein vermindertes Lernen strukturierter Sequenzen bei bestimmten Hirnläsionen und sprechen für eine Relevanz der AGL im Kontext der natürlichen Sprachverarbeitung (Folia et al. 2010). Christiansen und Kollegen fanden beispielsweise Defizite im AGL bei Vorliegen von agrammatischer Aphasie (Christiansen et al. 2010).

Eine weitere Diskussion entstand um das Thema, ob Teile („chunks“) wiederverwendeten Vokabulars aus der Trainingssession die Entscheidung hinsichtlich der Grammatikalität in der Testsession aufgrund ihres häufigeren Auftretens und der damit einhergehenden größeren oberflächigen Ähnlichkeit unterbewusst beeinflussen könnte (Lieberman et al. 2004). Mehrere Autoren (Folia und Petersson 2014; Folia et al. 2008; Forkstam et al. 2006; Knowlton und Squire 1996) konnten jedoch, verglichen mit dem Grammatikalitätsstatus der verwendeten Stimuli, nur moderate Effekte der „associative chunk strength“ (ACS) auf die Annahmerate der Probanden zeigen. Um neue Sequenzen zu klassifizieren scheint also vornehmlich die syntaktische Struktur und nicht lokale Regelmäßigkeiten berücksichtigt zu werden klassifizieren.

1.4.2 (AB) n und AnB n

Zur Untersuchung der Verarbeitungsweise von Grammatiken unterschiedlicher syntaktischer Komplexität wurden im Sinne der AGL nach Reber unterschiedliche Paradigmen entwickelt. In Anlehnung an Chomskys Hierarchie stellen zwei hierarchische Ebenen eine besondere Bedeutung dar: FSG als einfache lineare Grammatik mit lediglich lokalen Abhängigkeiten der Satzelemente und PSG als höhere, komplexere Grammatik mit weit entfernten grammatikalischen Abhängigkeiten. Dieses besondere Interesse an den Grammatiken liegt hauptsächlich in der Frage nach der „Kernkompetenz“ für menschliche Sprache sowie ihrer Abgrenzung als rein menschliche Fähigkeit zu ähnlichen Fähigkeiten der Kommunikation anderer Spezies. Ein häufig verwendetes Schema ist hierfür die (AB) n Grammatik für FSG und AnB n als Vertreter der PSG. Hierbei werden zwei Gruppen A und B mit $A \neq B$ gebildet und n -Mal wiederholt (also für $n=2$ in FSG *ABAB* und für PSG *AABB*) (Fitch und Hauser 2004). AnB n lässt hierbei eine zentrale Einbettung der Strukturen prinzipiell zu und benötigt eine Erkennung der Korrespondenz von As und Bs, entweder durch Zählen oder indem bestimmte As spezifisch bestimmten Bs zugeordnet werden (long-distance dependencies). AnB n als Vertreter von PSG stellt die einfachste der PSG Grammatiken als kontext-freie Grammatik dar, welche aber als zwingende Komponente aller menschlichen Sprachen angenommen wird, aber nicht durch FSG angenähert werden kann (ebd.). Dies ist für die rein lokalen Abhängigkeiten von FSG nicht der Fall. Fitch und Hauser (2004) verwendeten Artificial Grammar Learning zur Untersuchung der Erlernbarkeit supra-regulärer Grammatiken bei Tamarindenaffen. Auch hier wurden Erweiterungen und Restriktionen der (AB) n und AnB n Regel vorgenommen, um die Erlernbarkeit der Regel zu testen. Obwohl Tamarindenaffen die FSG erlernten, konnten sie die hierarchisch organisierten Sequenzen in PSG im Gegensatz zu den getesteten Menschen nicht erlernen.

Starke Kritik erhielt diese Studie jedoch durch Perruchet und Rey, welche argumentierten, dass das gezeigte Verhalten nicht mit einem Erlernen der PSG in den Probanden oder einem Scheitern der Affen an der PSG assoziiert werden kann (Perruchet und Rey 2005). Als Hauptkritikpunkt nennen sie hier die fehlende Kopplung der einzelnen Elemente untereinander sowie einer fehlenden Kontrolle gegenüber Zählmechanismen. In der von ihnen durchgeführten Studie konnte unter Einführung einer einfachen Regelverletzung (*AABBB* anstatt *AAABBB*), gezeigt werden, dass die Probanden zwar keinen Zählmechanismus anwandten, aber dennoch keine Sensitivität

für die hierarchischen Abhängigkeiten zeigten. Stattdessen vermuten die Autoren eher eine Empfänglichkeit für akustische Veränderungen, sodass die Probanden FSG und PSG nur anhand der Häufigkeit des Wechsels von A zu B unterschieden. Die Autoren zweifeln die grundsätzliche Sinnhaftigkeit der Chomsky Hierarchie für die Erforschung der unterschiedlichen Kommunikation von Mensch und Tier (i.S. der FLB und FLN) an (ebd.).

DeVries und Kollegen zweifelten ebenfalls die generelle Erlernbarkeit von hierarchischen embeddings in AGL an (Vries et al. 2008). Ihre Annahme beruht darauf, dass sich die getesteten Sequenzen nicht allein in ihrer hierarchischen Komplexität sondern auch in ihren Oberflächenmerkmalen unterscheiden, sodass es den Testpersonen möglich sei, andere Strategien zur erfolgreichen Detektion von Fehlern und der Bewältigung der Aufgabe anzuwenden: „To ensure that such learning is assessed, participants must be tested with violating sequences that can only be distinguished from rule-conforming stimuli on the basis of the structural property in question.” (Vries et al. 2008, S. 772). In ihrem Versuch testeten sie *counting violations* (A3A2A1A4B1B2B3), *scrambling* (A3A2A1B1B3B2) und hierarchische Sätze (A3A2A1B1B2B3) gegeneinander. Die Autoren kritisieren, dass es keine Beweise für das tatsächliche Erlernen der AGL Strukturen gibt, da die Anwendung von alternativen Strategien (wie z.B. Abzählen oder das Beobachten der Wiederholung) zu ähnlichen Ergebnissen führen. Da diese Alternativstrategien nicht relevant für die natürliche Sprachverarbeitung sind, welche in zentral eingebetteten Sätzen keine zählbaren oder sich wiederholende Elemente aufweist, ist diese Art von AGL auch nicht übertragbar auf das Lernen von natürlicher Sprache. Somit ist die Aktivierung der Broca Area unter $AnBn$ im Vergleich zu $(AB)n$ (wie beispielsweise durch (Friederici et al. 2006a) ihrer Ansicht nach auf die erhöhten Anforderungen an das working memory unter PSG erklärbar, da die jeweils letzten Sequenzen auf Abruf gehalten werden müssen, was bei FSG jedoch nicht notwendig ist.

Als Reaktion auf die Kritik von deVries erfolgte eine Anpassung der AGL durch Bahlmann 2008, sodass Zählen als Mechanismus aufgedeckt werden würde (Bahlmann et al. 2008). $AnBn$ lässt vom Grundsatz her Zählen als Strategie zu, da nur die Anzahl As mit der Anzahl Bs übereinstimmen muss. Um dem entgegenzuwirken wird eine Abhängigkeit spezifischer As zu spezifischen Bs und deren Position im Satz benötigt. Im Falle der zentral eingebetteten Struktur AsB müssen benachbarte Paare von A und B zueinander passen ($A1A2A3B3B2B1$). Bahlmann et al führten zwei Arten

von Fehlern ein, eine durch Zählen leicht aufzudecken, die andere nicht. Letztere hätte, wenn Zählen als Strategie angewandt wurde, auf Chance Level liegen müssen, lag aber hier darunter. Somit scheint eine Anwendung der Alternativstrategie unwahrscheinlich. Hierbei zeigte sich eine Aktivierung der Broca Region für die Verarbeitung hierarchischer Sequenzen, nicht jedoch für die Entdeckung für Fehler.

Fitch und Friederici befassten sich weiterhin mit der Frage der Sinnhaftigkeit von $AnBn$ zur Untersuchung von PSG (Fitch und Friederici 2012). Sie führen an, dass $AnBn$ primär nur bedeutet, supra-regulär, d.h. über Finite State zu sein, nicht aber wo genau es in der Chomsky-Hierarchie liegt, und dass eine Art working memory zur Bewältigung benötigt wird. Um andere reguläre Grammatiken auszuschließen, müssen die Erweiterung von $n=2, 3, 4...$ sowie die Einschränkung, dass $AnBm$ mit $n \neq m$ abgelehnt wird, gegeben sein. Zur Bewältigung von $AnBn$ sei es dennoch egal, welche Strategie verwendet wird (wie beispielsweise zählen und vergleichen) und in welcher Reihenfolge die Elemente abgerufen werden, da alle Möglichkeiten supra-reguläre Verarbeitungsressourcen benötigen und somit über FSG sind. Obwohl andere Spezies durchaus in der Lage seien, zu zählen, würde dies allein nicht ausreichen, da auch gleichzeitig in Vergleich der Anzahl stattfinden müsse. Da Affen jedoch $AnBn$ nicht meistern konnten, scheinen sie diese „einfachere“ Ersatzstrategie nicht zu beherrschen. Rekursion ist jedoch nicht zwangsläufig für $AnBn$ notwendig. Die Verwendung des $AnBn$ Schemas sei dann sinnvoll, wenn die Frage nach der Bewältigung und Unterscheidung von regulären zu supra-regulären Grammatiken untersucht werden soll, nicht jedoch für die Frage nach Rekursion.

1.4.3 Implizites und explizites Lernen

Eine Frage, welche sich zwangsläufig bei der allgemeinen Erlernbarkeit von Strukturen stellt, ist die der zugrunde liegenden Mechanismen; demnach, ob AGL auf implizitem oder explizitem Lernen beruht. Ullman schlägt ein deklaratives/prozedurales Modell für den Erst- und Zweitspracherwerb vor (Ullman 2001). Das deklarative Gedächtnis, welches Informationen über Fakten (wie beispielsweise semantisches Wissen) und Ereignisse (episodisches Gedächtnis), enthält, kann bewusst wiederholt werden und wird daher auch explizit genannt. Das prozedurale Gedächtnis hingegen, welches für das Erlernen und Kontrollieren motorischer und kognitiver Fähigkeiten verantwortlich ist, ist weder beim Erlernen noch beim Erinnern bewusst und somit implizit. Das

implizite Gedächtnis ist besonders wichtig für Fähigkeiten, die eine Abfolge bestimmter Dinge erfordern, neuroanatomisch sind hier sowohl die Basalganglien als auch der supplementär motorische Cortex (SMA) und inferiore parietale Regionen beteiligt (Squire et al. 1993; Ullman 2001). In einem Paper von 2005 definieren Forkstam und Petersson, basierend auf den Vorschlägen von Reber, vier Charakteristika impliziten Lernens:

- der explizite Zugang zu dem erlernten Wissen bleibt limitiert
- das erlernte Wissen ist komplexer als einfache Zusammenhänge oder beispielspezifische Häufigkeitszählungen
- implizites Lernen enthält kein explizites Hypothesentesten (sondern ist automatische Konsequenz der Menge und des Verarbeitungstyps des Stimulus)
- es beruht nicht auf deklarativen Gedächtnisfunktionen, welche das MTL Memory System verwenden (Forkstam und Petersson 2005, S. 435).

Funktionell unterstützt das implizite Lernen auch die Grammatik mit ihren Subdomänen, besonders bei der Verarbeitung hierarchischer Strukturen. Im Erstspracherwerb beruht das Erlernen von Grammatik auf dem prozeduralen Gedächtnis, das des Lexikons auf dem deklarativen Gedächtnis. Mit dem Alter verändern sich die unterschiedlichen Ausprägungen des Lernens, das deklarative Gedächtnis verbessert sich, sodass ein späteres Erlernen einer Sprache auf eine andere Weise gelernt wird, als eine früher erlernte. Funktionen, die auf dem prozeduralen Gedächtnis beruhen, wie z.B. Grammatik, werden schwerer erlernt und mit einem höheren Anteil über das deklarative Gedächtnis erlernt (Ullman 2001).

Das deklarative Gedächtnis wird durch mediale temporale Lappenregionen unterstützt, sodass es hier auch logisch erscheint, dass diese Strukturen für das Zweitspracherlernen wichtiger zu sein scheinen als für Erstsprachenlerner, wohingegen Schäden in linken frontalen Regionen zu stärkeren grammatikalischen Störungen bei Erstsprachenlernern führen. Ein Experiment von Perani und Kollegen mit frühen und späten Zweitsprachlernern zeigt jedoch, dass auch späte Lerner zur Sprachverarbeitung die gleichen Hirnstrukturen verwenden wie Erstsprachlerner, sofern sie die zweite Sprache auf einem ausreichend guten Level beherrschen (Perani et al. 1998). Die verwendeten Hirnstrukturen beim Spracherwerb scheinen daher durch zwei Punkte beeinflusst zu werden: zum einen durch das Alter bei dem Erwerb und zum anderen über die Jahre an Erfahrung und Übung in der Sprache. Im Vergleich zu Chomsky unterscheidet sich das deklarative/prozedurale Modell nur dadurch, dass es

nicht die Ansicht vertritt, dass Lexikon und Grammatik durch zwei unterschiedliche, spezialisierte Systeme unterstützt werden, sondern dass es sich hierbei vielmehr um einen bereichsübergreifenden Kreislauf handelt, welcher über anteriore und posteriore Anteile verfügt.

Howard und Howard JR (2001) untersuchten, in wie weit sich die unterschiedlichen Lernsysteme untereinander beeinflussen. Schon Reber zeigte, dass AGL am besten durch implizites Lernen erreicht wird, ohne den Einfluss von explizitem Lernen (Reber 1967). Diese zwei Lernmechanismen wurden gezielt an zwei unterschiedlichen Altersgruppen getestet, da insbesondere ältere Menschen Defizite in der Verarbeitungskapazität des WM aufweisen sowie in dessen Verarbeitungsgeschwindigkeit (Salthouse 1996; Zacks et al. 2000). Ältere Menschen würden weniger simultan zur Verfügung stehende Verarbeitungskapazität aufweisen, welches sich insbesondere bei gleichzeitig auszuführenden Aufgaben bemerkbar mache (bsp. Laufen und Erinnern (Lindenberger et al. 2000)). Ihre Hypothese ist, dass der Versuch eine Regel zu extrahieren die Kapazität von einem „*covariation-detecting mechanism*“, welcher allen Formen impliziten Lernens zugrunde liegt, abzieht und dadurch das implizite Lernen behindert. Dies konnte insbesondere für ältere Probanden bestätigt werden: “In the present case, we show that trying to learn can hurt if you are older and attempt to discover a subtle spatial/sequential regularity in the events to which you are responding.” (Howard und Howard JR 2001, S. 804). Die jüngeren Probanden blieben durch den Versuch, eine Regel zu extrahieren in ihrer Leistung unbeeinflusst, im Gegenteil zeigten hier Probanden mit der Intention, eine Regel zu finden, schon früher eine Sensitivität für die zugrunde liegende Regel. Auch Pothos und Kirk konnten 2004 anhand einer Studie mit dyslexischen Patienten die Theorie bestärken, dass die Anwendung einer expliziten Strategie mit dem impliziten Erlernen interferiert (Pothos und Kirk 2004). Gesunde Probanden zeigten eine schlechtere Leistung im visuell-sequentiellen Teil als in einem visuell-eingebetteten Teil, während Patienten mit Dyslexie beide Teile gleich gut absolvierten. Dies wurde als Hinweis dafür gesehen, dass das Adoptieren einer expliziten Strategie in Gesunden die Performanz behindert. Forkstam und Petersson (2005) schlugen in ihrem Review vor, dass beide Lernmechanismen ohne Interferenz gleichzeitig stattfinden können, das explizite jedoch mit dem impliziten interferieren kann. Forkstam und Kollegen untersuchten das implizite Erlernen von AG und dessen neurologische Korrelate in einem fMRT-Experiment (Forkstam et al. 2006). Um die

explizite Lernkomponente auszuschalten, wurden den Probanden ausschließlich positive Beispiele nach der Grammatik nach Reber vorgelegt, bei der Einteilung nach ihrer Grammatikalität bekamen die Probanden kein Feedback. Des Weiteren wurde ein *balanced associative chunks design* verwendet, um die neuronalen Korrelate für den Erwerb abstrakter Regelmäßigkeiten differenziert untersuchen zu können. Die Probanden bekamen die Sequenzen acht Tage lang präsentiert, wobei an Tag 1 und 8 jeweils eine Klassifikations-Aufgabe durchgeführt wurde. Es zeigte sich hierbei, dass die Einteilung in grammatikalische und ungrammatikalische Strukturen unabhängig von der *chunk strength* (also dem häufigen oder seltenen Vorkommen von Bi- und Triplet Sequenzen) erfolgte. Als neuronales Korrelat konnte eine selektive Aktivierung der BA45 für Grammatik in einem corticostriatalen Netzwerk mit linksseitiger Lateralisation gezeigt werden. Eine Aktivierung des MTL erfolgte nicht für die Grammatik, wohl aber für die *associative chunk strength* (ACS) und wurde für eine Aktivierung bei deklarativen Aufgaben oder bei Leistungsfeedback angesehen. Das Broca Areal wurde hier als einzige frontale Region gesehen, welche sensitiv für artifizielle syntaktische Verletzungen aber nicht für ACS aktiviert wurde.

Knowlton und Squire zeigten, dass oberflächliche Ähnlichkeiten der verwendeten Buchstabenfolge einen separaten, verzerrenden Einfluss auf das korrekte Erkennen der Sequenzen haben können (Knowlton und Squire 1996). Das sogenannte „*chunk based learning*“ sei dann möglich, wenn die verwendeten Übungsbeispiele den korrekten Anwendungsbeispielen stärker ähneln als die nicht korrekten Anwendungsbeispiele. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch die ungleiche Verwendung von „*chunks*“, also Bi- oder Triplet Sequenzen von Buchstaben, welche in den korrekten Sequenzen tendenziell häufiger zu finden sind. Um die Grammatikalität getrennt von der *chunk strength* bzw. deren wechselseitiger Einfluss zu untersuchen, verwendeten (Lieberman et al. 2004) daher ein „*balanced chunk strength*“ design, in welchem die gleichen Häufigkeiten für chunks in korrekten und nicht korrekten Sequenzen gewählt wurden. Die Probanden konnten, bei gleicher *chunk strength*, dennoch grammatikalische von ungrammatikalischen Sequenzen unterscheiden, sodass dennoch ein regelbasiertes Lernen angenommen werden kann. Die Autoren fanden dennoch unterschiedliche neuronale Aktivierungen bei unterschiedlicher *chunk strength*: der rechte Hippocampus (Talaraich Koordinate 28, -30, -2) sei vornehmlich bei Sequenzen mit starker Ähnlichkeit aktiv, also *high chunk strength*, wohingegen Sequenzen mit geringer Ähnlichkeit, welche in ihrer Beurteilung also nur auf ihrer

Grammatikalität beruhen können, eine Aktivierung im rechten Ncl. caudatus zeigten. Poldrack et al. (2001) schlussfolgerten, dass der MTL für flexibles, relationales Wissen zuständig sei, während die Basalganglien für inflexibles Wissen aktiviert werden. Folia et al argumentieren 2008 daher in ihrem Review, dass ACS einen expliziten deklarativen Memory Mechanismus darstellt, während bei implizitem Lernen der grammatikalische Status unabhängig von ACS sei und als prozeduraler Lernmechanismus die Basalganglien sowie den präfrontalen Cortex aktiviere (Folia et al. 2008). Auch Kürten und Kollegen sehen in *chunk based learning* zumindest explizite Aspekte vorhanden und sehen das Erkennen von chunks als alternative Strategie beim Erlernen von AG an (Kürten et al. 2012). Auch die Aktivierung von zwei unterschiedlichen Hirnregionen sehen sie als Hinweis darauf, dass zwei unterschiedliche Lernmechanismen bei AGL vorhanden sind. In ihrer Studie untersuchten sie daher den Effekt des Faktors Alter auf *chunk based learning* und regelbasiertem Lernen. Sie konnten zeigen, dass regelbasiertes, somit implizites, Lernen im Alter erhalten bleibt, und *chunk based learning*, mit expliziten Anteilen, im Alter abnimmt. Folia konnte in einer Studie 2014 anhand der Verwendung einer „mere exposure AGL“ diese unterschiedliche Aktivierung bestätigen (Folia und Petersson 2014). Auf Verhaltensebene konnten die Probanden die relevanten Aspekte der Grammatik erlernen, in der fMRT Untersuchung zeigte die ACS jedoch keine sichtbaren Lerneffekte. Aufgrund der Aktivierung der Basalganglien in diesem Experiment sehen die Autoren die implizite Natur des Lernvorgangs begründet. Der MTL war während dieser Studie nicht aktiviert. Die funktionelle Konnektivität der beiden Areale bleibt weiterhin unklar, vermutet wird, dass beide Areale sowohl kooperativ als auch kompetitiv miteinander agieren (Brown et al. 2012; Packard und Knowlton 2002; Poldrack et al. 2001).

In einer späteren Studie untersuchten Opitz und Hoffmann (2015) den Einfluss von ähnlichkeitsbasiertem Lernen und Regellernen unter direktem Feedback beim Erlernen. In einem ersten Experiment wurde explizites Regellernen gegen implizites Memory Lernen getestet. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Gesamtperformanz in AGL sowohl von ähnlichkeitsbasierten als auch von regelbasierten Prozessen beeinflusst wird. Da angenommen wird, dass ähnlichkeitsbasiertes, implizites Lernen schnell und mühelos von statten geht, wollten die Autoren überprüfen, ob die initiale Lernphase hiermit verbunden ist. In Experiment 2 wurde daher die Trainingsphase verlängert, um die regelbasierten Prozesse am

Ende der Phase zu verdeutlichen. Die Ergebnisse konnten einen linearen Anstieg der regelbasierten Prozesse mit konstant hohen ähnlichkeitsbasierten Prozessen verzeichnen, welche auch darauf hinweisen, dass beide Prozesse parallel ablaufen. In einem dritten Experiment wurde finite state grammar, für welche ähnlichkeitsbasierte Prozesse ausreichend wären um sie zu meistern, und hierarchisch eingebettete, suprareguläre Grammatiken, für welche ein regelbasierter Ansatz angenommen wird, gegeneinander getestet. Auch hier konnte wieder gezeigt werden, dass für weit entfernte Satzbeziehungen mit einer sehr großen oder sogar unbegrenzten Möglichkeit an Satzstrukturen das regelbasierte Lernen mit einer kleinen Anzahl an Regeln vorteilhafter ist als ähnlichkeitsbasiertes Lernen. Die Autoren vermuten daher am ehesten ein Hybrid-Modell zum Erlernen von AGL, welches in der initialen Lernphase auf ähnlichkeitsbasierten Lernprinzipien beruht und diese solange anwendet, wie es damit eine ausreichend hohe Genauigkeit erzielen kann. Überschreiten die Anforderungen jedoch ein gewisses Level, setzen die regelbasierten Lernprozesse ein, welche sich über den Lernzeitraum kontinuierlich verbessern. „A further performance increase seems to be associated with an enhanced use of rule-based knowledge. The level of performance that could be gained through similarity-based processes is not only influenced by the task demands (e.g., implicit vs. explicit learning) but seems also to be limited by the complexity of the grammar to be learned (e.g., regular vs. supra-regular grammar).“ (Opitz und Hofmann 2015, S. 94)

1.5 Ziele und Fragestellung

Folgende Fragen sollen mit Hilfe dieser Arbeit beantwortet werden:

- Können Probanden mit linkshemisphärischem Schlaganfall neue syntaktische Regeln, welche den Prinzipien der UG nach Chomsky entsprechen, perfekt erlernen?
- Welche Faktoren beeinflussen in Probanden mit linkshemisphärischen Läsionen das Erlernen syntaktischer Regeln und ihrer Generalisierbarkeit?
 - **Faktor Grammatiktyp:** Gibt es Unterschiede in der Erlernbarkeit der beiden Grammatiken (FSG und PSG)?
 - Linguistisch gesehen werden die Grammatiken als unterschiedlich komplex betrachtet: während FSG nur lokale Abhängigkeiten

aufweist, können mit PSG auch weit entfernte Abhängigkeiten abgebildet werden. (Chomsky 1956; Bahlmann et al. 2006)

- Unterschiedliche neuronale Repräsentation wären erwartungsgemäß nach (Friederici et al. 2006a; Opitz und Friederici 2007; Bahlmann et al. 2008)
- **Falls Unterschiede in den Grammatiken bestehen:**
 - Worin bestehen diese (Performanz, Reaktionszeit, Fehlertyp)?
 - Können Unterschiede zwischen den Grammatiken schon initial festgestellt werden (Runde 1)?
 - Können Unterschiede in der Performanz der Grammatiken auf unterschiedliche Ausgangslevel zurückzuführen sein?
- Gibt es **spezifische Hirnregionen**, welche mit einem Defizit im Erlernen der Grammatiken assoziiert sind?
 - Mit welchen Schädigungen können eine schlechte Ausgangs- und Endleistung in Verbindung gebracht werden?
- **Faktor Aphasie**: Gibt es Unterschiede zwischen Patienten mit Aphasie und ohne Aphasie?

Hier ist auch der Zeitpunkt der Aphasie entscheidend: Die klinische Diagnose der Aphasie zum Zeitpunkt T0 gibt uns Aufschluss darüber, dass zu diesem Zeitpunkt eine Läsion eines sprachrelevanten Areals bestanden haben muss. Eine ausführliche Testung der Fähigkeit des Grammatiklernens wie sie in dieser Studie verwendet wurde, würde sich im akuten Stadium für die Patienten sehr schwer gestalten. Daher erfolgte die Testung hier in der chronischen Phase (T1). Beeinflusst die akute oder die chronische Aphasie die Erlernbarkeit von neuen syntaktischen Regeln? Durch Phänomene wie der Diaschisis und der neuronalen Plastizität können sich Patienten besonderes in den ersten Monaten von einer Aphasie erholen. Demnach stellen sich folgende Fragen:

- Haben Defizite in sprachrelevanten Arealen auch zu einem späteren Zeitpunkt noch einen Einfluss auf die Erlernbarkeit von Grammatiken?

- Oder werden nur Areale, welche zum Zeitpunkt der Untersuchung ein Defizit hervorrufen, als sprachrelevantes Hirnareal für das Erlernen von Syntax benötigt?
- Hat die Erholung von einer Aphasie („Recovery“) einen Einfluss auf die Erlernbarkeit der Grammatiken?

Die Literatur zeigt diesbezüglich Einschränkungen von Probanden mit Aphasie gegenüber gesunden Kontrollen im Erlernen von unterschiedlich komplexen Strukturen anhand unterschiedlicher Tests, beispielsweise AGL, SRT, expliziter sowie impliziter Natur (Christiansen et al. 2010; Zimmerer et al. 2014; Dominey et al. 2003)

Versuche mit Probanden mit linkshemisphärischer Schädigung und Messungen des Aphasiestatus zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten in dieser Größenordnung sind rar, sodass hier im Vergleich dieser Gruppen a priori keine verlässlichen Annahmen getroffen werden können

- **Gibt es weitere Einflussfaktoren auf den Lernerfolg bzw. auf die Erholung nach Schlaganfall?**
 - Welchen Einfluss zeigen hierbei folgende Faktoren:
 - Die Rolle des Arbeitsgedächtnis
 - Die Läsionsgröße
 - Das Alter der Probanden
 - Das Bildungsalter (educational age)

2. Material und Methoden

2.1 Probanden

Die Aufnahme dieser Studie erfolgte im Rahmen des Large Scale Projects des Universitätsklinikums Freiburg, Departement für Neurologie, hierfür liegt eine Einverständniserklärung der Ethikkommission der Universität Freiburg vor. Im Rahmen der Schlaganfallnachsorge erfolgte die Rekrutierung von insgesamt 241 Probanden mit einer Schlaganfallverteilung von 142 linkshemisphärischen und 101 rechtshemisphärischen. Da im Rahmen der Untersuchung der Sprachverarbeitung die linke Hemisphäre von vorrangigem Interesse erscheint, wurden für diese Studie die

rechtshemisphärischen Patienten außen vorgelassen, hierfür verweise ich auf zukünftige Studien. Von den 142 untersuchten Patienten erfolgte ein Einschluss von lediglich 70 Patienten in die Studie, da zur Akquirierung der Daten eine gewisse Motivation sowie die Bereitschaft für den zeitlichen Aufwand gegeben sein mussten. 2 Probanden mussten des Weiteren leider aufgrund des Auftretens eines 2. Schlaganfalls während der Nachsorgeperiode postum von der Studie ausgeschlossen werden, sodass eine Gesamtzahl von 68 Patienten in die Studienanalyse einging. Insgesamt ergab sich somit eine Geschlechterverteilung von 19 Frauen und 49 Männer. Die Altersverteilung zum Untersuchungszeitraum lag zwischen min. 29 und max. 85 Jahren (Mittelwert 63.7, Standardabweichung 13.4).

Einschlusskriterien waren Deutsch als Muttersprache, die Abwesenheit weiterer neurologischer Einschränkungen, sowie das Absolvieren von mindestens 3 Runden in einer der zwei getesteten Grammatiken, da ansonsten keine gültige Aussage über den Lernerfolg des Probanden getroffen werden konnte. Ausschlusskriterien waren insbesondere das Vorhandensein eines zweiten Infarkts. Eine TIA wurde hier nicht als einschränkend angesehen, da die betroffenen Hirnareale i.A. nicht irreversibel strukturell geschädigt wurden. Alle Probanden wurden einer MRT Untersuchung im Akutstadium unterzogen, hierfür durften ebenfalls keine Kontraindikationen vorliegen (beispielsweise Herzschrittmacher, Metallimplantate, etc.). Die wissenschaftliche Untersuchung der Probanden erfolgte in der Regel ein halbes Jahr nach dem Zeitpunkt des Schlaganfalls erfolgte. Einige Patienten wurden auch zu einem späteren Zeitpunkt nachuntersucht und getestet, sodass der Zeitpunkt der wissenschaftlichen Untersuchung im Mittel bei 2 Jahren lag (Min 5 Monate, Max 7,8 Jahre). Alle Probanden wurden über den Sinn und Zweck der neuropsychologischen Untersuchung sowie über die potentiellen Risiken der MRT-Untersuchung ausführlich aufgeklärt. Zusätzlich zur Testung wurden mehrere klinische Scores mit den Patienten zur Einschätzung der neurologischen und sprachlichen Ausfälle bzw. Fertigkeiten durchgeführt (s. Tabelle 2). Ausgewertet wurden hier die Scores des mRS, AAT und der Corsi vorwärts und rückwärts jeweils für den Zeitpunkt des Schlaganfalls (T0) und des follow-ups (T1).

2.2 Studiendesign und -ablauf

Die Durchführung der wissenschaftlichen Untersuchung erfolgte im Rahmen der Schlaganfall-Nachsorge; die vollständige Testung benötigte, je nach Auffassungsgabe des Patienten, bis zu 1 ½ Stunden. Eine Vergütung der Probanden in monetärer Form bestand nicht. Die Durchführung des Experiments wurde durchgehend von einem Versuchsleiter begleitet, an welchen sich die Probanden zwischen der Durchführung der einzelnen Runden bei Unklarheiten zur Bedienung und Durchführung wenden konnten. Vor jedem Start des Experiments wurde gezielt darauf geachtet, dass die auf dem Computerbildschirm gezeigten Anweisungen von dem Probanden verstanden wurden. Die Präsentation und Abfrage des Paradigmas erfolgte mittels eines Computers und der Software Presentation Version 18.3. Das verwendete Paradigma stammt von Dr. Mariachristina Musso (Neurologische Universitätsklinik Freiburg, FBI) in Anlehnung an bisher verwendete Paradigmen der neurolinguistischen Forschung (Bahlmann et al. 2008; Friederici et al. 2006a; Vries et al. 2008) und wurde bereits an gesunden Probanden getestet, hierfür verweise ich freundlicherweise auf die Dissertation von Andreas Wagner (Wagner 2016).

Das Ziel des verwendeten Paradigmas liegt hier im Sinne des AGL: Syntax-spezifische Effekte sollen möglichst ohne den Einfluss des semantischen Kontextes nachgewiesen werden. Untersucht wurden zwei unterschiedliche Grammatiken unterschiedlicher Komplexität ((AB)_n im Sinne einer FSG und AnB_n als PSG) hinsichtlich des jeweiligen Lernerfolges der Probanden und der Generalisierbarkeit der Grammatiken auf ein erweitertes Vokabular.

Jede der verwendeten Grammatiken setzte sich aus einem Schema aus jeweils vier Silben zusammen. Die unterschiedlichen Grammatiken unterschieden sich jeweils in der richtigen Auswahl und Anordnung der Silben, bzw. in der richtigen Abfolge und Position der Vokalen und Konsonanten untereinander. Eine Silbe wurde immer aus einem Vokal und einem Konsonanten zusammengesetzt (z.B. „me“). Vier Silben formten jeweils eine Silbengruppe, welche jedoch inhaltlich bedeutungslos blieb, sodass auch nicht durch den Kontext auf die richtige Abfolge der Silben geschlossen werden konnte.

Als Fehlertypen wurden jeweils zwei unterschiedliche Arten von Fehlern verwendet. In Zusammenhang mit der Kritik von (Vries et al. 2008) wurde hier jedoch bei falschen Silbengruppen darauf geachtet, dass diese sich rein durch ihre Syntax und nicht durch

Oberflächenmerkmale unterschieden. Für falsche Silbengruppen wurden also, entgegen früherer ähnlicher Paradigmen (Friederici et al. 2006a), bewusst darauf verzichtet, Silben der Gruppe A durch Silben der Gruppe B zu ersetzen, da dies ein Abzählen der Silben als alternative Strategie zum tatsächlichen Lernen ermöglichen würde. Stattdessen wurden hier zwei „inhaltliche“ Fehler untergebracht. Dies erfolgt durch den Tausch zweier Elemente, wodurch die hierarchische Dependenz der einzelnen Elemente untereinander aufgebrochen wird und ist somit nicht mehr korrekt ist. Zum einen wurde als Fehlertyp „Scrambling“, also der Tausch zweier benachbarter Satzelemente innerhalb eines Satzteils, verwendet. Zum anderen wurde Permutation als Fehlerart verwendet, wobei nicht benachbarte Elemente und somit Satzübergreifend Elemente gegeneinander ausgetauscht werden können.

Regel	FSG	PSG	Working Memory
Verwendete Konsonanten und Vokale S1-3 S4	p/m/d/s – e/i/u t/r/l/n – a/o/u	b/n/t/z – a/e/o f/l/w/d – e/i/u	p/m/d/s/b/n/t/z/r/k/ - a/e/i/o/u --
Grammatikalisch	A1B1A2B2 (pu mu pe me)	A1A2B2B1 (be bo no ne)	„ko“ „mu“ „ti“ 2 oder mehr davon vorhanden
Ungrammatikalisch Scrambling Permutation	B1A1A2B2 (mu pu pe me) A1B1B2A2 (pu mu me pe) A2B1A1B2 (pe mu pu me) A1B2A2B1 (pu me pe mu)	A2A1B2B1 (bo be no ne) A1A2B1B2 (be bo ne no) A1B2A2B1 (be no bo ne) B1A2B2A1 (ne bo no be)	Nur 1 oder keine der Silben vorhanden

Tabelle 1: Paradigma und Fehlertypen

Die korrekte Position sowie der Austausch der Satzteile bei falschen Silbengruppen sind jeweils hervorgehoben.

Die einzelnen Grammatiken:

Finite State Grammar (FSG): Die Abfolge der Silben folgt dem einer linearen Grammatik, i.S. von $(AB)^n$, wobei n auf $n=2$ beschränkt blieb. Somit ergab sich eine Abfolge der grammatikalischen Zeichenkette als $(A1B1A2B2)$, wobei A und B hier stellvertretend für nicht-identische Konsonanten und die Zahlen 1 und 2 jeweils für unterschiedliche Vokale stehen. Ein sich hieraus ergebender Satz wäre beispielsweise „mi pi mu pu“. In der deutschen Grammatik entsprechen lineare Grammatiken einfachen Aussagesätzen mit einer einfachen Verknüpfung, z.B. „Maria sieht ein Kleid. Paula sieht einen Rock.“

Phrase Structure Grammar (PSG): Hierbei folgt die Silbenabfolge einer eingebetteten Grammatik, gemäß dem Schema $(A_n B_n)$ mit ebenfalls $n = 2$. Hieraus ergibt sich eine Silbenfolge von $(A_1 A_2 B_2 B_1)$, wobei sich aufgrund der unterschiedlichen Indices eine hierarchische Abhängigkeit zwischen den Silben ergibt. Somit ergibt sich durch die eingebetteten Vokale eine höhere grammatikalische Komplexität als in der finite state grammar. Ein solcher Satz wäre beispielsweise „ba be ne na“, in der deutschen Grammatik entsprechend einem Relativsatz, wie beispielsweise „Das Kleid, das Maria sieht, ist blau.“ Hierbei ist die hierarchische Abhängigkeit der Silben bzw. Satzteile zueinander die Grundlage für die höhere Komplexität der Grammatik.

Working Memory (WM): Um eine Einschätzung des Einflusses des verbalen Arbeitsgedächtnisses auf die erbrachte Leistung zu erhalten, wurde zwischen der Durchführung der beiden Grammatikaufgaben eine Working Memory Aufgabe eingefügt. Diese bestand aus maximal drei Runden mit je 21 Silbengruppen, wobei das Ziel die Wiedererkennung dreier zuvor präsentierter Silben sein sollte. Die Probanden wurden aufgefordert, sich drei vorgegebene Silben („ko“, „mu“, „ti“) zu merken und bei Auftreten von mindestens zwei der drei Silben in einer Silbengruppe diese per Mausclick als richtig zu identifizieren. Für die Richtigkeit der Silbengruppe spielte die Abfolge der gezeigten Silben keine Rolle.

2.2.1 Ablauf des Experiments

Die Präsentation des grammatikalischen Paradigmas erfolgte wie bereits oben erwähnt mittels der Presentation Software (Version 18.3, Neurobehavioral Systems Inc., Albany, California: www.neurobs.com). Die Darstellung der Silben erfolgte einzeln nacheinander für 500 ms jeweils in weißer Farbe auf schwarzem Hintergrund, wobei die einzelnen Silbengruppen jeweils durch die Anzeige von „#####“ (für 300 ms) abgetrennt wurden. Vor jeder Aufgabe folgte eine kurze schriftliche Einführung in die Aufgabenstellung. Jede der vollständig ausgeführten grammatikalischen Aufgaben bestand aus vier Runden für FSG und PSG, welche jeweils am Stück ohne Unterbrechung durchgeführt wurden. Bei vollständiger Durchführung des Experiments wurde zwischen PSG und FSG eine WM Aufgabe mit wiederum drei Runden absolviert. In den meisten Fällen wurde mit der linearen Grammatik begonnen und im Anschluss an die Memory Aufgabe mit der eingebetteten Grammatik fortgefahren. In den ersten drei Runden der Grammatikaufgaben wurde der Lernerfolg der grammatikalischen Regel auf ein begrenztes „Vokabular“ überprüft, in der vierten

Runde die Generalisierung der erlernten Regel auf ein neues „Vokabular“. Nicht jeder Proband durchlief das Experiment vollständig, eine Auswahl über die durchzuführenden Runden wurde lediglich durch die zur Verfügbarkeit stehende Zeit und die individuelle Motivation und Konzentrationsfähigkeit des Patienten begrenzt. Die Anforderung an die Probanden war, nach jeder angezeigten Silbengruppe innerhalb einer definierten Zeit per Mausklick zu entscheiden, ob diese für richtig oder falsch gehalten wurde (rechte Maustaste=richtig, linke Maustaste = falsch). Die Probanden wurden gebeten zur Beantwortung der Aufgaben die rechte Hand zu verwenden, grundsätzlich wurde es ihnen aber, beispielsweise aufgrund von motorischen Einschränkungen im Rahmen ihres Schlaganfalls, freigestellt die andere Hand zu nutzen. Die Entscheidung über die Richtigkeit eines Satzes sollte nicht auf reinem Wissen basieren, sondern „aus dem Bauch heraus“ getroffen werden. Hierbei sollten die Probanden so früh wie möglich, also sobald sie den grammatikalischen Status der Silbengruppe erkannten, eine Antwort abgeben. Theoretisch war dies, je nach Grammatik, bereits nach der zweiten oder der dritten Silbe (= „kritische Silbe“) möglich. Gewertet wurden alle Antworten, welche nach Auftreten der kritischen Silbe, aber noch vor Beginn der nächsten Runde abgegeben wurden. Eine Runde bestand aus jeweils 21 Silbengruppen mit je 10 oder 11 korrekten Silbengruppen. Nach der ersten sowie der zweiten Runde wurde eine kurze Trainingssession mit jeweils 12 (6 richtigen und 6 falschen in der linearen sowie 7 richtige und 5 falsche in der Embedded Grammatik) Silbengruppen durchgeführt, wobei diese sich von denen der Silbengruppen der Testphase unterschieden und sich nicht wiederholten. Hierdurch soll verhindert werden, dass Probanden rein durch Erkennung der Silbengruppen, aber ohne tiefergehendes Verständnis, sich für oder gegen eine Silbengruppe entschieden (s. (Vries et al. 2008). Nach jeder Silbengruppe wurde angegeben, ob diese korrekt (richtig) oder nicht regelkonform (falsch) war. Während dieser Trainingsphase sollte keine Antwort per Klick gegeben werden.

2.3 Statistische Auswertung

2.3.1 Verhaltensdaten: Probleme und Anpassungen

Die Auswertung der Verhaltensdaten erfolgte mittels Microsoft Excel sowie der Software IBM SPSS (Version 27). Im Zuge der Berechnung von logistischen

Regressionsmodellen anhand derselben Datengrundlage für eine weitere wissenschaftliche Arbeit wurde die Software „R“ verwendet. Da diese Berechnungen allerdings nicht integraler Bestandteil dieser Arbeit sind, verweise ich hier mit freundlicher Genehmigung auf die Modelle von S. Kirsch im Anhang.

Eine erste Orientierung über die erhobenen Daten gibt uns die Auswertung der Anzahl der abgegebenen Antworten sowie der Performanz. Als Performanz wird klassischerweise der relative Anteil der korrekt klassifizierten Silbengruppen (sprich richtig korrekte Antworten „R“ und falsch korrekte Antworten „F“) in Bezug auf die Gesamtanzahl an Silbengruppen pro Session (=21) bezeichnet (in anderen wissenschaftlichen Bereichen auch bekannt als „overall accuracy“).

Nachdem sich jedoch Besonderheiten (1) in der Benutzung der Tasten aufgrund körperlicher oder kognitiver Einschränkungen ergaben sowie (2) Besonderheiten im Antwortverhalten der Probanden zeigten (Abgabe von keinerlei Antwort oder zu vieler Antworten), musste hier eine Anpassung des Performanz-Begriffes durchgeführt werden.

- (1) Bei der Verwendung von nur einer Taste wurden die Probanden angewiesen, nur eine Antwort abzugeben, wenn sie meinten, dass die präsentierte Silbengruppe korrekt sei. Für diese Probanden ergäbe sich unter dem klassischen Performanzbegriff dennoch eine deutlich schlechtere Performanz als eigentlich gerechtfertigt wäre. Hätten diese Probanden beispielsweise alle richtig korrekten Silbengruppen herausgefiltert (je nach Grammatik und Session maximal 10 oder 11), kämen sie bei einer Gesamtanzahl an Silbengruppen von 21 nur auf eine Performanz von 47,6-52,4%, obwohl sie die für sie mögliche maximale Leistung herausgeholt hätten. Um die abgegebene Leistung dennoch vergleichbar zu halten, wurde hier für n=22 Probanden mit einseitiger Tastenbenutzung eine Anpassung durchgeführt. In diesem Fall wurde lediglich mit der Anzahl der richtig korrekten Antwort im Verhältnis zur Anzahl aller möglichen richtig korrekten Silbengruppen gerechnet („R“/ „BR“; auch bekannt als producer's accuracy. Für Probanden, welche auf jede Silbengruppe geantwortet haben, ist die overall accuracy somit gleich der producer's accuracy).

Die Performanz wird hier als Anteil der korrekt klassifizierten Silbengruppen in Relation zu allen möglichen korrekt zu klassifizierenden Silbengruppen pro Session gerechnet

(2). Die mögliche Anzahl an korrekt klassifizierbaren Silben lag bei einseitiger Tastenbenutzung (und somit nur einer Antwortabgabe für grundsätzlich richtig korrekte Silben „BR“) bei 10 bzw. 11, für eine beidseitige Tastenbenutzung jedoch (mit Antwortabgabe für grundsätzlich richtig korrekte „BR“ und richtig inkorrekte Silben „BF“) bei 21. Somit schließt diese Definition insbesondere die Möglichkeit einer einseitigen Tastenbenutzung ein.

(2) Um dem Problem der überhöhten Antwortabgabe, und einer damit einhergehenden Überschätzung ihrer eigentlichen Leistung, zu entgegen, wurde bei Überschreiten der maximal zulässigen Antwortanzahl *einseitig* drückender Probanden eine Korrektur eingeführt (3). Wenn mehr als die maximal zulässige Antwortanzahl abgegeben wurde, der Patient also beispielsweise Sehr viele Silbengruppen als grammatikalisch eingestuft hatte und somit eine hohe Annahmerate hatte, wurden die korrekten Antworten durch die Anzahl an gegebenen Antworten geteilt. Hatte der Proband weniger als die zulässige Anzahl an Antworten abgegeben, war also eher restriktiv, so wurde wie in (1) beschrieben bei einseitig drückenden Probanden verfahren (also die Anzahl korrekter Antworten durch allen möglichen korrekten Antworten geteilt). Bei den Probanden, welche beide Tasten verwendeten, wurde keine Anpassung vorgenommen.

Für die Untersuchung der Performanz bei abhängigen Stichproben wurden innerhalb der einzelnen Grammatiktests jeweils gepaarte t-Tests mit der jeweils größtmöglichen Probandenzahl durchgeführt. Für den Vergleich der beiden Grammatiken untereinander wurden jeweils nur Probanden berücksichtigt, welche beide Tests vollständig bis Runde 3 absolvierten. Zur Korrektur des multiplen Testens wurde hinsichtlich der Haupthypothesen eine Korrektur des alpha-Fehlerniveaus nach Bonferroni-Holm durchgeführt. Die restlichen nachfolgenden Berechnungen sind hier als rein explorativer Natur anzusehen und weisen daher kein korrigiertes alpha-Fehlerniveau auf. Für jeden der durchgeführten Vergleiche wurden die Voraussetzungen hinsichtlich der Normalverteilung mittels grafischer und/oder formaler Tests überprüft. Aufgrund der großen Anzahl an Testdaten mit $n=66$ für FSG und $n=51$ für PSG kann jedoch, basierend auf dem zentralen Grenzwertsatz, ab einer Anzahl von mindestens $n > 30$ eine Normalverteilung approximiert werden (Döring und Bortz 2016). Des Weiteren zeigten sich die unserer Berechnung zugrunde liegenden t-Tests

in Simulationen mit nicht normalverteilten Daten robust gegenüber dieser Verletzung einer Grundvoraussetzung (Vgl. Pagano 2013; Wilcox 2012; Salkind 2010; Bortz und Schuster 2010). Rorden und Kollegen führen zudem an, dass t-Tests bei Verletzungen der Grundvoraussetzungen grundsätzlich dazu tendieren, eher konservativ zu werden, d.h. tendenziell eher nicht signifikant anstatt falsch positive Werte auszugeben (Rorden et al. 2007). Somit ist ein Bericht falsch signifikanter Ergebnisse bei Verwendung des t-Tests trotz leichter Verletzungen der Grundvoraussetzungen unwahrscheinlich. Werte, welche deutlich von der Normalverteilung abwichen wurden dennoch mit nicht-parametrischen Tests berechnet.

Bei der Interpretation der Verhaltensdaten stellt sich nun die Frage nach dem Lernerfolg der Probanden. Da Lernen als abstrakte Fähigkeit nicht direkt gemessen werden kann, müssen mehrere Parameter gemessen werden, um diese Fähigkeit über eben jene Parameter indirekt so gut wie möglich objektiv abzubilden. Lernerfolg kann demnach an unterschiedlichen Kriterien festgemacht werden, in dieser Studie wurden hierfür insbesondere die Leistung in Session 3 als Zeitpunkt des maximalen Lernens sowie die Differenz zwischen der maximalen Leistung und der Ausgangsleistung (Delta 3-1) betrachtet.

Die Fähigkeit zur Generalisierung als weiterer Indikator für den Lernerfolg wurde ebenfalls betrachtet.

Ein Lernerfolg im engeren Sinn würde sich auf ein tiefergehendes Verständnis der Regel beziehen, das hieße, korrekte Sequenzen nicht nur zu erkennen, sondern die Regel auch ohne vorgegebene Sequenzen anwenden zu können und diese zu erweitern. In dieser Studie wurde die Einordnung der präsentierten Sequenzen, sprich das Erkennen korrekter Sequenzen und eine Abgrenzung zu Regelverletzungen, überprüft. Dennoch kann von einem tiefergehenden Verständnis der Regel ausgegangen werden, sofern es den Probanden gelang, diese auf neue Beispiele zu abstrahieren, wie es für Session 4 der Fall war (Fitch und Friederici 2012). Der Transfer der Regel auf ein neues Vokabular verweist zudem darauf, dass die Probanden hier auch tatsächlich die Regel und keine weiteren Oberflächenstrukturen zum Klassifizieren der Sequenzen verwendeten (Gomez und Schvaneveldt 1994).

Auf die Reaktionszeit als weiteren Parameter sowie die Fehlerquote wird in Abs. 3.2.2.1.1 sowie 3.2.2.1.2 eingegangen.

Hier sei zudem angemerkt, dass bei der Messung der Reaktionszeit individuelle Faktoren wie allgemeine kognitive Fähigkeiten und die Fähigkeit einer anhaltenden Aufmerksamkeit besonders ins Gewicht fallen. Diese Faktoren sind hier aufgrund der unterschiedlichen Schwere der Erkrankung der Probanden deutlich stärkeren Schwankungen unterworfen, als dies bei Gesunden der Fall wäre. Somit ist die Reaktionszeit hier immer in Verbindung mit der Performanz zu sehen und kann alleine keinen Anhaltspunkt für die Fähigkeit des Lernens bieten.

Zunächst wurden die Daten auf Einzelebene analysiert und die Performanzdaten für die einzelnen Tests visualisiert. Für die Untersuchung der acht Haupthypothesen mit der Leistung in Session 3 als primären Endpunkt erfolgte jeweils eine Korrektur nach Bonferroni-Holm. Als Haupthypothesen wurden im Folgenden angesehen:

Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Grammatiken hinsichtlich der Lerndeltas (Delta 3-1)

- der Performanz
- der Reaktionszeit
- der Fehlerrate
- Performanz Session 4-3

sowie zum Zeitpunkt des maximalen Lernens (Session 3)

- der Performanz
- der Reaktionszeit
- der Fehlerrate
- Performanz in Session 4

Für die Untersuchung auf Gruppenebene wurden gepaarte t-Tests durchgeführt sowie für den Einfluss von weiteren einzelnen Faktoren auf die Performanz gemischte lineare Modelle erstellt (s. Abs. 5).

Als Reaktionszeit ist hier die Zeitspanne in Millisekunden vom Auftreten der kritischen Silbe auf dem Bildschirm bis zur Abgabe der Antwort des Probanden definiert.

Bei der Analyse der inkorrekten Antworten wurden sowohl die Fehlerrate sowie der Fehlertyp berücksichtigt. Ein Fehlertyp (Permutuationsfehler) kam paradigmengemäß etwas häufiger vor, als der andere (Scramblingfehler). Je nach Grammatiktyp und Session lag die Anzahl an Permutuationsfehlern bei 5-7, während sie für Scramblingfehler bei 4-6 lag. Demnach erfolgte die weitere Betrachtung, analog zu der

Betrachtung der Performanz, als Prozentwert der jeweils vorgekommenen und somit möglichen Anzahl inkorrektur Stimuli.

2.3.2 Neuroanatomische Ebene

Die MRT Untersuchung erfolgte bei allen Probanden im Rahmen der klinischen Erstdiagnostik des Schlaganfalls und wurde, sofern diese an dem Universitätsklinikum Freiburg durchgeführt wurde, mit einem 3T TIM Trio (Siemens) durchgeführt. Die Aufnahmen beinhalteten neben der diffusionsgewichteten Standardsequenz (Repetitionszeit = 3.1s, Echozeit = 79ms), auch noch eine T1 sowie FLAIR Sequenz Aufnahme. Für die Identifizierung der Schlaganfall-Läsionen wurden die Dateien in ein geeignetes Format überführt (nifti) und mit der Software SPM 8 die Läsionsvolumina als ROI (region of interest) identifiziert. Die für die weitere Untersuchung der Läsionen mittels VLSM notwendigen Normalisierungen und Anpassungen an das MNI template sowie die Festlegungen der ROIs lagen hier bereits vor.

Zur Analyse der normalisierten Läsionen wurde das Softwarepaket Non-Parametric Mapping (NPM; Version 02.05.2016) sowie zur Darstellung die Software MRICron (Chris Rorden) verwendet. Um den Einfluss der geschädigten Hirnareale auf die Leistung zu untersuchen wurde hierfür Voxel-based Symptom Mapping (VLSM), zuerst entwickelt durch (Bates et al. 2003), verwendet. Hier kann sowohl zwischen der Analyse kontinuierlicher (mittels t-Test oder Brunner-Munzel Test) als auch binärer Daten (mittels Lieberman Test) gewählt werden. Ein Datenpunkt, Voxel genannt, stellt eine definierte Volumetrische Einheit in einem Datenpunkt (= „Volume pixel“) dar. Für kontinuierliche Verhaltensdaten wird für jeden einzelnen Datenpunkt eine Unterteilung der Probanden durchgeführt in Probanden mit und ohne Läsion in eben diesem Punkt. Diese zwei Gruppen werden klassischerweise mittels eines t-Tests miteinander verglichen, sodass man im Endeffekt für jedes einzelne Voxel eine t-Statistik erhält. Um hier von der Annahme der Normalverteilung der Daten unabhängig zu sein, wurde anstatt der t-Tests jeweils ein Brunner-Munzel Test als nicht-parametrische Alternative durchgeführt (Brunner und Munzel 2000). Der Brunner-Munzel stellt hier mit der Möglichkeit zur Analyse kontinuierlicher Daten eine feinstufigere Analyse dar, welches sich insbesondere für die Analyse der Performanzwerte anbietet. Der Lieberman Test wurde hier für die Untersuchung

kategorialer Variablen (wie Aphasie ja/nein, Tastenverwendung einseitig/beidseitig) sowie bei einem Vergleich von Performanzgruppen mit klarer Trennung ($< \text{Chance} / > \text{Chance}$, s. Abbildung 16) verwendet.

Um eine Verfälschung der Ergebnisse durch multiples Testen, und somit eine Akkumulierung eines Fehlers I. Art, zu vermeiden, wurden signifikante Ergebnisse bei einer Grenze von $p > 0.05$ und einer False Discovery Rate (FDR) correction von 5% berichtet.

Für die Festlegung und Beschriftung der einzelnen kortikalen Areale sowie der weißen Fasertrakte kamen die bereits in mricron implementierten Templates (aal.nii, JHU-WhiteMatter-labels-1mm.nii sowie natbrainlab.nii) zum Einsatz.

2.3.3 Charakterisierung der Untersuchungsgruppen

Bevor nun näher auf die Ergebnisse der Verhaltensdaten eingegangen werden soll, möchte ich an dieser Stelle die gemessenen klinischen Parameter und die overlaps der Probanden für ein besseres Verständnis der Zusammensetzung und der Charakterisierung der einzelnen (Sub)gruppen dienen.

2.3.3.1 Grundgesamtheit

In Tabelle 2 ist zunächst ein Überblick über die **Gesamtheit** der getesteten Probanden dargestellt. Das mittlere Patientenalter liegt hier, aufgrund des höheren durchschnittlichen Erkrankungsalters, mit 63.7 Jahren höher, als es für die meisten AGL Studien mit gesunden Probanden der Fall ist. Der mRS zeigt hier mit 1.8 Punktwerten in der akuten Phase sowie mit 1.17 Punktwerten im follow-up durchschnittlich nur eine geringe bis keine Behinderung der Patienten im Alltag. Der Corsi-Test liegt mit seinen Werten in der akuten Phase knapp unterhalb und in der chronischen Phase knapp innerhalb des unteren Normbereichs für das visuospatiale Arbeitsgedächtnis. Der Token Test zum Zeitpunkt des Schlaganfalls (T0) spricht hier ebenfalls für eine durchschnittliche leichte aphasische Sprachstörung, während für den Zeitpunkt des follow-ups für die meisten Probanden, passend zur abnehmenden Anzahl der Aphasie-Patienten, nur noch eine minimale bis keine Sprachstörung vorliegt. Das durchschnittliche Läsionsvolumen ist eher gering, der mRS und NIHSS verweisen auf das mittlere neurologische Defizit in T0. In Mittel verbessern sich die neurologischen (NIHSS) und neuropsychologischen Defizite (Corsi, Token Test und AAT), und stufen diese somit als nicht alltagsrelevant für die Patienten ein.

Parameter	Alle Probanden MW (Min, Max, Stabw.)
Geschlecht M W	n = 49 n = 19
Alter	63.7 (29.2, 85.6, 13.4)
Bildungsalter	13.38 (8, 23, 3.5)
Läsionsvolumen in ml	25.5 (0.5, 217.2, 35.9)
NIHSS T0 Aufnahme Entlassung	6.4 (0, 22, 5.5) n=60, 6 NA 2.5 (0, 15, 3.0) n=60, 6 NA
mRS T0 T1	1.8 (0, 5, 1.4) n=64, 4 NA 1.17 (0, 4, 1.2) n=35, 33 NA
Corsi vor/rückw. T0 T1	4.77 (3, 7, 0.97) / 4.97 (3, 7, 1.11) n=62/61, 6/7 NA 5.3 (4, 7, 0.86) / 4.98 (2, 7, 1.21) n=60/58, 8/10 NA
Token Test Prozentrang T0 T1	85.2 (2, 99, 27.24) n=65, 3 NA 92.7 (30, 99, 16.96) n=46, 22 NA
Aphasie T0 T1	<i>Aphasiker = 46, Nicht-Aphasiker = 22</i> <i>Aphasiker = 18, Nicht-Aphasiker = 50</i>

Tabelle 2: demografische Daten

Fehlende Werte (NA) des Token Tests in der chronischen Phase beruhen u.a. darauf, dass bei unauffälligem AAT in T0 kein weiterer Test in T1 durchgeführt wurde.

Für eine Übersicht aller Läsionen der eingeschlossenen Probanden für die jeweilige Grammatik wurde zunächst ein overlap erstellt. Die Maxima der Läsionen zeigten sich hier beide Male im Bereich der Capsula externa, dem Putamen und der Insularegion (s. Abbildung 6). Demnach konnte wie erwartet von einer hohen Dichte der Läsionen im Bereich des Medialstromgebiets ausgegangen werden. Die Ausdehnung der Schlaganfall-Läsionen unterschieden sich für die beiden Grammatiken nicht, lediglich die Anzahl der sich überlappenden Läsionen war aufgrund der geringeren Gruppengröße in PSG kleiner.

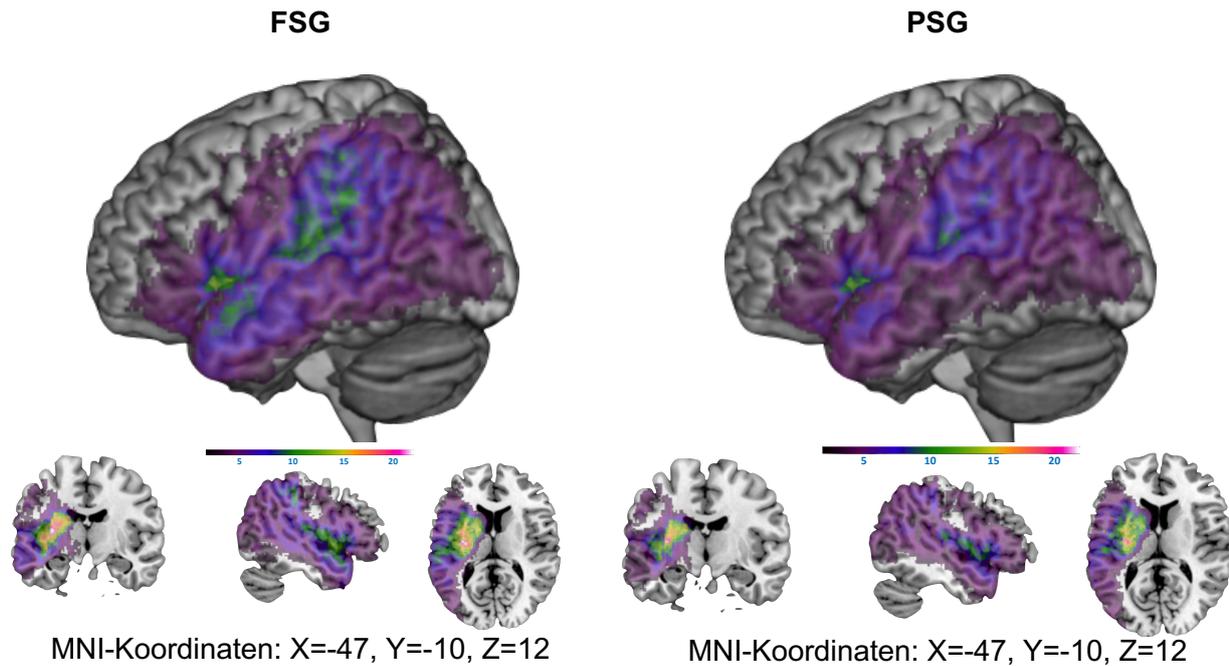


Abbildung 6: Overlap aller Probanden für FSG (links) und PSG (rechts)

Farbbereich: 1 (lila) bis 22 (weiß). Da die Mehrheit der Probanden hier beide Grammatiken durchliefen, ähneln sich die hier gezeigten Overlaps stark.

2.3.3.2 Probanden FSG und PSG

Da nicht alle Probanden beide Grammatiken vollständig absolvierten ergeben sich hier teilweise unterschiedliche Gruppen mit einer dennoch sehr großen Überschneidung. 49 von insgesamt 68 Probanden absolvierten beide Grammatiken vollständig. Um auszuschließen, dass sich beide Gruppen hinsichtlich ihrer klinischen Parameter stark unterschieden, erfolgt hier ein tabellarischer Vergleich der Werte. Der statistische Vergleich jener Probanden, welche nur eine der beiden Grammatiken absolvierten, zeigt zu keinem Zeitpunkt (T0, T1) für keinen der Parameter signifikante Unterschiede (Tabelle 4).

Parameter	Probanden mit FSG bis mind. Runde 3 MW (Min, Max, Stabw.)	Probanden mit PSG bis mind. Runde 3 MW (Min, Max, Stabw.)
Geschlecht		
M	n = 48	n = 37
W	n = 18	n = 14
Alter	63.7 (29.2, 85.6, 13.4)	64.4 (32.4, 85.62, 12.8)
Bildungsalter	13.4 (8, 23, 3.4)	13.3 (8, 23, 3.5)
Läsionsvolumen in ml	25.8 (0.52, 217.2, 36.12)	26.6 (0.52, 217.2, 39.0)

Parameter	Probanden mit FSG bis mind. Runde 3 MW (Min, Max, Stabw.)	Probanden mit PSG bis mind. Runde 3 MW (Min, Max, Stabw.)
mRS		
T0	1.84 (0, 5, 1.4) n=62, 4 NA	1.96 (0, 5, 1.4) n= 49, 3 NA
T1	1.24 (0, 4, 1.2) n=33, 33 NA	1.4 (0, 4, 1.3) n= 22, 29 NA
Corsi vor/rückw.		
T0	4.8 (3, 7, 0.97) / 4.97 (3, 7, 1.1) n=60/59, 6/7 NA	4.72 (3, 6, 0.95) / 5.0 (3, 7, 1.1) n= 47/46, 4/5 NA
T1	5.34 (4, 7, 0.86) / 4.98 (2, 7, 1.2) n=58/56, 8/10 NA	5.31 (4, 7, 0.84) / 4.9 (2, 7, 1.2) n= 46/44, 5/7 NA
Token Test PR*		
T0	84.78 (2, 99, 27.3) n=63, 3 NA	86.0 (2, 99, 24.1) n= 49, 2 NA
T1	92.4 (30, 99, 17.1) n=44, 22 NA	93.2 (30, 99, 15.96) n= 36, 15 NA
Aphasie		
T0	<i>Aphasie = 45, keine Aphasie = 21</i>	<i>Aphasie = 35, keine Aphasie = 16</i>
T1	<i>Aphasie = 18, keine Aphasie = 45</i>	<i>Aphasie = 13, keine Aphasie = 38</i>

Tabelle 3: klinische Parameter aller Probanden für FSG und PSG

*PR= Prozentrang; NA= keine Angabe

Gruppe	Alter	Bildungs- alter	Läsions- volumen in ml	NIHSS	mRS		Corsi vorw. Corsi rückw.		Token Test	
					T0	T0 T1	T0	T1	T0	T1
Probanden nur FSG (n=17)	61.5 (15.0)	13.7 (3.3)	22.7 (24.9)	1.6 (1.93)	1.4 (1.3)	4.9 (1.03)	5.4 (0.94)	82.0 (35.7)		
					0.92 (0.86)	4.87 (1.1)	5.3 (1.2)	90.2 (20.9)		
Probanden nur PSG (n=2)	63.8 (12.5)	11.3 (2.5)	15.2 (1.4)	0.5 (0.71)	1.0 (0.0)	4.5 (0.71)	5.5 (0.71)	99.0 (0.0)		
					0.0 (0.0)	5.0 (0.0)	5.5 (0.71)	99.0 (0.0)		
Mann- Whitney-U Test	U=16 Z=-0.13 p=0.95	U= 10.0 Z=-0.94 p=0.42	U=17.0 Z=0.00 p=1.0	U=9.5 Z=-0.95 p=0.39	U=14.0 Z=-0.3 p=0.84	U=11.0 Z=-0.63 p=0.62	U=13.0 Z=-0.17 p=0.93	U=10.0 Z=-1.01 p=0.47		
					U=5.0 Z=-1.46 p=0.23	U=14.0 Z=-0.16 p=0.94	U=12.0 Z=-0.18 p=0.93	U=6.0 Z=-1.03 p=0.49		

Tabelle 4: statistischer Vergleich klinischer Parameter Probanden FSG zu PSG

2.3.3.3 Aphasiestatus

Für die Untersuchung der Probanden hinsichtlich ihres **Aphasiestatus** wurde eine weitere Einteilung in die Gruppen der Immer-Aphasiker (Aphasie in T0 und T1), die der Nie-Aphasiker (weder in T1 noch in T0) und in einer Recovery-Gruppe (Aphasie in T0, aber nicht in T1) unternommen.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Verteilung der erhobenen klinischen Parameter zwischen den Gruppen. Die Läsionsvolumina stellten sich hier für alle drei Gruppen erwartungsgemäß signifikant unterschiedlich dar (Tabelle 6), wobei die Gruppe der Nie-Aphasiker die kleinsten und die Gruppe der Immer-Aphasiker die größten Läsionen aufwies. Diese Abstufung des Schweregrades spiegelt sich auch an den Werten des NIHSS für den Entlasszeitpunkt wider. Der Schweregrad des neurologischen Defizits (mRS, NIHSS) zeigte erwartungsgemäß für den Zeitpunkt T0 signifikante Unterschiede für Nie-Aphasiker und Recovery Patienten im Vergleich zu Immer-Aphasikern. Für den Untersuchungszeitpunkt jedoch ergaben sich keine Unterschiede mehr, der mRS lässt hier für alle drei Gruppen nur auf eine geringe Beeinträchtigung der Patienten im Alltag schließen.

Hinsichtlich der sprachlichen Defizite (Token Test, AAT) konnten in T0 für alle drei Gruppen signifikante Unterschiede festgestellt werden (Tabelle 6), in T1 zeigten sich jedoch nur noch für „Immer-Aphasiker“ beeinträchtigt, während sich die übrigen Probanden sich nahezu unauffällig präsentierten.

Das Bildungsalter (educational age) sowie das Alter waren für alle Gruppen nicht signifikant unterschiedlich. Ebenso konnte für den Corsi Test zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen gezeigt werden.

Parameter	„Nie-Aphasiker“ MW (Min, Max, Stabw.)	Probanden mit Recovery MW (Min, Max, Stabw.)	„Immer-Aphasiker“ MW (Min, Max, Stabw.)
Geschlecht			
M	n = 17	n = 18	n = 14
W	n = 5	n = 10	n = 4
Alter	61.4 (29.2, 85.6, 14.2)	65.9 (32.4, 82.8, 13.3)	63.1 (37.3, 81.7, 12.8)
Bildungsalter	13.75 (11, 21, 2.8)	13.4 (9, 23, 4.0)	12.9 (8, 19, 3.3)
Läsionsvolumen in ml	7.3 (0.52, 34.5, 9.4)	24.6 (0.96, 119.9, 27.7)	49.0 (1.63, 217.2, 52.3)

Parameter	„Nie-Aphasiker“ MW (Min, Max, Stabw.)	Probanden mit Recovery MW (Min, Max, Stabw.)	„Immer-Aphasiker“ MW (Min, Max, Stabw.)
mRS			
T0	1.5 (0, 5, 1.2) n=20, 2 NA	1.5 (0, 4, 1.3) n= 26, 2 NA	2.7 (0, 5, 1.3) n= 18, 0 NA
T1	1.22 (0, 4, 1.5) n=9, 13 NA	0.9 (0, 4, 1.1) n = 15, 13 NA	1.5 (0, 3, 0.9) n = 11, 7 NA
NIHSS			
T0			
Aufn.	4.5 (1, 13, 3.6) n= 20, 2 NA	7.3 (0, 20, 6.3) n=26, 2 NA	7.31 (1, 22, 5.7) n=16, 2 NA
Entl.	2.15 (0, 12, 2.8) n= 20, 2 NA	1.9 (0, 8, 2.5) n=26, 2 NA	3.81 (0, 15, 3.76) n= 16, 2 NA
Corsi vorwärts			
T0	4.95 (4, 6, 0.74) n=21, 1 NA	4.69 (3, 6, 0.93) n= 26, 2 NA	4.6 (3, 7, 1.3) n= 15, 3 NA
T1	5.5 (4, 7, 0.89) n=20, 2 NA	5.46 (4, 7, 0.9) n= 26, 2 NA	4.93 (4, 6, 0.62) n= 14, 4 NA
Corsi rückwärts			
T0	5.0 (3, 7, 1.05) n=21, 1 NA	4.96 (3, 7, 1.18) n= 26, 2 NA	4.93 (3, 7, 1.14) n= 14, 4 NA
T1	5.0 (3, 7, 1.08) n=19, 3 NA	5.16 (2, 7, 1.25) n= 25, 3 NA	4.71 (3, 7, 1.33) n= 14, 4 NA
Token Test PR*			
T0	98.9 (97, 99, 0.43) n=22, 0 NA	89.4 (2, 99, 21.9) n= 27, 1 NA	59.4 (2, 99, 36.3) n= 16, 2 NA
T1	98.8 (97, 99, 0.58) n=12, 10 NA	98.3 (94, 99, 1.58) n= 16, 12 NA	83.6 (30, 99, 24.8) n= 18, 0 NA
AAT Globalwerte			
T0	541.75 (512, 559, 20.5) n= 4, 18 NA	468.75 (78, 557, 123.9) n=16, 12 NA	294.8 (11, 542, 180.1) n= 16, 2 NA
T1	545.2 (523, 558, 14.1) n=6, 16 NA	547.8 (543, 553, 3.37) n= 6, 22 NA	449.5 (201, 555, 99.7) n= 14, 4 NA

Tabelle 5: klinische Parameter von "Nie-Aphasikern", Recovery-Probanden und "Immer-Aphasikern"

* PR= Prozentrang; NA= keine Angabe

Rote Werte stellen besonders schlechte Werte dar, Werte in grauer Schrift die jeweilige Anzahl Probanden, für die der jeweilige Test durchgeführt wurde. Hinsichtlich des AATs ist hier zu beachten, dass im Fall eines akut unauffälligen AATs in T0, kein weiteres in T1 durchgeführt wurde.

Mann-Whitney-U Test/ two sample t-Test			
Gruppe	„Nie-Aphasiker“/ Recovery	Recovery/ „Immer-Aphasiker“	„Nie-Aphasiker“ / „Immer-Aphasiker“
Alter	U=240.0 z=-1.33 p=0.184	U=212.9 z=-0.9 p=0.368	U=191.0 z=-0.19 p=0.85
Bildungs- alter	U=227.0 z=-1.59 p=0.111	U=247.0 z=-0.11 p=0.91	U=179.5 z=-0.52 p=0.61
Läsions- volumen	ttT(48)=-3.4 p= 0.001	ttT(44)=2.0 p= 0.045	ttT(38)=-5.3 p= 0.000006

Mann-Whitney-U Test/ two sample t-Test				
Gruppe		„Nie-Aphasiker“/ Recovery	Recovery/ „Immer-Aphasiker“	„Nie-Aphasiker“ / „Immer-Aphasiker“
NIHSS	T0	U=223.5 z=-0.84 p=0.4	U=112.5 z=-2.52 p= 0.012	U=97.0 z=-2.04 p= 0.041
mRS	T0	U=249.5 z=-0.24 p=0.81	U=120.5 z=-2.77 p= 0.006	U=89.0 z=-2.73 p= 0.007
	T1	U= 60.5 z=-0.45 p=0.66	U=47.0 z=-1.93 p=0.053	U=37.5 z=-0.94 p=0.345
Corsi vorw. rückw.	T0	U=234.5 z=-0.88 p=0.38 U=270.0 z=-0.07 p=0.95	U=184.0 z=-0.31 p=0.76 U=177.5 z=-0.13 p=0.89	U=129.5 z=-0.94 p=0.35 U=146.0 z=-0.04 p=0.97
	T1	U=253.0 z=-0.27 p=0.87 U=202.0 z=-0.59 p=0.56	U=122.5 z=-1.84 p=0.066 U=139.0 z=-1.08 p=0.278	U=89.5 z=-1.93 p=0.053 U=109.0 z=-0.67 p=0.503
Token Test	T0	U=174.0 z=-3.2 p= 0.001	U=85.0 z=-3.4 p= 0.001	U=23.5 z=-5.11 p= 3.2*e⁻⁷
	T1	U=84.5 z=-0.7 p=0.49	U=78.0 z=-2.8 p= 0.005	U=43.5 z=-2.8 p= 0.005

Tabelle 6: statistischer Vergleich Aphasiestatus
Fett gedruckte Werte stellen signifikante p-Werte dar.

Für eine bessere Übersicht über die Ausdehnung der Läsionen und dem jeweiligen Aphasiestatus zu den Zeitpunkten T0 und T1 wurden hier ebenfalls overlaps erstellt. Das overlap in Abbildung 7 a) links zeigt die Ausdehnung der Läsionen aller Aphasiker aus T0 sowie aller übrigen Aphasiker in T1. Dieser Vergleich zeigt hauptsächlich eine Erholung von Probanden mit Läsionen in den Randgebieten. Die weitere Einteilung erfolgte hier in die Gruppen der Immer-Aphasiker (T0 und T1), die der Nie-Aphasiker (weder in T1 noch in T0) und in einer Recovery-Gruppe (Aphasie in T0, aber nicht in T1). Die größte Ausdehnung hatte erwartungsgemäß die Gruppe der Immer-Aphasiker, die kleinste die der Nie-Aphasiker. Die Läsionsmaxima lagen hierbei für die Immer-Aphasiker im Bereich der posterioren Insula/Capsula externa und Putamen, für die der Recovery Gruppe etwas weiter superior und rostral im Bereich der Capsula externa und des anterioren Putamens. Beide Gruppen wiesen eine Ausdehnung der Läsion bis in den IFG auf, die Gruppe der Nie-Aphasiker hingegen nicht.

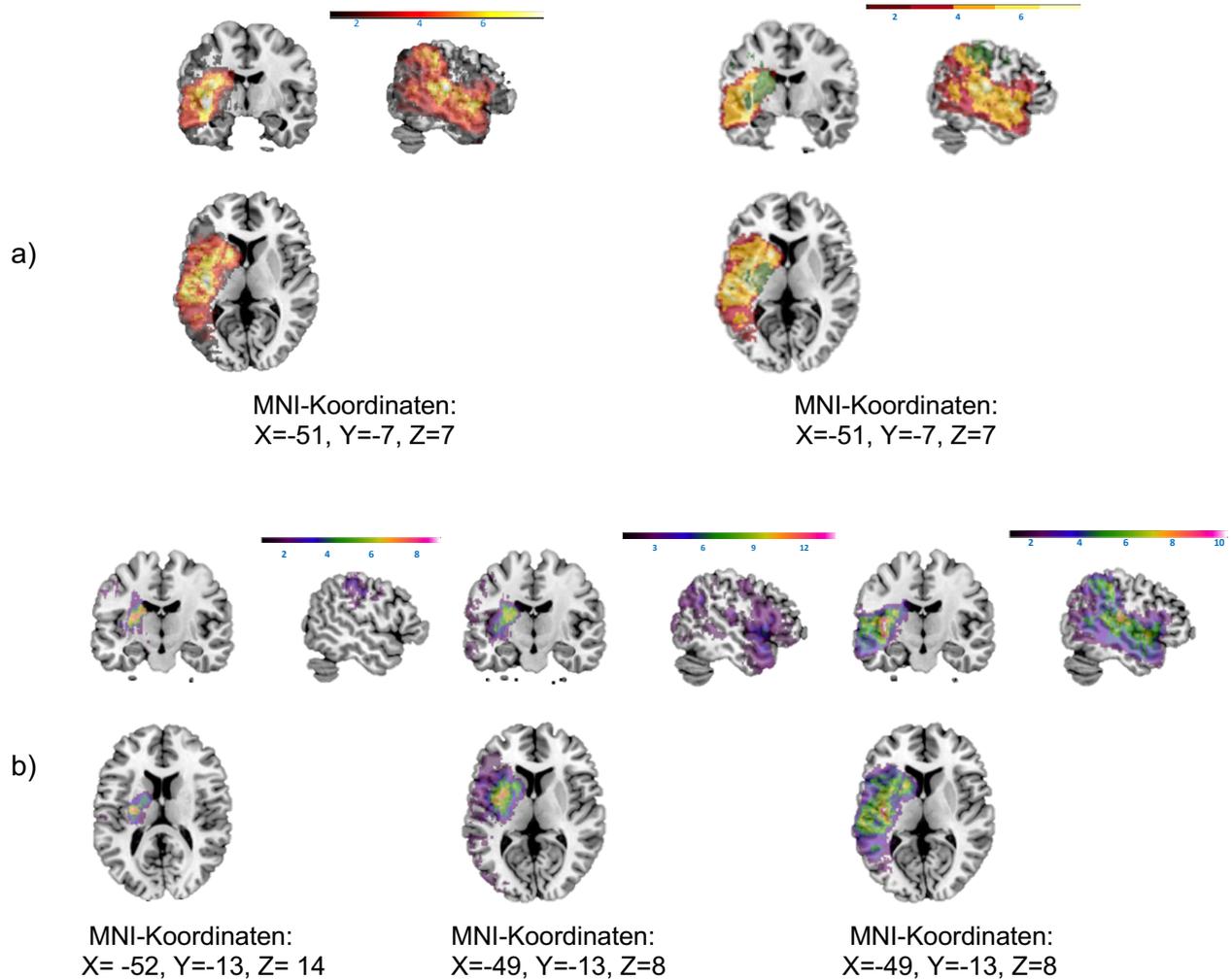


Abbildung 7: Overlaps Aphasiestatus

- a) Overlap aller Aphasiker in T0 (N=46 in grau) und in T1 (N=18 in rotstufen); rechts Vgl. der overlaps der Immer-Aphasiker (N=18) zu Nie-Aphasiker (N=22)
- b) Links overlap Nie-Aphasiker (N=22), Mitte overlap der Recovery-Probanden (N=28), rechts overlap Immer-Aphasiker (N=18)

3. Ergebnisse

Für die Präsentation der Ergebnisse möchte ich mich im Folgenden an den unter 1.5 genannten Zielen und Fragestellungen orientieren.

3.1 Perfekte Performanz

- **War es einzelnen Probanden möglich, eine neue syntaktische Regel, welche den Prinzipien der UG nach Chomsky entspricht, perfekt zu erlernen?**

Das Erreichen einer **100-prozentigen Antwortgenauigkeit** in Runde 3 oder/und Runde 4 gelang hier für n = 6 Probanden. Diese erzielten somit die maximal mögliche

Leistung in diesem Experiment, obwohl es sich hierbei um Probanden mit einer linkshemisphärischen Schädigung handelte. Besonders erwähnenswert ist hierbei, dass Probanden, welche eine perfekte Leistung in der einen Grammatik erzielten, für die jeweils andere Grammatik eine ebenfalls nahezu perfekte Leistung erreichen konnten.

In ihrer Ausgangsleistung in Session 1 (S1) waren diese Probanden weit unterhalb des Zufallsniveaus (s. Tabelle 7: Performanz perfekte Performer). Wir konnten keine signifikanten Differenzen im Ausgangsniveau für **FSG** zwischen den perfekten Lernern und der restlichen Probanden feststellen. Für **PSG** zeigte der Vergleich mit den *mittleren* Lernern sogar eine signifikant schlechtere Leistung in Session 1 für die perfekten Performer. Die Gruppe der perfekten Performer zeigten für PSG aber teilweise ein besonderes Antwortverhalten mit der Abgabe keiner oder nur sehr wenigen Antworten in Runde 1.

Für beide Grammatiken konnte für die Gruppe der perfekten Performer ein signifikanter Anstieg der Performanz von Runde 1 auf Runde 3 festgestellt werden (asymptot. Wilcoxon Test FSG: $z = -2.207$, $p = 0.027$, PSG: $z = -2.207$, $p = 0.027$). Das Lerndelta lag hier durchschnittlich für FSG bei 67% (*Min.: 0.24, Max.: 1, Stabw. 0.33*) und für PSG bei 83% (*Min.: 0.62, Max.: 1, Stabw. 0.14*).

Proband	Performanz (Dezimal) FSG				Performanz (Dezimal) PSG			
	Session			Lern-delta 3-1	Session			Lern-delta 3-1
	1	3	4		1	3	4	
AG_34330832	0	1	1	1	0	0.91	-	0.91
KM_17015893	0	1	0.91	1	0.1	0.91	0.91	0.81
TN_15185716	0.5	1	1	0.5	0	1	1	1
TW_35559485	0.71	0.95	0.95	0.24	0.24	0.86	1	0.62
WP_19194590	0.5	0.91	1	0.41	0	0.91	1	0.91
WS_35703799	0.095	0.95	1	0.86	0.24	0.95	0.91	0.71
Mittelwert	0.30	0.97	0.98	0.67	0.095	0.92	0.96	0.83

Tabelle 7: Performanz perfekte Performer

Die weiteren klinischen Parameter dieser Gruppe sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet (s. Tabelle 8). Im Vergleich zu den restlichen Probanden zeigen diese ein signifikant höheres Bildungsalter (aber nicht signifikant jüngeres Alter). Der mRS sowie der NIHSS zeigen, dass die klinische Symptomatik sich nicht signifikant zwischen den Gruppen unterscheidet. Perfekte Performer wiesen eine signifikant höhere Punktzahl für den Corsi-Test zum Zeitpunkt T0 auf, nicht jedoch für den Zeitpunkt der Untersuchung (T1). Auch der Token Test unterscheidet sich nicht für die Gruppen. Eine Aphasie bestand sogar in der Gruppe der perfekten Lerner für einen Probanden (WP_19194590) für den Zeitpunkt T1.

Code Geschlecht	Alter	Bildungs- alter	Läsions- volumen in ml	Memory	NIHSS T0	mRS	Corsi vorw. Corsi rückw.		Aphasie	
							T0	T1	T0	T1
AG_34330832 M	42	13	15.9	S1 S2 S3 0.9 1.0 -	Aufn. Entl. 13 12	T0 T1 5 NA	T0 T1 5 4 5 5	T0 T1 0 0	T0 T1 0 0	
KM_17015893 F	47	16	1.5	1.0 0.9 1.0	1 1	1 NA	6 6 6 6	6 5	1 0	
TN_15185716 M	56	21	1.6	NA	1 1	1 NA	6 7 6 7	6 NA	0 0	
TW_35559485 M	66	22	5.5	1.0 0.9 1.0	10 1	1 NA	6 7 6 7	5 NA	1 0	
WP_19194590 M	65	18	4.89	0.3 0.8 -	1 1	1 1	6 7 6 7	5 6	1 1	
WS_35703799 M	58	18	1.2	0.9 0.8 0.7	2 1	2 NA	6 6 6 6	6 6	1 0	
Mittelwert	55.9	18	5.12	0.82 0.88 0.9	4.7 2.8	1.83 1	5.83 6.16	5.5 5.5	- -	

Tabelle 8: klinische Parameter perfekte Performer

Gruppe	Alter	Bildungs- alter	Läsions- volumen in ml	NIHSS	mRS	Corsi vorw. Corsi rückw.		Token Test
				T0	T0 T1	T0	T1	T0 T1
Perfekte Performer	55.9 (9.6)	18 (3.3)	5.1 (5.6)	2.8 (4.49)	1.8 (1.6)	5.8 (0.4)	5.5 (0.55)	98.2 (2.0)
					1 (-)	6.2 (1.2)	5.5 (0.6)	99 (0)
Restliche Probanden	64.4 (13.5)	12.9 (3.1)	27.4 (36.99)	2.45 (2.89)	1.8 (1.3)	4.6 (0.9)	5.3 (0.9)	83.9 (28.3)
					1.2 (1.2)	4.8 (1)	4.96 (1.2)	92.1 (17.6)
Mann- Whitney-U Test	U=107 Z=-1.7 p=0.09	U= 45.5 Z=-3.1 p=0.001	U=94 Z=-1.99 p=0.046	U=160 z=0.19 p=0.85	U=167.5 Z=-0.15 p=0.88 U=16.5 Z=-0.05 p=0.97	U=46 Z=-3.1 p=0.002 U=61.5 Z=-2.6 p=0.009	U=136, Z=-0.7 p=0.54 U=79 Z=-0.9 p=0.42	U=122 Z=-1.4 p=0.22 U=54 Z=-1.4 P=0.26

Tabelle 9: Vergleich der klinischen Parameter (perfekte Performer vs. restliche Probanden)

Im Vergleich zu den restlichen Probanden zeigten die perfekten Performer ein signifikant geringeres Läsionsvolumen.

Abbildung 8 zeigt die linkshemisphärischen Läsionen dieser Patienten mit einem Maximum im Bereich der Capsula externa, mit Ausdehnung auf die mittlere Insula, den Ncl. Caudatus und das Putamen.

Der Proband WP_19194590 wurde separat dargestellt, da er als einziger perfekter Performer eine anhaltende Aphasie aufwies (s. Abbildung 9). Das Broca-Areal, die Wernicke-Region und die Basalganglien sind nicht betroffen, aber die mittlere Insula, der Gyrus supramarginalis und der IPL sowie die weiße Substanz.

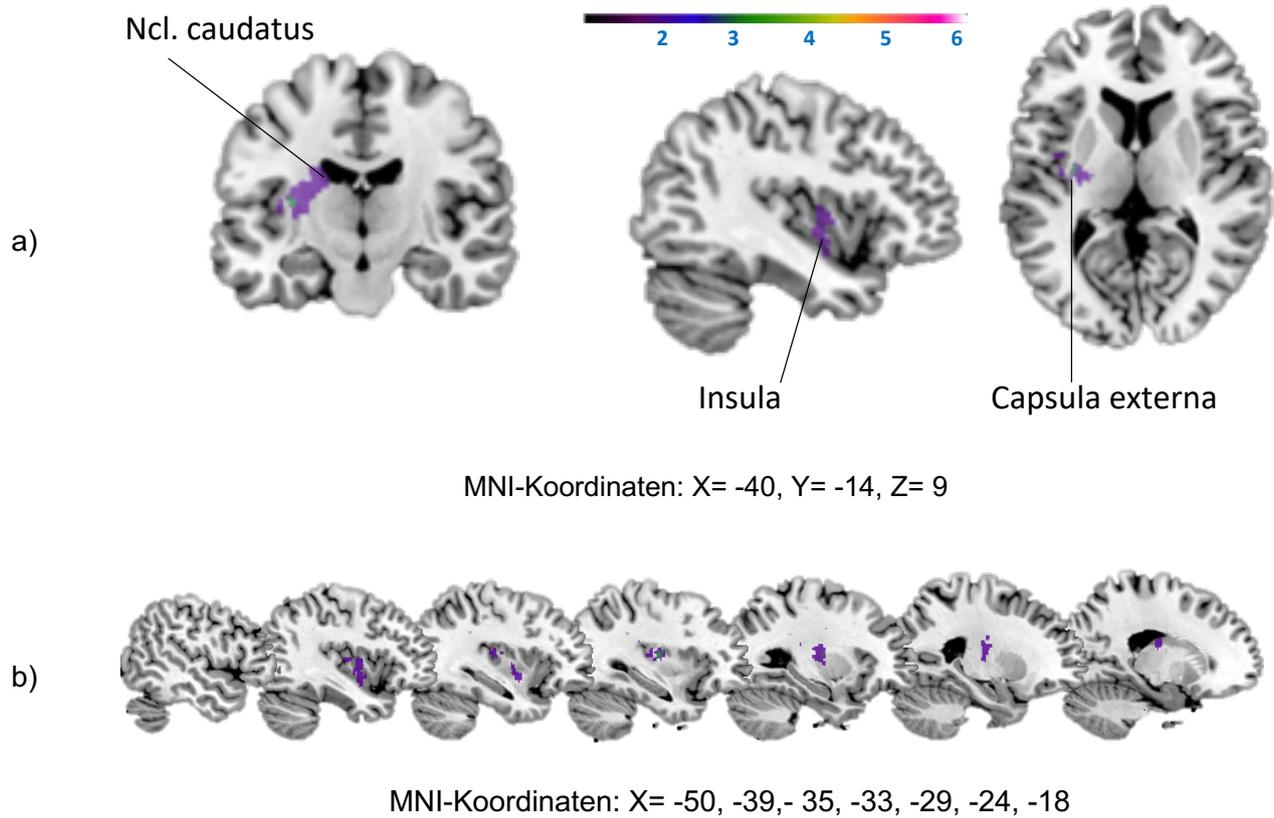


Abbildung 8: Overlap der perfekten Performer. Das Maximum der Läsion liegt im Bereich der Capsula externa und zeigt Ausdehnungen bis in die mittlere Insula. Ebenfalls beteiligt ist der Caudatus-Kopf sowie gering das Putamen. Weitere kortikale Ausdehnungen zeigen sich nicht.

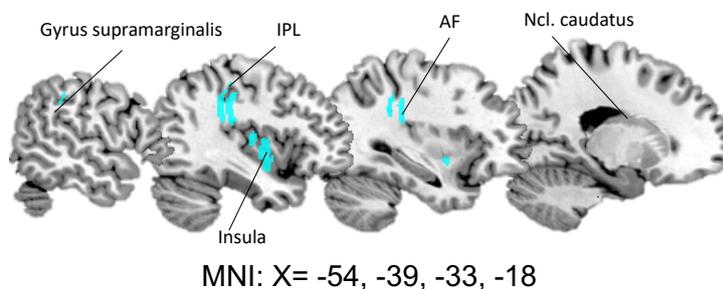


Abbildung 9: Läsion Proband WP_19194590 Der Proband war unter den perfekten Performern der einzige, mit einer anhaltenden Aphasie. Dieser zeigt Läsionen an der Grenze des Gyrus supramarginalis und des IPLs sowie ebenfalls Läsionen der mittleren Insula und der weißen Substanz.

3.2 Lernfortschritt und Leistung (Performanz) aller Probanden

Mit Hilfe des nächsten Abschnitts sollen nun folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche **Faktoren** beeinflussen in Probanden mit linkshemisphärischen Läsionen das Erlernen syntaktischer Regeln und ihrer Generalisierbarkeit?

3.2.1 Antwortverhalten der Probanden mit linkshemisphärischen Läsionen

Unerwarteter weise zeigten die Patienten während des Experiments verschiedene Verhaltensauffälligkeiten: entweder benutzten sie nur eine Taste (3.2.1.1), antworteten in S1 gar nicht (3.2.1.2) oder beinahe immer (3.2.1.3). Der folgende Absatz soll zeigen, in wie weit bestimmte Verhaltensauffälligkeiten der Probanden die Performanz beeinflussen.

3.2.1.1 Benutzung nur einer statt beider Tasten

Um eine Übersicht über die Datenstruktur zu bekommen, erfolgte zunächst eine getrennte Übersicht für Probanden, welche beide Tasten benutzten und Probanden, welche ausschließlich eine Taste zur Beantwortung verwendeten. Die hier gezeigten klinischen Parameter sollen eine nähere Charakterisierung dieser Gruppen ermöglichen (s. Tabelle 10). Probanden, welche nur eine Taste zur Beantwortung der Aufgabe verwendeten, unterschieden sich nicht signifikant von Probanden mit beidseitiger Tastenbenutzung hinsichtlich ihrer klinischen Parameter (s. Tabelle 10). Auch hinsichtlich der Endleistung in Session 3 zeigten beide Gruppen keine signifikanten Unterschiede in beiden Grammatiken (FSG ttT: $t(64)=-0.762$, $p=0.449$, PSG Mann-Whitney-U: $U=131$, $z=-1.758$, $p=0.079$).

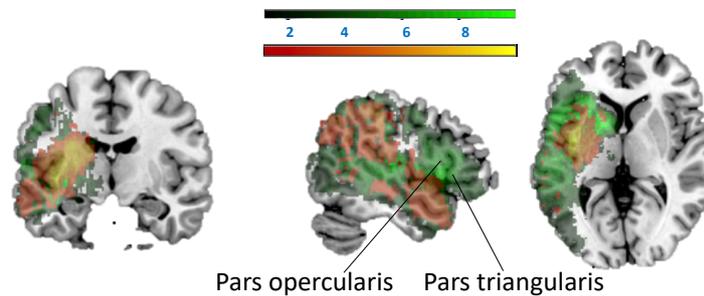
Parameter	Probanden mit einseitiger Tastennutzung MW (Min, Max, Stabw.)	Probanden mit beidseitiger Tastennutzung MW (Min, Max, Stabw.)	Mann-Whitney-U Test
Geschlecht M W	n = 15 n = 9	n= 34 n= 10	- -
Alter	61.97 (29.2, 78.3, 13.5)	64.64 (32.4, 85.62, 13.46)	-
Bildungsalter	13.5 (9, 22, 3.4)	13.32 (8, 23, 3.5)	-
Läsionsvolumen in ml	19.3 (0.99, 60.14, 18.44)	28.8 (0.52, 217.2, 42.3)	U = 511; p=0.827
mRS T0 T1	1.52 (0, 5, 1.4) n=23, 1 NA 0.94 (0, 4, 1.2) n=16, 8 NA	1.98 (0, 5, 1.3) n= 41, 3 NA 1.4 (0, 4, 1.16) n= 20, 24 NA	U = 367.5 p = 0.134 U = 116 p = 0.213

Parameter	Probanden mit einseitiger Tastennutzung MW (Min, Max, Stabw.)	Probanden mit beidseitiger Tastennutzung MW (Min, Max, Stabw.)	Mann-Whitney-U Test
Corsi vorwärts T0	4.91 (3, 7, 0.97) n= 22, 2 NA	4.68 (3, 6, 0.97) n= 40, 4 NA	-
T1	5.36 (4, 7, 0.85) n= 22, 2 NA	5.34 (4, 7, 0.88) n= 38, 6 NA	-
Corsi rückwärts T0	5.1 (3, 7, 1.2) n=22, 2 NA	4.9 (3, 7, 1.1) n= 39, 5 NA	-
T1	5.3 (4, 7, 0.97) n=21, 3 NA	4.8 (2, 7, 1.3) n= 37, 7 NA	-
Token Test PR T0	88.87 (2, 99, 26.7) n=23, 1 NA	83.2 (2, 99, 27.7) n= 42, 2 NA	U = 429; p=0.5
T1	97.67 (81, 99, 4.23) n=18, 6 NA	89.5 (30, 99, 21) n= 29, 15 NA	U = 196.5; p=0.133

Tabelle 10: klinische Parameter Tastennutzung

*PR= Prozentrang; NA= keine Angabe

Werte in grauer Schrift stellen die jeweilige Anzahl Probanden dar, für die der jeweilige Test durchgeführt wurde. Hinsichtlich des AATs ist hier zu beachten, dass im Fall eines akut unauffälligen AATs in T0, kein weiteres in T1 durchgeführt wurde.



MNI-Koordinaten: X= -49, Y= -9, Z= 4

Abbildung 10: Overlap bei einseitiger (N= 24; gelb-rot) oder beidseitiger (N=44; grün) Tastenverwendung. Probanden mit beidseitiger Tastenverwendung weisen hier eine größere Läsion auf als Probanden mit einseitiger Tastenverwendung.

Schon das Overlap (Abbildung 10) zeigt, dass die Verwendung von nur einer Taste nicht durch die Größe der Läsion bestimmt ist. Probanden mit **beidseitiger** Tastenbenutzung weisen hier ausgedehntere Läsionen auf, als Probanden mit einseitiger Tastenbenutzung. Ein Einschluss der Broca Region, inkl. der Pars opercularis und Pars triangularis, zeigt sich hier selektiv für Probanden mit **beidseitiger** Tastenbenutzung (s. Abbildung 10).

3.2.1.2 Abgabe keiner Antwort (0-Runde) in Session 1

Um das Antwortverhalten dieser Gruppen nochmals genauer zu beleuchten, erfolgte für diese Probanden eine separate Analyse der Antwortanzahl und der erreichten Performanz.

Hier zeigte sich, dass Probanden, welche keinerlei Antwort in Session 1 abgaben, unbeeinflusst davon, ob sie nun eine oder beide Tasten verwendeten, eine Zunahme der Klick-Anzahl über die folgenden Runden verzeichneten, sodass letztendlich nur ein Proband in Session 3 ebenfalls eine 0-Runde hatte (s. Abbildung 24 Anhang). Im Durchschnitt zeigen somit die Probanden mit anfänglicher 0-Runde ein positives Lerndelta mit 48.6% für FSG ($n=19$, $Min.: 0$, $Max.: 1.0$, $Stabw.: 0.30$) und 59.2% für PSG ($n=6$, $Min.: 0$, $Max.: 0.91$, $Stabw.: 0.33$).

Dieser Proband (HM_34486603) zeigte kaum eine Steigerung der abgegebenen Antworten und konnte eine maximale Antwortanzahl von 4 erreichen. Zwar wies dieser Proband einen hohen mRS-Wert bei Entlassung auf ($mRS=4$), dies schien jedoch nicht die Leistung in der Memory Aufgabe zu beeinflussen, hier erzielte er durchschnittliche Werte (Maximum 60%) und zeigte eine normale Antwortabgabe. Auch die Läsionsgröße (96,6ml) und die Corsi Werte in T1 (vorwärts 5, rückwärts 3 Punkte) geben keinen Hinweis auf die Ursache dieser schlechten Leistung. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die Schwierigkeiten der Probanden mit den Grammatik-Aufgaben nicht von den gemessenen klinischen Besonderheiten herrührten, sondern in der Aufgabe selbst lagen.

In ihren klinischen Parametern zeigten Probanden mit anfänglicher 0-Runde lediglich einen signifikant höheren mRS Score zum Testzeitpunkt (T1). Der Corsi Test rückwärts war hier nur für den Zeitpunkt T0 signifikant, jedoch nicht mehr für T1. Die restlichen Parameter unterschieden sich nicht. Das Lerndelta für Probanden mit 0-Runde zeigte für beide Grammatiken einen signifikanten Lernzuwachs (FSG: $ttT: t(64)=4.03$, $p=0.0001$, PSG: Mann-Whitney-U: $U=51.5$, $Z=-2.4$, $p=0.012$).

Code Geschlecht	Alter	Bildungs- alter	Läsions- volumen in ml	mRS	Corsi vor/rückw.		Aphasie		Token Test PR*	
					T0	T1	T0	T1	T0	T1
Beidseitige										
MSS_21315010 M	40	16	1.69	1/NA	6/5	6/-	0	0	99	NA
MK_17725025 F	54	19	100.38	4/NA	NA	6/3	1	1	24	81
JB_34490279 M	64	13	4.77	2/NA	5/4	5/6	0	0	99	NA
EG_11583415 M	61	16	14.08	1/NA	4/5	6/4	1	0	99	NA
JG_34600406 M	65	12	8.07	3/NA	3/-	4/3	1	1	53	76
RD_26618061 M	77	10	12.52	2/NA	5/5	5/4	1	0	99	99
TF_10381223 M	80	8	1.63	3/2	3/3	4/5	1	1	91	99
KM_17015893 F	47	16	1.55	1/NA	6/6	6/5	1	0	99	NA
HM_34486603 M	67	12	69.61	4/NA	4/3	5/3	1	0	91	NA
WN_15179554 M	71	16	42.70	4/3	NA	NA	1	1	NA	94
IBS_10957915 F	77	10	12.35	0/NA	4/4	NA	1	0	99	NA
LH_19028887 M	63	13	0.66	1/NA	6/6	NA	0	0	99	NA
GS_23239841 F	65	13	98.73	4/1	4/6	5/7	1	1	13	33
Mittelwert	64.3	13.4	28.36	2.3/2	4.5/4.7	5.2/4.4	-	-	80.4	80.3
Einseitige										
HS_30283589 F	78	11	6.58	1/NA	4/3	4/4	1	0	99	NA
GM_33804750 F	75	14	13.20	0/NA	3/5	5/4	1	0	99	NA
WK_11273211 M	74	11	2.39	3/NA	NA	5/4	0	0	99	NA
AG_34330832 M	42	13	15.91	5/NA	5/4	5/5	0	0	99	99
BFS_26378893 M	65	9	45.04	3/2	5/4	5/5	1	1	10	81
HR_25965841 F	60	12	1.96	1/2	4/4	6/6	0	0	99	99
Mittelwert	66	11.67	14.2	2.17/2	4.2/4	5/4.7	-	-	84.2	93

Tabelle 11: klinische Parameter von Probanden mit 0-Runde mit ein- und beidseitiger Tastenverwendung
* PR= Prozentrang; NA= keine Angabe

MW (Stabw.)								
Gruppe	Alter	Bildungs- alter	Läsions- volumen in ml	mRS	Corsi vorw. Corsi rückw.		Token Test	
				T0 T1	T0	T1	T0	T1
Probanden mit 0-Runde in Session 1	64.9 (11.99)	12.8 (2.8)	23.8 (32.3)	2.26 (1.5) 2.0 (0.7)	4.4 (1.0) 4.5 (1.1)	5.1 (0.7) 4.5 (1.2)	81.7 (32.3)	86.0 (20.7)
Restliche Probanden	63.2 (14.0)	13.6 (3.7)	26.1 (37.5)	1.6 (1.2) 1.0 (1.2)	4.9 (0.9) 5.1 (1.1)	5.4 (0.9) 5.2 (1.2)	86.6 (25.3)	94.6 (15.6)
Mann- Whitney-U Test	U= 439 Z=-0.4 p=0.72	U= 441 Z=-0.34 p=0.735	U=434 Z=-0.43 p=0.667	U=325.5 Z=-1.54 p=0.123 U=32 Z=-2.12 p=0.034	U=278 Z=-1.5 p=0.13 U=232 Z=-1.97 p=0.049	U=295 Z=-1.02 p=0.31 U=216 Z=-1.85 p=0.064	U=401 Z=-0.4 p=0.72	U=126 Z=-1.7 p=0.08

Tabelle 12: Statistischer Vergleich Probanden mit 0-Runde zu restlichen Probanden

3.2.1.3 Überhöhte Antwortabgabe

Eine Analyse der Probanden, welche zu oft im Verhältnis zur geforderten Aufgabenstellung gedrückt hatten, konnte nur für Probanden mit einseitiger Tastenbenutzung erfolgen. Probanden, welche beide Tasten verwendeten, konnten paradigmengemäß nicht öfter als 21 Mal antworten, sodass für diese keine überhöhte Antwortabgabe möglich war.

Die Abtragung der Leistung zeigt, dass einige Probanden (WP_, WK_, HK_, HR_, TN_, HJ_ und AG_) nur eine moderat erhöhte Antwortabgabe in einzelnen Sessions zeigten (s. Abbildung 25 a) im Anhang), und somit davon ausgegangen werden kann, dass diese unabsichtlich zu oft antworteten. Im Folgenden werden daher nur Probanden betrachtet, welche konstant (in > einer Session) zu oft Antworten abgegeben hatten.

Ein Vergleich der Antwortabgabe mit der erreichten Performanz zeigt, dass Probanden mit überhöhter Antwortabgabe nicht zwangsläufig eine bessere Leistung erreichten (s. Abbildung 25 im Anhang). Ein Mann-Whitney-U- Test konnte keinen signifikanten

Unterschied in Session 3 für diese Gruppe im Vergleich zu den restlichen Probanden feststellen (FSG: $U=157.5$, $z=-1.021$, $p=0.307$ PSG $U=127$, $z=-0.234$, $p=0.831$). Das Lerndelta der Probanden lag mit 20% für FSG (*Mann-Whitney U: $U=187$, $z=-0.406$, $p=0.685$*) und 8.35% für PSG (*Mann-Whitney U: $U=105$, $z=-0.878$, $p=0.380$*) beide Male nicht signifikant unterhalb des Durchschnitts der restlichen Probanden (FSG: 25.3%; Min.: -0.7, Max.: 1.0 Stabw.: 0.342, PSG: 24.0 %; Min.: -0.4286, Max.: 1.0, Stabw.: 0.358).

Probanden, welche sowohl in der linearen Grammatik als auch in der eingebetteten Grammatik zu oft gedrückt hatten, und sich somit überschritten, lagen bei 4 Probanden. Die übrigen Probanden hatten die jeweils andere Grammatik nicht absolviert oder dort ein normales Antwortverhalten gezeigt (UBF_).

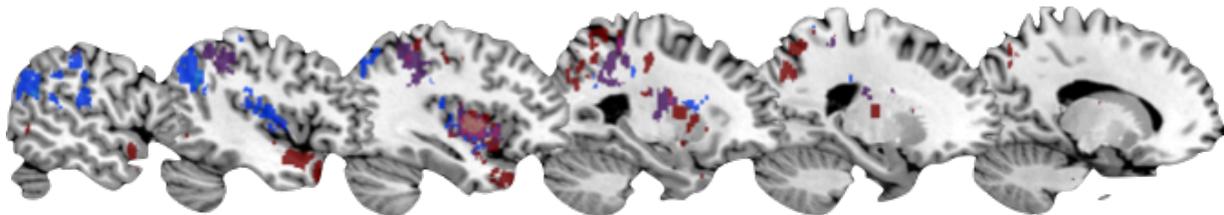
Probanden mit konstant überhöhter Antwortabgabe zeigten im Vergleich zu den restlichen Probanden keine besonderen Auffälligkeiten in ihren klinischen Parametern. Die Memory Aufgabe absolvierten nur insgesamt 3 der insgesamt $N=9$ konstanten zu oft-Drückern, Proband ER_ zeigte auch hier eine überhöhte Antwortabgabe, die anderen beiden ein normales Antwortverhalten.

Code Geschlecht	Alter	Bildungs- alter	Läsions- volumen in ml	mRS	Corsi vorw. Corsi rückw.		Aphasie		Token Test PR*	
				T0 T1	T0	T1	T0	T1	T0	T1
RD_15996927 M	43	13	56.45	0 0	6 6	7 5	1	0	91	99
AW_11065872 F	58	13	1.68	0 0	4 4	5 5	0	0	99	97
IB_30329619 F	72	9.5	16.20	1 0	5 5	5 5	1	0	99	99
HS_29254885 F	70	11	4.78	0 0	6 5	6 6	1	0	99	99
HB_24857778 M	49	22	60.14	NA 0	NA	7 7	1	0	NA	NA
ER_29118353 F	66	12	28.12	2 NA	5 5	5 4	0	0	99	99
UBF_35823034 F	60	13	37.24	2 NA	5 6	5 6	1	1	75	99
MK_30576870 M	68	19.5	14.52	1 0	4 3	4 4	0	0	97	99

Code <i>Geschlecht</i>	Alter	Bildungs- alter	Läsions- volumen in ml	mRS	Corsi vorw. Corsi rückw.		Aphasie		Token Test PR*	
					T0	T1	T0	T1	T0	T1
MH_30553136 <i>F</i>	63	11	17.68	4 4	4 4	5 6	1 0	94	99	
Mittelwert	61.6	13.78	26.3	1.25 0.57	4.9 4.8	5.4 5.3	- -	94.1	98.75	

Tabelle 13: klinische Parameter von Probanden mit konstant überhöhter Antwortabgabe
*PR= Prozentrang; NA= keine Angabe

Ein Overlap von Probanden, welche **konstant** eine vermehrte Antwortabgabe hatten, zeigt hier Überschneidungen für beide Grammatiken im Bereich des IPL sowie zudem in der Insula-Region (s. Abbildung 11: Overlap aller Probanden mit konstant überhöhter Antwortabgabe).



MNI-Koordinaten: X= -54, -44, -37, -26, -21, -16

Abbildung 11: Overlap aller Probanden mit konstant überhöhter Antwortabgabe (somit in >1 Session, in FSG (rot): N=7, PSG (blau): N=6)

3.2.1.4 VLSM: Analyse von Probanden mit besonderem Antwortverhalten

3.2.1.4.1 Tastenverwendung

Ein Liebermeister Test für die ein- und beidseitige **Tastenverwendung** (Abbildung 12a) assoziierte die **einseitige** Tastenverwendung mit dem SPL sowie Regionen an der Grenze des Gyrus supramarginalis und angularis. Die hier korrelierten Läsionen sind jedoch eher klein und nur punktförmig ausgeprägt.

3.2.1.4.2 Initial keinerlei Antwort

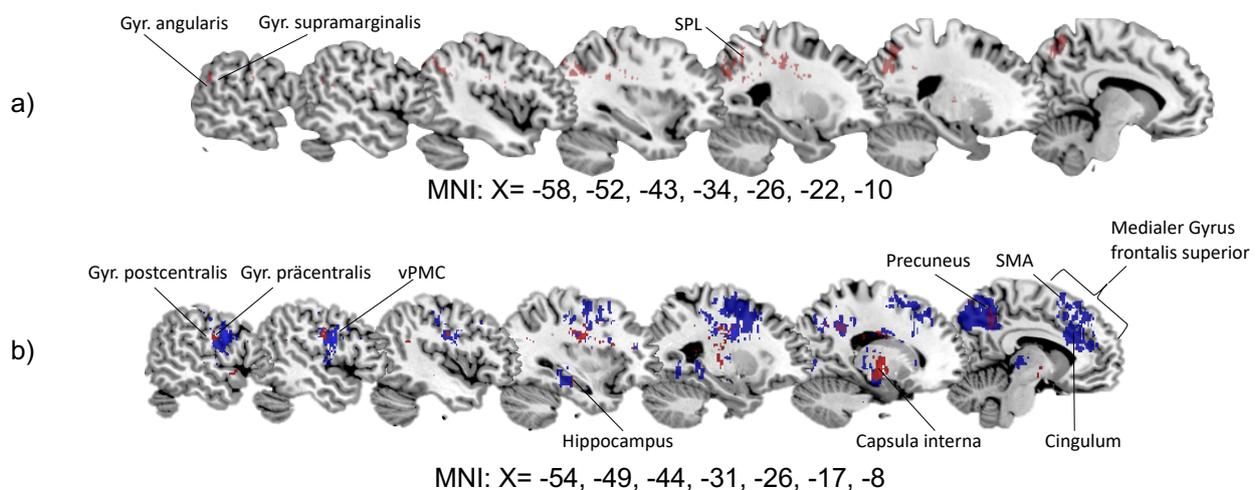
Probanden, welche zunächst **keinerlei** Antwort abgaben, zeigten in einem Liebermeister Test im Vergleich zu den restlichen Probanden (N=47 in FSG bzw. N=45 in PSG) Assoziationen zu präzentralen Regionen (vPMC), dem Precuneus, dem Thalamus und dem Hippocampus sowie der weißen Hirnsubstanz (Abbildung 12 b).

Das Cingulum, die SMA und der mediale Gyrus frontalis superior zeigten sich hier mit PSG assoziiert. Speziell für die lineare Grammatik zeigten sich signifikante Datenpunkte im Bereich der Capsula interna.

Die overlaps der Läsionen dieser Gruppe und der restlichen Probanden in Runde 1 mit mittlerer oder guter Anfangsleistung sowie weitere Liebermeister Tests hierzu finden sich im Anhang (s. Abbildung 27).

3.2.1.4.3 Initial überhöhte Antwortabgabe

Probanden, welche eine **überhöhte** Antwortabgabe zeigten im Liebermeister Test (N=11 FSG und N=10 PSG) im Vergleich zu den restlichen Probanden signifikante Voxel für beide Grammatiken im Bereich des IPL und SPL, postzentralen Regionen sowie des superioren und mittleren Okzipitallappens.



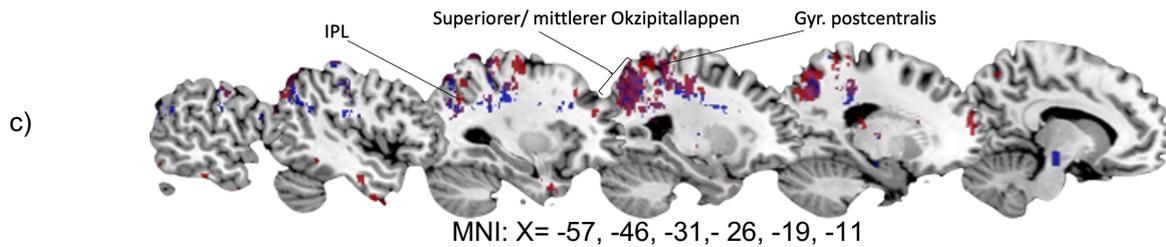


Abbildung 12: Liebermeister Tests für die Tastenverwendung sowie für Probanden mit 0-Runde oder überhöhter Antwortabgabe

- Liebermeister Test **Tastenverwendung** mit N=68 Probanden: einseitige Tastenverwendung der Probanden (rot) zeigt signifikante Voxel im Bereich des Gyrus supramarginalis/ angularis und des superioren Parietallappens (SPL).
- Liebermeister Test von Probanden mit **keinerlei** Antwortabgabe in Session 1 (FSG: N=19, PSG: N= 6) ggü. allen restlichen Probanden (FSG: N=47, PSG: N=45). Die Abgabe von keiner Antwort in Runde 1 zeigt sich in FSG (rot) mit Läsionen des Thalamus und der Capsula interna assoziiert, während die Abgabe keiner Antwort für PSG (blau) mit prä- und postzentralen Arealen verbunden ist. Beide Grammatiken zeigen zudem signifikante Voxel im Bereich des Precuneus und der weißen Hirnmasse.
- Liebermeister Test von Probanden mit **überhöhter** Antwortabgabe (FSG: N=11, PSG: N=10) ggü. allen restlichen Probanden (FSG: N=55, PSG: N=41). Eine überhöhte Antwortabgabe zeigte sowohl für FSG (rot) als auch für PSG (blau) assoziierte Läsionen im Bereich des IPL/SPL und Gyrus postcentralis.

3.2.2 Faktor Grammatiktyp: Gibt es Unterschiede in der Erlernbarkeit der beiden Grammatiken (FSG und PSG)?

3.2.2.1 Verhaltensdaten: Lernfortschritt und Leistung in den einzelnen Grammatiken

Für die lineare Grammatik (**FSG**) wurden 66 Probanden in den ersten 3 Runden getestet und bei 40 Probanden erfolgte zusätzlich noch eine vierte Runde. Die Ausgangsleistung in **Session 1** lag hier mit 25.3% deutlich unterhalb des Zufallsniveaus. Die Leistung in **Session 3** mit 50.5% lag somit jedoch auch nur knapp oberhalb des Zufallsniveaus. Für die kleinere Probandengruppe bis **Session 4** konnte eine Endleistung von 53.5% erreicht werden.

Auch für die eingebettete Grammatik (**PSG**) wurden mehr Probanden in den ersten drei Runden als in der letzten vierten Runde getestet, sodass sich hier ein Verhältnis von 51 zu 28 Patienten ergab. Die Ausgangsleistung lag hier mit 32.6% etwas höher, aber dennoch deutlich unter Zufallsniveau. In **Session 3** konnten die Probanden durchschnittlich eine Leistung von 54.8% erreichen, die kleinere Gruppe in **Session 4** sogar 62.5%.

Runde	FSG		PSG	
	MW (Min, Max, Stabw.)	Anzahl	MW (Min, Max, Stabw.)	Anzahl
Session 1	0.253 (0, 0.71, 0.24)	66	0.326 (0, 0.71, 0.22)	51
Session 3	0.505 (0, 1, 0.27)	66	0.548 (0, 1, 0.24)	51
Session 4	0.535 (0, 1, 0.26)	40	0.625 (0.05, 1, 0.25)	28

Tabelle 14: Vergleich Performanz FSG und PSG

Für **FSG** als auch für **PSG** konnte in allen drei Runden ein kontinuierlicher, signifikanter Zuwachs der Performanz beobachtet werden (s. Tabelle 15) mit einem mittleren Delta 3-1 von 25,1% für FSG und 22.16% für PSG.

Da nur ein kleinerer Anteil die 4. Session durchlief, wurden hier nochmals getrennt für diese Subgruppe paired t-tests durchgeführt. Da es sich hierbei um eine Teilmenge der oben genannten Probanden handelt, weichen die Performanzwerte der ersten drei Runden etwas von denen der Grundgesamtheit ab. Das Lerndelta von Runde 1 auf Runde 4 zeigte für beide Grammatiken einen signifikanten Lernanstieg (s. Tabelle 15). Für **FSG** konnte ein signifikanter Abfall der Performanz von 58.4 % in Session 3 auf 53.5 % in Session 4 festgestellt werden, während sich in **PSG** nochmal eine nicht signifikante Zunahme der Leistung von 59% in Runde 3 auf 62.5% Runde 4 zeigte. Der Vergleich der Lerndeltas von Runde 2-1 mit Runde 3-2 zeigte dass das Lerndelta für beide Grammatiken von der ersten auf die zweite Runde signifikant größer, als das der zweiten zur dritten Runde (ptT: FSG: $t(65) = 2.852$; $p = 0.006$; PSG: $t(50) = 2.285$; $p = 0.027$).

Lerndelta	FSG		PSG	
	MW (Min, Max, Stabw.)	Paired t-Test (ptT)	MW (Min, Max, Stabw.)	Paired t-Test (ptT)/ Wilcoxon (W)
Delta 2-1	0.195 (-0.7, 1, 0.32)	ptT: $t(65) = -4.9$ $p = 6.54 \cdot 10^{-6}$	0.172 (-0.33, 1, 0.334)	W: $n=51$, $z = -3.17$ $p = 0.002$
Delta 3-2	0.057 (-0.52, 0.47, 0.17)	ptT: $t(65) = -2.7$ $p = 0.0092$	0.049 (-0.24, 0.38, 0.14)	ptT: $t(50) = -2.5$ $p = 0.017$
Delta 3-1	0.251 (-0.7, 1, 0.334)	ptT: $t(65) = -6.2$; $p = 6.34 \cdot 10^{-8}$	0.222 (-0.43, 1, 0.34)	W $n=51$, $z = -3.955$; $p = 0.000076$
Delta 4-3	-0.048 (-0.38, 0.29, 0.13)	ptT: $t(39) = 2.29$, $p = 0.028$	0.034 (-0.33, 0.29, 0.12)	ptT: $t(27) = -1.5$, $p = 0.155$
Delta 4-1	0.232 (-0.7, 1, 0.35)	ptT: $t(39) = 4.22$, $p = 0.00014$	0.32 (-0.24, 1, 0.38)	ptT: $t(27) = 4.5$, $p = 0.0001$

Tabelle 15: statistischer Vergleich Lerndelta

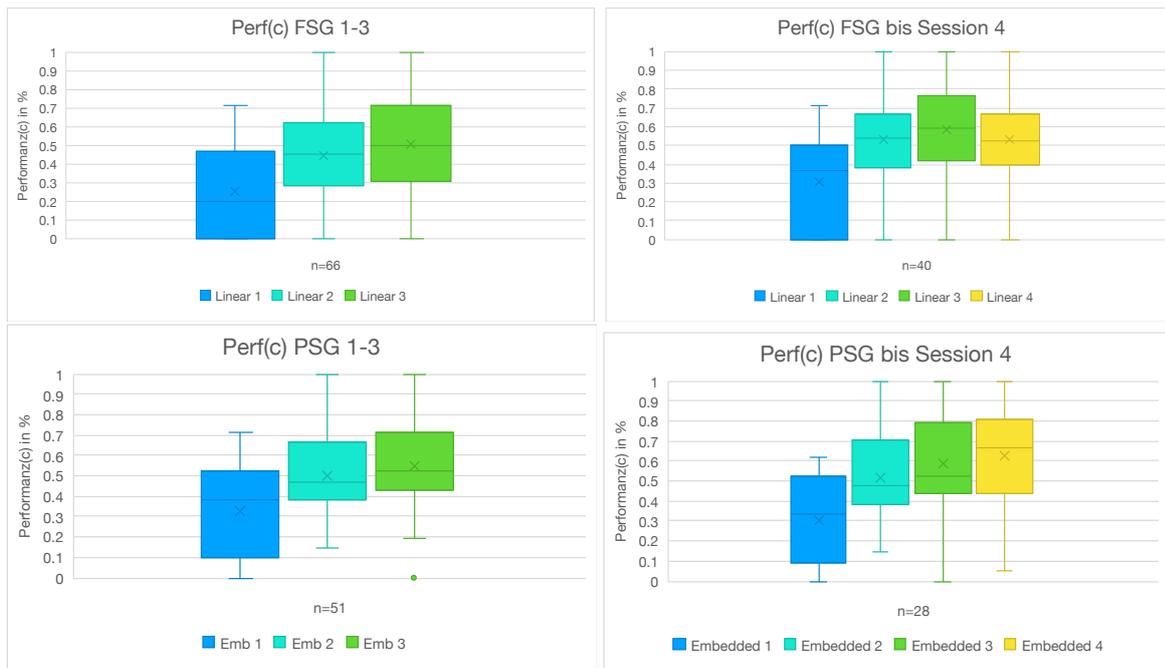


Abbildung 13: Performanz für alle Probanden in PSG sowie der Subgruppe bis Runde 4
Darstellung als Boxplot. Fläche in den Kästen definiert den Interquartilsabstand, Whisker zeigen Minimal- und Maximalwerte an. Kreuze repräsentieren den Mittelwert, waagerechte Striche den Median

3.2.2.1.1 Reaktionszeit

Sowohl in der linearen Grammatik (**FSG**) als auch in der eingebetteten (**PSG**) fand eine signifikante Abnahme der Reaktionszeit von Session 1 auf Session 3 statt (FSG ptT: $t(46)=2.227$; $p=0.031$; PSG: asymptot. Wilcoxon Test: $z=-2.628$; $p=0.009$, $n=46$).

Von Session 3 auf Session 4 fand trotz der Ausweitung der Grammatik auf neue Silben für beide Grammatiken eine weitere Reduktion der Reaktionszeit statt. Für **PSG** zeigte sich die Abnahme von 1627 ms auf 1539 ms **signifikant** (asymptot. Wilcoxon Test $z=-2.018$; $p=0.044$, $n=27$), für FSG von 1861 ms auf 1753 ms jedoch nicht.

Der Vergleich der Reaktionszeit von FSG und PSG zeigte in PSG über die ersten drei Runden hinweg signifikant niedrigere Werte (\varnothing S1-3: $t(48)=3.350$; $p=0.002$), für den Vergleich des Delta 3-1 konnte jedoch kein Unterschied festgestellt werden (ptT: $t(35)=0.119$, $p=0.906$). Auch für Session 3 und 4 war FSG zwar absolut gesehen signifikant langsamer (ptT S3: $t(48)=-4.583$; $p=0.000033$; korrigiertes Alpha-Fehlerniveau: 0.00625; S4: $t(25)=-2.1$; $p=0.046$), die Abnahme der Reaktionszeit erfolgte aber dennoch beinahe parallel (Delta 4-3 nicht signifikant: Wilcoxon $z=-0.417$, $p=0.677$, $n=35$).

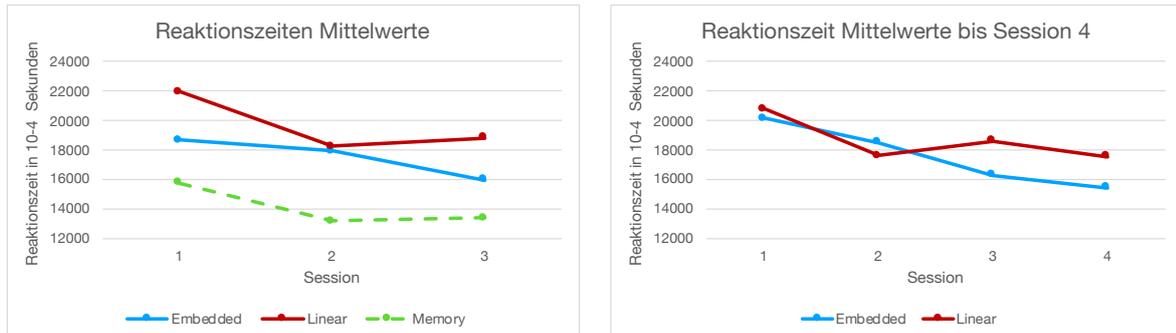


Abbildung 16: Unten jeweils aufgetragen die Mittelwerte für die Reaktionszeiten der Gruppen bis Runde 3 sowie der Subgruppe bis Runde 4.

Zur Klärung der Frage, ob korrekt eingeordnete Silbengruppen eine schnellere Reaktionszeit aufweisen als inkorrekt eingeordnete, erfolgte eine Untersuchung der einzelnen Antwortmöglichkeiten sowohl für beide Grammatiken getrennt als auch zusammen. **Grundsätzlich wurden richtige Silbengruppen schneller erkannt als falsche Silbengruppen**, für beide Grammatiken zeigten sich die richtig korrekten Antworten (Antwortcode „1“) über alle Runden signifikant schneller als die richtig inkorrekten Antworten (Antwortcode „2“).

Eine richtig korrekte Einteilung (Code 1) erfolgte in beiden Bedingungen signifikant schneller als eine falsche Einordnung einer korrekten Sequenz (Code 11). Umgekehrt verhielt es sich bei falschen Beispielen, hier wurden falsche Sequenzen signifikant schneller fälschlicherweise als richtig (Code 22) als korrekt falsch klassifiziert (Code 2). Probanden tendierten somit dazu, die Silben unabhängig von ihrer Grammatikalität schneller als richtig einzustufen, als diese als falsch zu deklarieren.

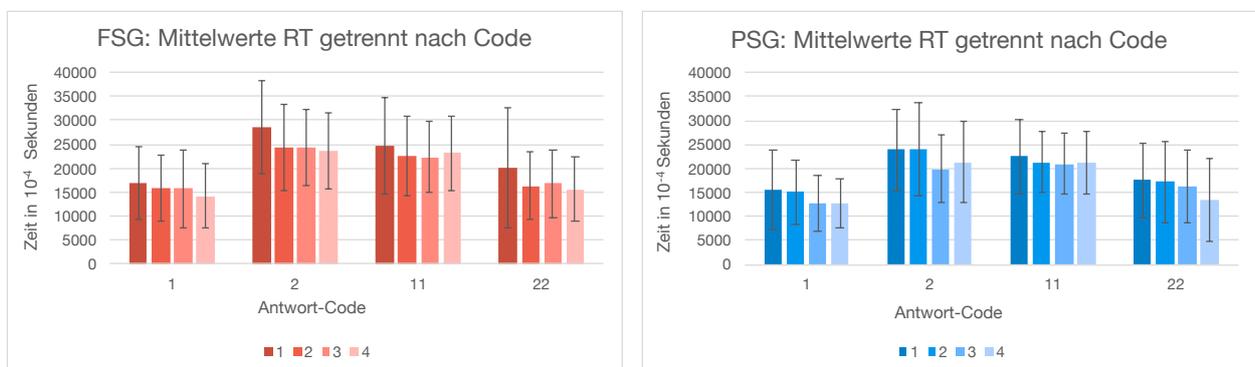


Abbildung 14: Reaktionszeiten für FSG und PSG getrennt nach Codes und Session

Two-sample t-Test	FSG	PSG
Code 1 / Code 2	t(1496)=-20.62; p=<0.001	t(1160)=-19.03; p=<0.001
Code 1 / Code 11	t(111)=-5.147; p=1.15*e ⁻⁶	t(91)=-6.4; p=6.73*e ⁻⁹
Code 2 / Code 22	t(95)=4.83; p=5.12*e ⁻⁶	t(83)=3.416; p=0.00098

Tabelle 16: statistischer Vergleich der Reaktionszeit

richtig korrekte Antworten = Antwortcode Code 1, richtig inkorrekte Antworten = Code 2,
falsch korrekte Antwort = Code 11, falsch inkorrekte Antwort = Code 22)

3.2.2.1.2 Fehlerart und –quote

Zum tiefergehenden Verständnis der falsch korrekt klassifizierten Silbengruppen wurde hier noch eine Analyse der Fehlerquoten und der Fehlerart durchgeführt.

Insgesamt betrachtet wurden für FSG etwas mehr der eingebauten Fehler von den Probanden versucht einzuordnen als für PSG (PSG mit 48.7% und FSG mit 51.3% der insgesamt beantworteten Stimuli). In beiden Grammatiken wurden durchschnittlich weniger Fehler erkannt (PSG 38.96%, FSG 39.12%) als dass diese als grammatikalisch korrekt verkannt wurden (PSG 61.03%; FSG 60.88%). Einschränkend ist hier jedoch auch zu erwähnen, dass durch die einseitige Tastenverwendung für einige Probanden die Einstufung eines Fehlers als grammatikalisch inkorrekt auch gar nicht möglich war. Betrachtet man daher die Relation der Antworten nur für Probanden mit beidseitiger Tastenverwendung, so bleibt dennoch ein leichter Vorteil für nicht erkannte Fehler gegenüber den erkannten (PSG Fehler erkannt: 44,0%, nicht erkannt: 55,997%; FSG erkannt: 49,7%, nicht erkannt: 50,29%). Die weitere Betrachtung erfolgt daher für alle Probanden, unabhängig von ihrer Tastenverwendung.

In **FSG** zeigten sowohl die gemachten Fehler (Antwortcode „11“) eine signifikant zunehmende Fehlerquote in Relation zu allen jeweils möglichen Fehlern mit zunehmenden Runden als auch die korrekt als Fehler eingestufte Silben (Code „2“) einen signifikanten Anstieg (s. Abbildung 15 a sowie Tabelle 17: Session 1 zu 3 Fehlerquote

Für **PSG** zeigte sich die Fehlerquote der beiden gemachten Fehler in Relation zu den jeweils möglichen Fehlern über die Runden 1-3 hinweg nur leicht zu verändern. Während Permutuationsfehler („P11“) leicht anstiegen, zeigten die Scramblingfehler eine abfallende Tendenz („Sc11“) (s. Abbildung 15b). In Bezug auf die korrekt als Fehler eingestuften Silben („2“) zeigte sich eine Zunahme mit steigenden Sessions (s. Tabelle 17: Session 1 zu 3 Fehlerquote

Der hier gezeigte Anstieg der Fehlergruppen ist allerdings auch auf die zunehmende Antwortbereitschaft im Laufe der Runden zurückzuführen. Bezieht man die gemachten Fehler auf die Anzahl der getätigten Antworten der jeweiligen Fehlerart (Abbildung 15 b) und d)), so zeigen sich für beide Grammatiken wiederum eine Abnahme der als richtig verkannten Fehler, wohingegen die korrekt eingestuften Fehler weiterhin eine Zunahme verzeichnen.

Grundsätzlich schienen **Permutuationsfehler** in **FSG** weniger oft als richtig verkannt worden zu sein als Scramblingfehler und wurden zudem auch öfters als Fehler erkannt. Während es in FSG für nicht erkannte Fehler („11“) keine Unterschiede zwischen Permutation und Scrambling gab, so ließ sich der Permutuationsfehler signifikant besser erkennen („2“) als der Scramblingfehler (s. Tabelle 18). Dieser Trend für FSG besteht bereits in Runde 1, ist jedoch erst ab Runde 2 signifikant (Wilcoxon asymptot. Signifikanz für S 2: $N=66$; $Z=-2.297$; $p=0.022$).

Für **PSG** schienen die Permutuationsfehler weniger leicht zu erkennen zu sein, Probanden täuschten sich hier ähnlich oft in der Einordnung von Permutuationsfehlern und Scramblingfehlern, und konnten beide gleich gut erkennen (s. Tabelle 18).

Der Vergleich der Fehlerquoten für beide Grammatiken zeigte für Permutuationsfehler somit einen signifikanten Unterschied (ptT: $t(48)=2.923$; $p=0.005$; korr. Alpha-Fehlerniveau: 0.0071), für Scrambling konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden (ptT: $t(48)=0.087$; $p=0.931$). Für das Delta der Runden 3-1 konnten unter der Korrektur nach Bonferroni-Holm hinsichtlich der Haupthypothesen kein signifikanter Unterschied zwischen den Grammatiken festgestellt werden (Scramblingfehler ptT $t(48)=2.262$; $p=0.028$; korr. Alpha-Fehlerniveau: 0.0083; Permutuationsfehler ptT: $t(48)=0.734$; $p=0.467$).

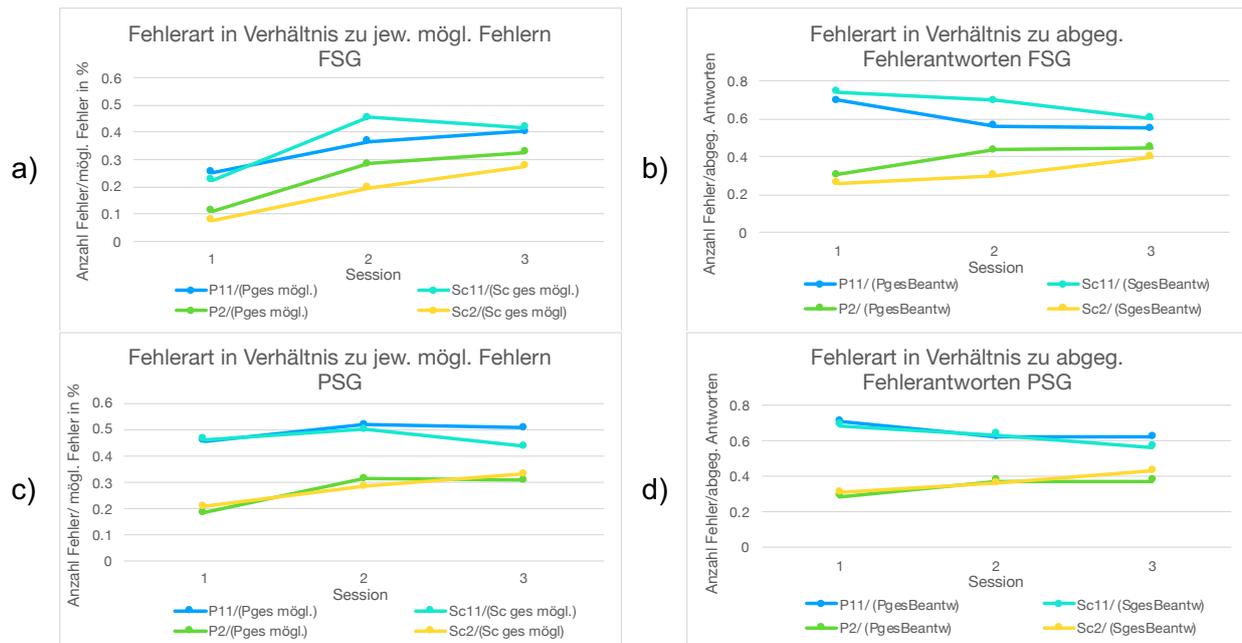


Abbildung 15: Häufigkeit der Fehlerarten in Verhältnis zu den jeweils möglichen Fehlern (a und c) sowie in Verhältnis zu den abgegebenen Antworten je Fehlerart (b und d). P = Permutation, Sc = Scrambling, „11“ steht hier für gemachte Fehler, „2“ für erkannte Fehler.

Gemachte Fehler (Code 11) Session 1 zu 3		
	FSG gepaarter t-Test (<i>ptT</i>)/ Wilcoxon (<i>W</i>)	PSG gepaarter t-Test (<i>ptT</i>)/ Wilcoxon (<i>W</i>)
Permutation	<i>ptT</i> : $t(65) = 3.708$, $p = 0.000434$;	<i>W</i> : $n = 51$; $Z = -0.553$; $p = 0.58$
Scrambling	<i>ptT</i> : $t(65) = 3.527$, $p = 0.001$	<i>ptT</i> : $t(50) = -0.454$; $p = 0.652$
Erkannte Fehler (Code 2) Session 1 zu 3		
Permutation	<i>W</i> : $n = 66$, $Z = -4.376$, $p = 0.000012$	<i>W</i> : $n = 51$, $Z = -2.384$, $p = 0.017$
Scrambling	<i>W</i> : $n = 66$, $Z = -4.084$, $p = 0.000044$	<i>W</i> : $n = 51$, $Z = -1.696$, $p = 0.090$

Tabelle 17: Session 1 zu 3 Fehlerquote

Für FSG konnte sowohl für erkannte als auch gemachte Fehler eine signifikante Abnahme der Fehlerquote festgestellt werden, während dies für PSG nur für die erkannten Fehler der Fall war.

Scrambling vs. Permutation	FSG	PSG
Gemacht (Code 11)	<i>ptT</i> : $t(65) = -0.553$, $p = 0.582$	<i>ptT</i> : $t(50) = 0.842$; $p = 0.404$
Erkannt (Code 2)	<i>W</i> : $n = 66$; $Z = -2.631$; $p = 0.009$	<i>ptT</i> : $t(50) = -0.104$; $p = 0.918$

Tabelle 18: statistischer Vergleich der Fehlertypen

3.2.2.2 VLSM: Lernfortschritt und Leistung in den einzelnen Grammatiken

3.2.2.2.1 Session 1 / Ausgangsleistung

Der Liebermeister Test für Probanden mit einer Leistung <50% (jedoch ohne 0-Runde) zu Probanden mit einer anfänglichen Leistung >50% zeigte nur vereinzelt Voxel für beide Grammatiken im Bereich der weißen Hirnsubstanz innerhalb des Verlaufs des SLF/AF sowie des Ncl. caudatus.

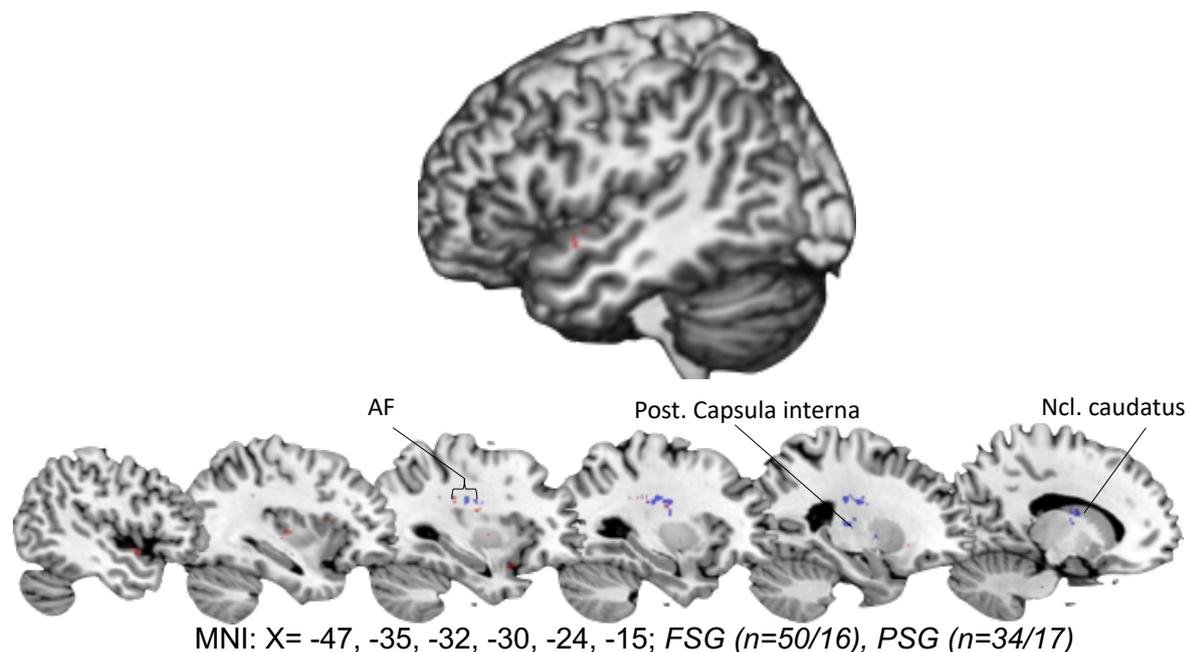


Abbildung 16: Liebermeister Test Probanden in Session 1 < Chance vs. >Chance für FSG (rot) und PSG (blau): Es zeigen sich Läsionen im Bereich der weißen Hirnsubstanz für beide Grammatiken sowie eine geringe Beteiligung des Ncl. Caudatus und der Capsula interna für PSG.

3.2.2.2.2 Session 3 / Maximum

Für **FSG** konnten mittels Brunner-Munzel Test in *Session 3* signifikante Voxel im Bereich des prämotorischen Cortex (PMC), **Gyrus post- und präcentralis**, sowie des **posterioren STG und MTG** gefunden werden. Für die eingebettete Grammatik zeigten sich hauptsächlich Voxel im Bereich des **Putamen** signifikant, sowie der **posteriore STG, STS und MTG**. Beide Grammatiken zeigten Läsionen der weißen Substanz im Verlauf des AF. Eine Beteiligung des IFG konnte für die Assoziation mit der Leistung in Runde 3 für beide Grammatiken nicht nachgewiesen werden. Die Läsion der Broca Region ist nicht assoziiert mit einer schlechteren Leistung in S3.

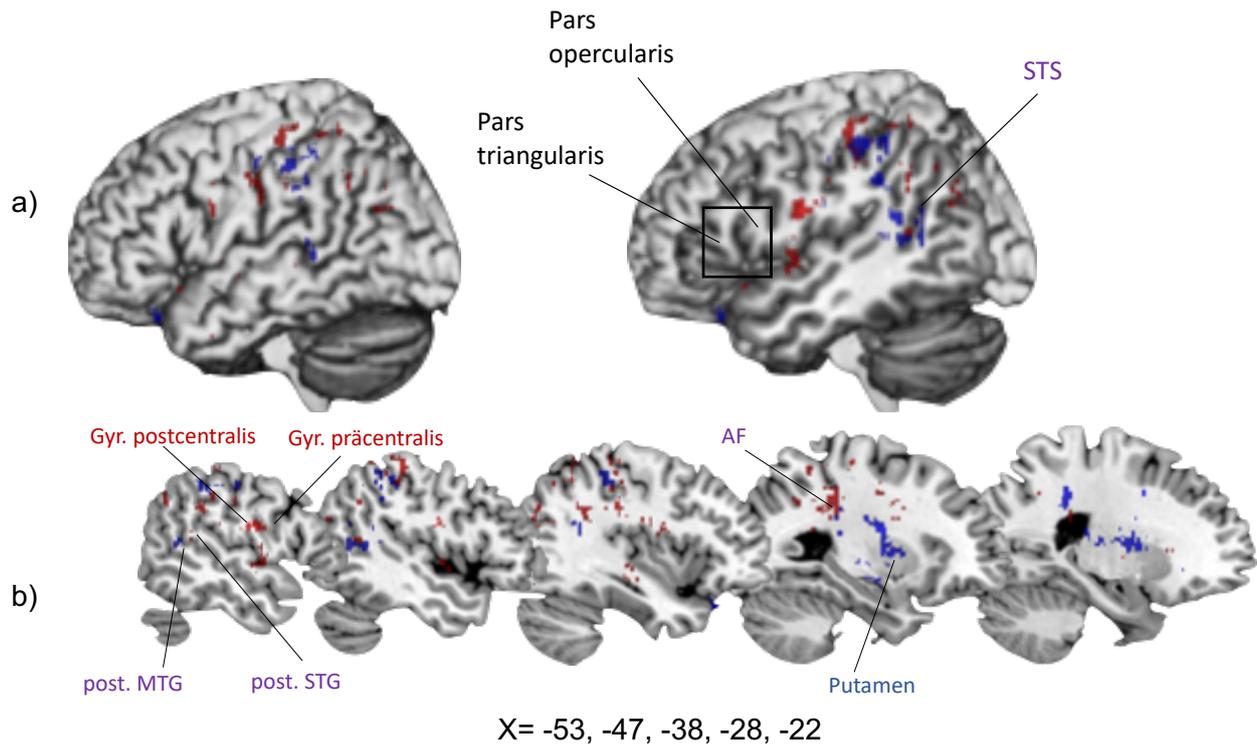


Abbildung 17: Session 3

a) Volume render in 2 Ebenen sowie b) multislice des BM Tests für FSG (rot) vs. PSG (blau). Regionen für FSG als auch PSG in lila. Eine schlechte Endleistung für FSG zeigt sich mit Voxel im Bereich des Gyrus post/präcentralis verbunden sowie in geringerem Ausmaß mit Regionen des posterioren STG und MTGs. Die schlechte Endleistung in PSG korreliert ebenfalls mit Läsionen des posterioren MTGs, STGs und STS sowie zudem mit Läsionen im Bereich des Putamens.

3.2.2.2.3 Lerndelta Runde 3 zu 1

Der Vergleich der Grammatiken für das *Lerndelta* von *Runde 1 auf Runde 3* hingegen assoziierte eine schlechte Lernleistung mit einer Beteiligung des **IFG**. Die Pars triangularis und die Pars opercularis zeigten sich hier sowohl für **PSG** und als auch für **FSG** mit einem schlechten Lernerfolg verbunden. Zudem zeigen sich Läsionen des IPL, des Gyrus supramarginalis, des Gyrus postcentralis sowie des Putamens und der weißen Substanz mit beiden Grammatiken assoziiert.

Für **FSG** sind zudem Läsionen des Gyrus angularis, des STGs sowie der anterioren Insula mit einer schlechten Lernleistung verbunden.

Für **PSG** zeigten sich, zusätzlich noch Läsionen des Gyrus occipitalis medialis und der V5 signifikant.

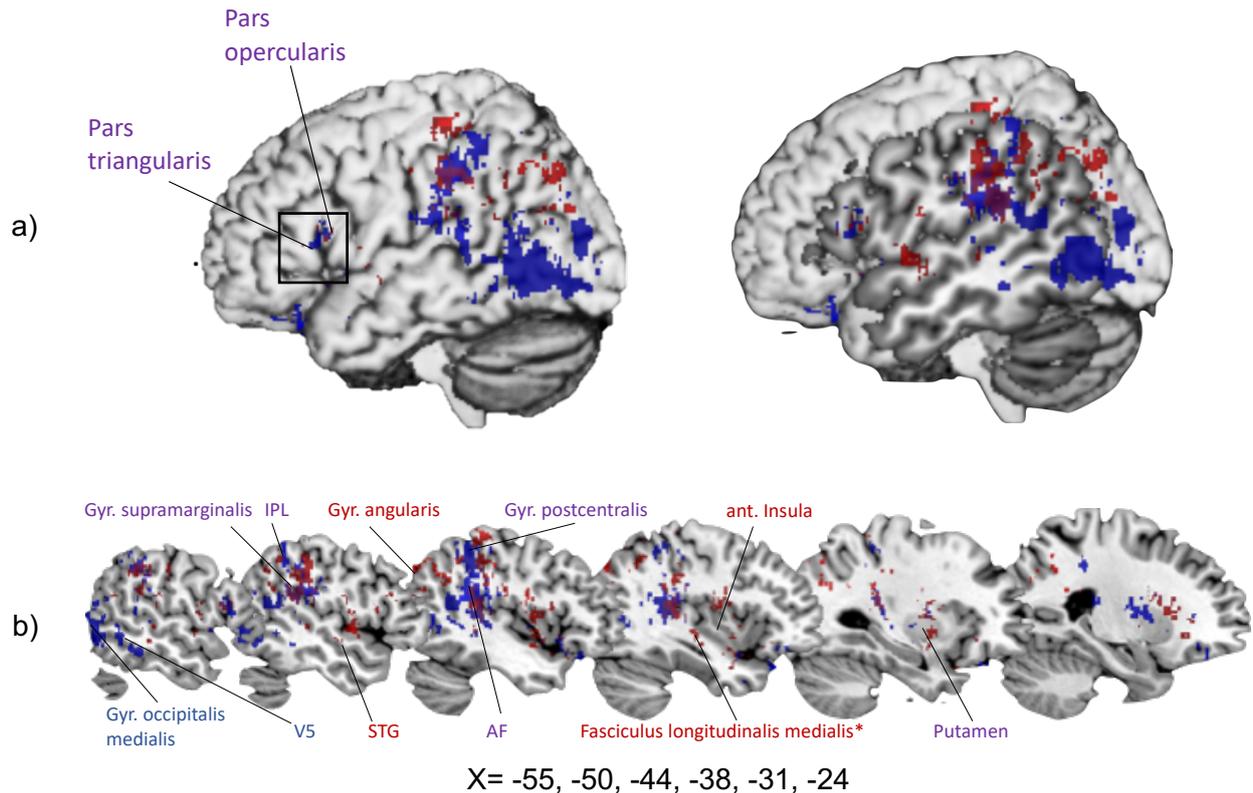


Abbildung 18: Volume render und multislices des BM des Lerndeltas Session 1-3

a) Volume render in 2 Ebenen sowie b) multislice des BM Test für FSG (rot) vs. PSG (blau). Regionen für beide Grammatiken in lila dargestellt. Hier zeigen sich ähnliche Hirnregionen mit einem schlechten Lernzuwachs assoziiert wie es für Session 3 der Fall war, zusätzlich jedoch zeigt sich eine Beteiligung des IFG für beide Grammatiken. Sowohl der anteriore Teil der Pars opercularis als auch der posteriore Teil der Pars triangularis scheinen hier mit einer schlechten Lernleistung für beide Grammatiken verknüpft. *Die Einschätzung des Verlaufs des Fasc. longitudinalis medialis erfolgte nach (Makris und Pandya 2009).

3.2.2.2.4 Generalisierung

Zur weiteren Einschätzung des Lernerfolgs wurde die Fähigkeit zur Generalisierung analysiert. Ein Liebermeister Test (Generalisierung ja= positives Delta 4-3/ nein= negatives Delta 4-3) zeigt hier für beide Grammatiken Läsionen des **IPL**, des **Gyrus angularis** und des posterioren **MTG** mit stärkerer Betonung für PSG. In der weißen Substanz präsentieren sich Läsionen im Bereich des SLF. Für **FSG** konnten zusätzlich Läsionen des anterioren STGs sowie im **Gyrus präcentralis** und der Capsula externa u. extrema. Mit der **PSG** zeigen sich zudem die Faserverbindungen des Fasciculus longitudinalis medialis (MdLF) und des Fasciculus arcuatus verbunden.

Ein Brunner-Munzel Test für das Delta von Runde 4-3 gibt hingegen Aufschluss über den anhaltenden Lernprozess über die Fähigkeit der Generalisierung hinaus. Hier zeigen sich für **FSG** signifikante Areale im Bereich anterioren Temporallappens, sowie der posterioren **Insula** und der Capsula externa u. extrema. Für **PSG** zeigten sich der

MTG, der **Gyrus supramarginalis** und sowie die anteriore **Insula** assoziiert. Läsionen des IFG sind hier mit beiden Grammatiken assoziiert, jedoch präsentieren diese unterschiedliche anatomische Muster. Während PSG eher mit den inferioren Anteilen der Pars orbicularis und triangularis sowie prärolandischen Regionen korreliert, zeigen sich für FSG Läsionen vorwiegend der superioren Pars triangularis.

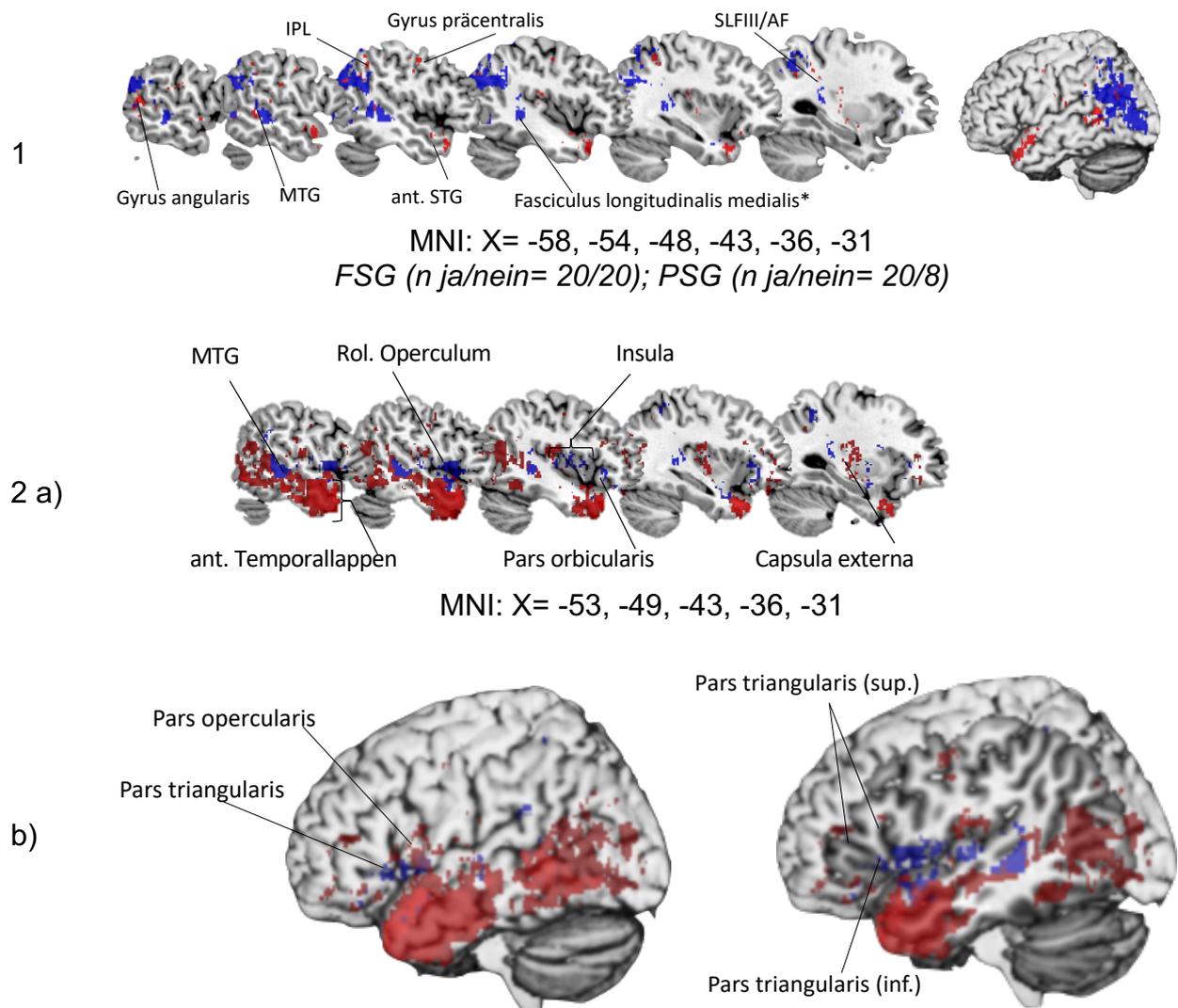


Abbildung 19: Liebermeister und BM Test der Generalisierung

- Liebermeister Test Generalisierung: (ja= positives Delta 4-3/ nein= negatives Delta 4-3)**
Hier zeigen sich hauptsächlich Voxeln für PSG (blau) mit einer schlechten Fähigkeit der Generalisierung verbunden. Signifikante Voxeln treten hier für PSG im Bereich des Gyrus supramarginalis/angularis als auch im posterioren und mittleren MTG auf. Für FSG (rot) zeigen sich Läsionen des anterioren STG/MTG und des posterioren MTGs beteiligt. *Die Einschätzung des Verlaufs des Fasc. longitudinalis medialis erfolgte nach (Makris und Pandya 2009).
- Brunner-Munzel Test Delta 4-3 a) multislice und b) volume render:** Wie auch im Liebermeister zeigt sich hier für PSG (blau) eine Assoziation zu dem mittleren MTG und zusätzlich mit Teilen der Insula. Für FSG (rot) zeigen sich ebenfalls die Insula sowie großflächig Bereiche des anterioren und posterioren Temporallappens mit einer schlechten Generalisierung verbunden. In b) zeigt sich deutlich eine Beteiligung des IFG (insbes. die inferioren Anteile der Pars opercularis und Pars triangularis) für beide Grammatiken.

3.2.3 Vergleich von FSG zu PSG

Der Vergleich der beiden Grammatiktypen untereinander, und somit der 49 Probanden, welche beide Grammatiken bis zur 3. Runde durchlaufen haben, zeigt mittels Wilcoxon Test lediglich einen signifikanten Unterschied der beiden Ausgangslevel in Session 1 (asymptot. Signifikanz: $z = -1.995$; $p = 0.046$; $n = 49$). In FSG erreichten die Probanden hier eine Performanz von 26,1% in Runde 1, während sie in PSG 31,95% erreichten. Der Kurvenverlauf der Mittelwerte für die beiden Grammatiken präsentiert sich hier dennoch annähernd parallel zueinander, die restlichen Mittelwerte zeigten sich nicht signifikant verschieden.

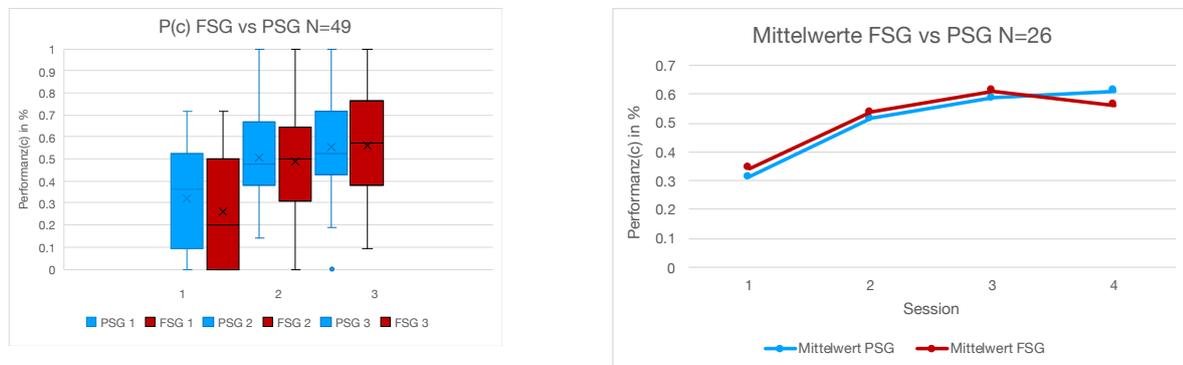


Abbildung 20: Vergleich der Mittelwerte der Performanz (FSG und PSG)

Aufgetragen wurde die jeweilige korrigierte Performanz im Vergleich von FSG (rot) zu PSG (blau) für alle Probanden (links) sowie der Probanden, welche beide Grammatiken bis Runde 4 absolvierten (rechts).

3.2.4 Faktor Aphasie: Gibt es Unterschiede zwischen Patienten mit Aphasie und ohne Aphasie?

3.2.4.1 Verhaltensdaten: Einfluss des Aphasie-Status

Hinsichtlich des Aphasie-Status der Patienten wurde des Weiteren unterschieden zwischen einer Aphasie zum Zeitpunkt des akuten Schlaganfalls (**T0**) sowie einer Aphasie in der follow-up Phase (**T1**).

Für die einzelnen Grammatiken getrennt betrachtet ergab sich hier für die lineare Grammatik bei den **Aphasikern** eine signifikante Steigerung der Performanz über alle 3 Runden hinweg (s. Tabelle 19). Für die eingebettete Grammatik zeigte sich zwar ebenfalls ein kontinuierlicher Anstieg, der initiale Lernerfolg von Session 1 auf 2 blieb aber knapp nicht signifikant (s. Tabelle 19).

Die **Nicht-Aphasiker** hingegen zeigten in der linearen sowie in der eingebetteten Grammatik nur initial einen signifikanten Lernanstieg von Runde 1 auf Runde 2 und zeigten anschließend keine signifikante Änderung der Leistung (s. Tabelle 19).

Hinsichtlich der Generalisierbarkeit lassen sich sowohl für Aphasiker als auch für Nicht-Aphasiker Unterschiede feststellen: Während in FSG ein Abfall der Performanz von Session 3 auf Session 4 stattfindet, steigt sie in PSG beide Male zumindest leicht an (s. Abbildung 21). Der Vergleich mittels induktiver Statistik gestaltet sich hier für die Nicht-Aphasiker in T0 aufgrund der stark unterschiedlichen, aber dennoch sehr kleinen Gruppengrößen (N=13 für FSG und N=6 für PSG) schwierig. Daher werden hier vorrangig deskriptive Methoden zur Beschreibung der Unterschiede angewandt. Somit zeigen die zwei Gruppen der Aphasiker und Nicht-Aphasiker zwar eine unterschiedlich starke Dynamik hinsichtlich der Generalisierbarkeit in den zwei Grammatiken, dennoch stellt sich der jeweilige Lernzuwachs (Delta 4-3) im Vergleich als nicht signifikant heraus (ptT Delta 4-3 FSG/PSG sowohl für Aphasiker $t(19)=-1.6$; $p=0.124$; Nicht-Aphasiker $t(5)=-1.26$, $p=0.264$). Ein Vergleich der Mittelwerte für Session 4 zeigt jedoch in der Gruppe der Nicht-Aphasiker eine signifikant bessere Leistung für die eingebettete Grammatik als für die lineare Grammatik, während bei der Gruppe der Aphasiker hier kein Unterschied besteht (Nicht-Aphasiker T0: asymptot. Wilcoxon Test $z=-2.032$; $p=0.042$; $n=6$).

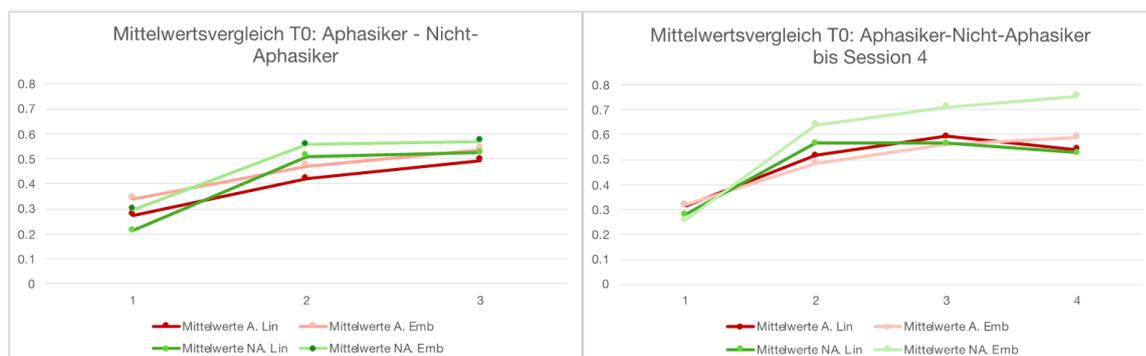


Abbildung 21: Mittelwertsvergleich der Subgruppen zum Zeitpunkt T0
Aphasiker in rot, Nicht-Aphasiker in grün (Lin = lineare Grammatik; Emb = eingebettete Grammatik)

Aphasiker				
Lerndelta	FSG		PSG	
	MW (Min, Max, Stabw.)	Paired t-Test (ptT)	MW (Min, Max, Stabw.)	Paired t-Test (ptT)/ Wilcoxon (W)
Delta 2-1	0.146 (-0.7, 0.95, 0.313)	ptT: $t(44)=-3.13$ p=0.003	0.131 (-0.33, 1.0, 0.336)	W: $n=35$; $z=-1.883$ $p=0.06$
Delta 3-2	0.0758 (-0.24, 0.48, 0.161)	ptT: $t(44)=-3.16$ p=0.0029	0.066 (-0.24, 0.29, 0.135)	ptT: $t(34)=-2.91$ p=0.0064
Delta 3-1	0.222 (-0.7, 1.0, 0.342)	ptT: $t(44)=-4.36$ p=7.7*e⁻⁵	0.198 (-0.24, 0.91, 0.327)	W: $n=35$; $z=-3.07$ p=0.002

Delta 4-3	-0.053 (-0.28, 0.28, 0.131)	ptT: t(26)=2.11 p=0.0446	0.031 (-0.33, 0.29, 0.129)	ptT: t(21)=-1.122 p=0.274
Nicht-Aphasiker				
Delta 2-1	0.299 (-0.4, 1.0, 0.326)	ptT: t(20)=-4.21 p=0.0004	0.262 (-0.23, 0.91, 0.321)	ptT: t(15)=-3.26 p=0.005
Delta 3-2	0.016 (-0.52, 0.4, 0.189)	ptT: t(20)=-0.38 p=0.71	0.012 (-0.2, 0.38, 0.159)	ptT: t(15)=-0.311 p=0.76
Delta 3-1	0.315 (-0.2, 1.0, 0.317)	ptT: t(20)=-4.5 p=0.0002	0.274 (-0.43, 1.0, 0.381)	ptT: t(15)=-2.876 p=0.012
Delta 4-3	-0.038 (-0.38, 0.14, 0.142)	ptT: t(12)=0.955 p=0.36	0.043 (-0.05, 0.19, 0.096)	ptT: t(5)=-1.11 p=0.32

Tabelle 19: Vergleich der Lerndeltas für Aphasiker und Nicht-Aphasiker zum Zeitpunkt T0

Zum Zeitpunkt **T1** waren insgesamt nur noch 18 Probanden aphasisch, es blieben somit ca. 40% der vorherigen Aphasiker weiterhin aphasisch, die restlichen 50 Probanden zeigten sich jedoch ohne Aphasie. Das oben gezeigte Lernverhalten kehrt sich zum Zeitpunkt **T1** für die lineare Grammatik um: **Aphasiker** zeigten hier zwar einen beinahe linearen, aber nicht signifikanten Lernanstieg über die ersten drei Runden (s. Tabelle 20), ebenso erfolgte der Anstieg der eingebetteten Grammatik zwar kontinuierlich, aber ebenfalls nicht signifikant.

Hinsichtlich der Generalisierbarkeit in der Subgruppe der Patienten, welche die vierte Runde absolvierten, können hier für die Aphasiker in T1 aufgrund der sehr kleinen Gruppengrößen (N=10 für FSG und N=8 für PSG) wieder nur deskriptive Unterschiede festgestellt werden. Auch hier spiegelt sich der Verlauf der Grammatiken aus T0 wider: Für die lineare Grammatik zeigt sich ein nicht signifikanter Abfall der Performanz von Runde 3 auf 4, während in PSG weiterhin ein Anstieg stattfand.

Bei den **Nicht-Aphasikern** hingegen wurde der Lernanstieg über die ersten drei Runden der linearen und der eingebetteten Grammatik signifikant (s. Tabelle 20).

Hinsichtlich der Generalisierung zeigt sich, bei deutlich größerer Gruppengröße von n=30 für FSG und n=20 für PSG, der Effekt der Gesamtpopulation widergespiegelt mit einem signifikanten Abfall der Performanz von Runde 3 auf Runde 4 in FSG (s. Tabelle 20) und keiner signifikanten Veränderung in PSG. Dies mag durchaus durch die stark unterschiedliche Anzahl an Probanden der einzelnen Gruppen zu den unterschiedlichen Zeitpunkten begründet sein: Von den insgesamt 40 Probanden, welche die vierte Runde absolvierten, waren 17 Probanden, welche sich im Zeitraum zwischen T0 und T1 von ihrer Aphasie erholten (=Recovery). Mit dieser Anzahl der Probanden verschieben sich die Performanz und damit auch die Signifikanz der Unterschiede zwischen den einzelnen Runden.

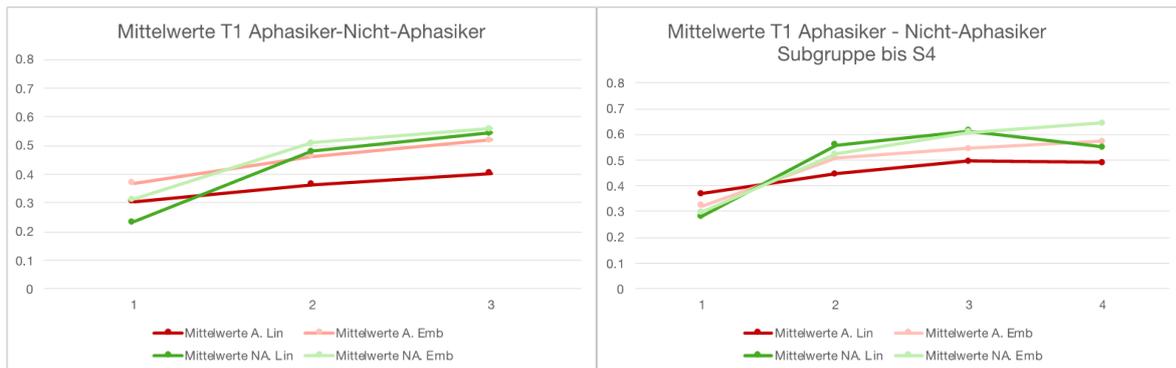


Abbildung 22: Mittelwertvergleich der Subgruppe zum Zeitpunkt T1
 Aphasiker in rot, Nicht-Aphasiker in grün (Lin = lineare Grammatik; Emb = eingebettete Grammatik)

Lerndelta	Aphasiker			
	FSG		PSG	
	MW (Min, Max, Stabw.)	Paired t-Test (ptT)	MW (Min, Max, Stabw.)	Paired t-Test (ptT)/ Wilcoxon (W)
Delta 2-1	0.059 (-0.7, 0.71, 0.325)	ptT: t(17)=-0.77 p=0.45	0.095 (-0.33, 1.0, 0.432)	W: n=13; z=-0.11; p=0.916
Delta 3-2	0.041 (-0.24, 0.33, 0.143)	ptT: t(17)=-1.24 p=0.23	0.056 (-0.24, 24, 0.167)	ptT: t(12)=-1.21 p=0.25
Delta 3-1	0.1 (-0.7, 0.71, 0.335)	ptT: t(17)=-1.27 p=0.22	0.151 (-0.24, 0.91, 0.371)	W: n=13; z=-0.91; p=0.363
Delta 4-3	-0.005 (-0.24, 0.29, 0.151)	ptT: t(9)=0.11 p=0.92	0.028 (-0.33, 1.0, 0.178)	ptT: t(7)=-0.45 p=0.67
Nicht-Aphasiker				
Delta 2-1	0.246 (-0.4, 1.0, 0.31)	ptT: t(47)=-5.5 p=1.5*e⁻⁶	0.198 (-0.33, 0.91, 0.295)	ptT:t(37)=-4.14 p=0.0002
Delta 3-2	0.062 (-0.52, 0.48, 0.182)	ptT: t(47)=-2.37; p=0.02	0.047 (-0.2, 0.38, 0.137)	ptT: t(37)=2.13 p=0.04
Delta 3-1	0.308 (-0.2, 1.0, 0.319)	ptT: t(47)=-6.68 p=2.48*e⁻⁸	0.246 (-0.43, 1.0, 0.334)	ptT: t(37)=-4.54 p=5.85*e⁻⁵
Delta 4-3	-0.062 (-0.38, 0.14, 0.126)	ptT t(29)=2.71 p=0.011	0.036 (-0.1, 0.29, 0.096)	ptT: t(19)=-1.66 p=0.11

Tabelle 20: Vergleich der Lerndeltas für Aphasiker und Nicht-Aphasiker zum Zeitpunkt T1

Aphasiker vs Nicht-Aphasiker	T0		T1	
	FSG	PSG	FSG	PSG
Session 1	MW: U=403.5 z=-0.97 n=66 p=0.331	MW: U=240.5 z=-0.81 n=51 p=0.421	MW: U=366.5 z=-0.96 n=66 p=0.335	MW: U=211.5 z=-0.77 n=51 p=0.441
Session 2	ttT: t(64)=-1.36 p=0.18	ttT: t(49)=-1.46 p=0.15	ttT: t(64)=-1.71 p=0.093	ttT: t(49)=-0.73 p=0.47
Session 3	ttT: t(64)=-0.42 p=0.68	ttT: t(49)=-0.44 p=0.66	ttT: t(64)=-1.9 p=0.062	ttT: t(49)=-0.496 p=0.62
Session 4	ttT: t(38)=0.157 p=0.876	ttT: t(26)=-1.471 p=0.153	ttT: t(38)=-0.62 p=0.54	ttT: t(26)=-0.69 p=0.499

Tabelle 21: statistischer Vergleich von Aphasikern zu Nicht-Aphasikern in T0 und T1

Direkter Vergleich von Aphasikern zu Nicht-Aphasikern

Der Vergleich von **Aphasikern** zu **Nicht-Aphasikern** in T0 und T1 des

- a) Mittelwerts der Performanz in jeder Runde zeigt in allen Runden keinen signifikanten Unterschied, weder für die lineare noch für die eingebettete Grammatik (Tabelle 21). Dennoch kann anhand der Mittelwerte der einzelnen Gruppen eine tendenziell schlechtere Leistung für die Gruppe der Aphasiker in der linearen Grammatik ausgemacht werden: Probanden, welche Aphasiker blieben (T1), erreichten in Runde 3 im Schnitt eine Leistung von 40,42% während Nicht-Aphasiker in T1 auf eine Leistung von 54,3% kamen.
- b) Lernzuwachs (Delta): Aphasiker, welche dies auch bis zum Untersuchungszeitraum blieben (T1), hatten einen signifikant geringeren Lernzuwachs in FSG über die Runden 1 bis 3 (Delta3-1) als Nicht-Aphasiker zum Zeitpunkt T1 (FSG: ttT: $t(64)=-2.323$, $p=0.023$; PSG: MW: $U=189.5$; $z=-1.243$; $n=51$; $p=0.214$). Dies ist umso bemerkenswerter, wenn man bedenkt, dass in beiden Grammatiken für die Gruppe der Aphasiker ein höheres Ausgangslevel in der Performanz vorhanden war, als für Nicht-Aphasiker.

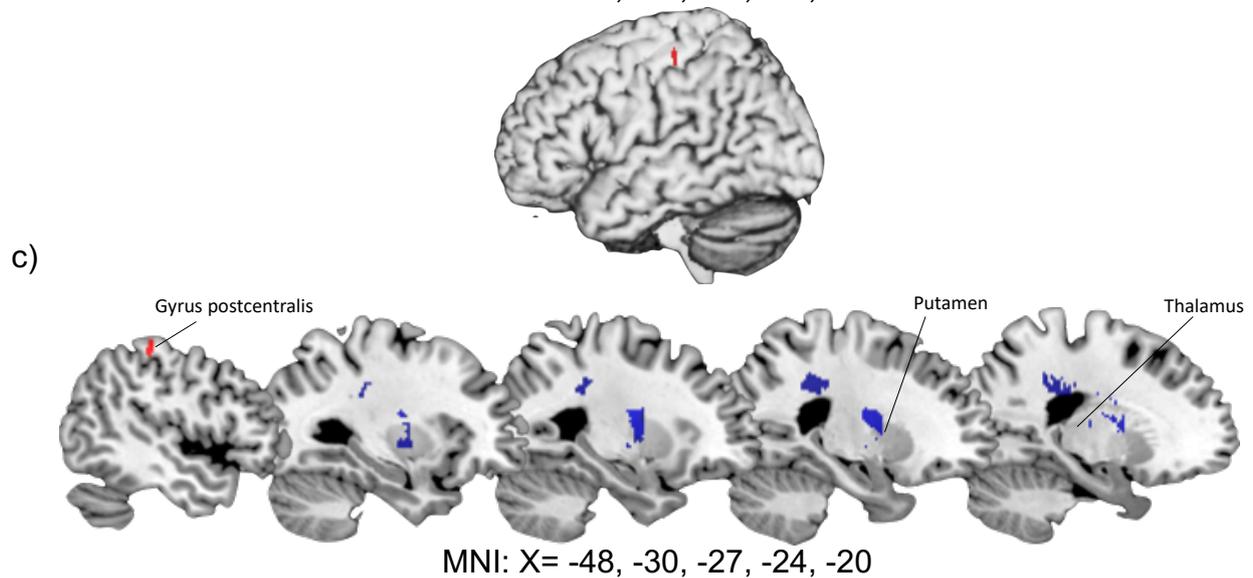
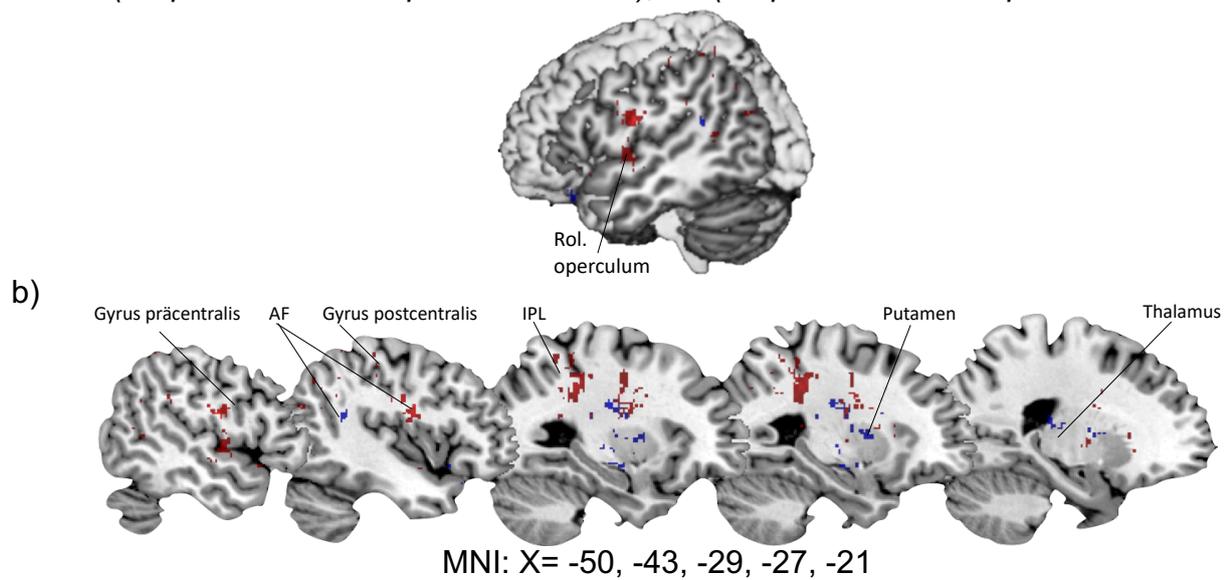
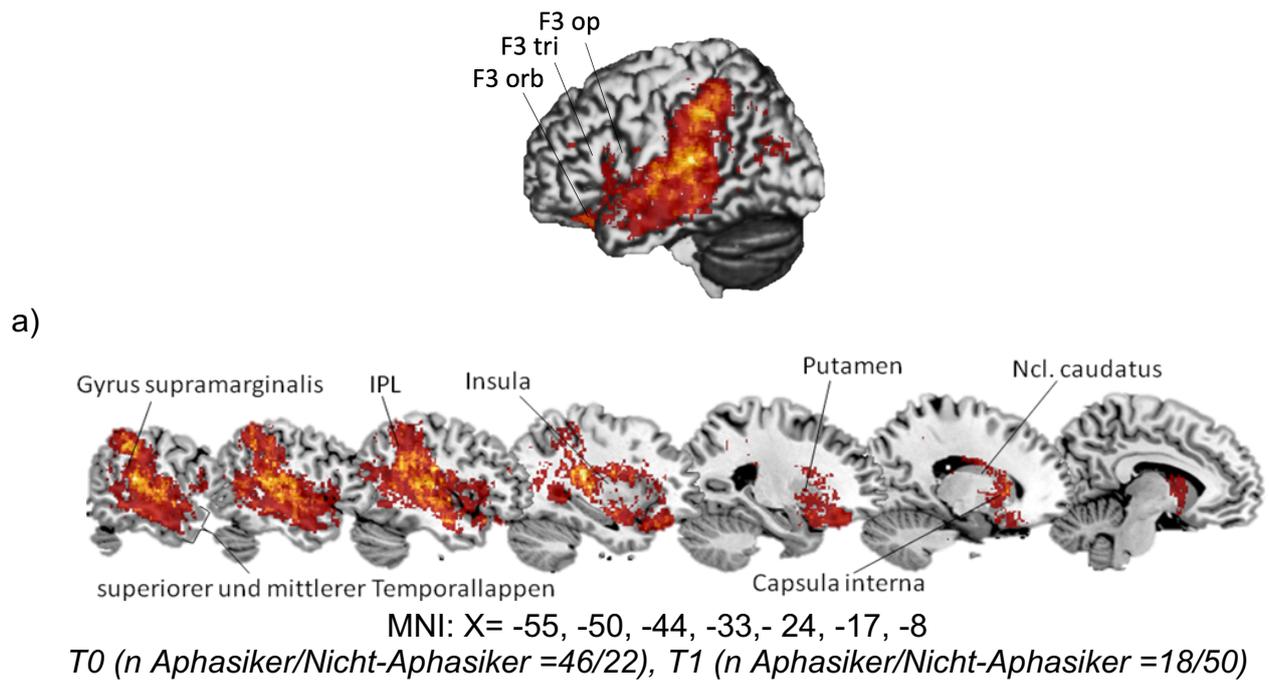
Bezieht man den Faktor der Erholung zwischen T0 und T1 mit in Betracht, so lassen sich hier 3 Gruppen unterteilen: Probanden, welche nie eine Aphasie hatten, Probanden mit anhaltender Aphasie sowie Probanden, welche sich von einer Aphasie erholten (= Recovery). Auch zwischen diesen drei Gruppen konnte kein signifikanter Unterschied in ihrer Endleistung festgestellt werden, dennoch zeigten sie Unterschiede in ihrem Lernzuwachs. Während für PSG kein signifikanter Unterschied im Lernzuwachs zwischen den Gruppen bestand, zeigten die „**Immer-Aphasiker**“ **sowohl im Vergleich zu den „Nie-Aphasikern“ als auch zu den Recovery Probanden einen signifikanten schlechteren Lernzuwachs für FSG** (ttT Immer-A. zu Nie-Aphasikern: $t(37)=2.05$; $p=0.048$; Immer-Aphasiker zu Recovery: $t(43)=2.02$; $p=0.05$). Der Anteil an Perfekten Performern im Kollektiv der Aphasiker betrug zum Zeitpunkt T0 4 Patienten zum Zeitpunkt T1 nur noch einen Patienten. Bei 75% der Perfekt Performer fand somit im Zeitraum zwischen T0 und T1 eine Erholung statt.

3.2.4.2 VLSM: Einfluss des Aphasiestatus

Um zu überprüfen, welche Areale grundsätzlich mit dem **Aphasiestatus** in T1 assoziiert sind, wurde hierfür ein Liebermeister Test (Aphasie ja/nein) durchgeführt. Es fanden sich Regionen des superioren und mittleren Temporallappens, des SMG, des IPL, der F3op/tri/orb, der Insula sowie des Putamens und des Ncl. Caudatus und der anterioren Capsula interna mit einer anhaltenden Aphasie assoziiert. Zudem zeigten sich der wahrscheinliche Verlauf des MdLF, AF/SLF und der EmC betroffen.

Für eine genauere Betrachtung der **Leistung** in den unterschiedlichen Gruppen erfolgte eine Analyse mittels Brunner-Munzel Test. Der Vergleich der Grammatiken zum Zeitpunkt **T0** zeigte für die Gruppe der **Aphasiker** eine Assoziation beider Grammatiken mit dem AF/SLF System. Für **PSG** zeigten sich zudem Läsionen der Capsula interna, des Putamens und des Thalamus. Für **FSG** bestanden Läsionen im Bereich des Gyrus prä- und postcentralis und im IPL sowie dem rolandischen Operculum. Für die Gruppe der **Nicht-Aphasiker** zum Zeitpunkt **T0** konnte, bei kleinerer Gruppengröße, im Brunner-Munzel Test nur eine geringe Anzahl an Datenpunkten für FSG mit einer schlechten Leistung assoziiert werden. Diese fanden sich im Bereich des Gyrus postcentralis. Läsionen für PSG zeigten sich im Bereich des Putamens, der Capsula interna und des Thalamus sowie der posterioren Insula und Capsula extrema und in weiter posterior gelegenen Anteilen der weißen Hirnsubstanz.

Für den Zeitpunkt **T1** zeigen sich für die Gruppe der **Aphasiker** Läsionen für PSG in der F3orb, des frontalen Pols des STGs sowie im Bereich des Gyrus supramarginalis und des IPL signifikant. Für beide Grammatiken fanden sich Läsionen im Bereich des Putamens und des AF, für FSG fanden sich zusätzlich Datenpunkte in der weißen Substanz sowie der Insula. In der Gruppe der **Nicht-Aphasiker** zeigten sich für PSG Voxels im Bereich des Putamens, der Capsula interna, des Ncl. caudatus sowie des Thalamus und der weißen Hirnsubstanz in wahrscheinlichen Verlauf des AF/SLF signifikant. Für FSG hingegen konnten der Gyrus supramarginalis und angularis, der IPL/SPL und Gyrus postcentralis sowie der AF, das Globus pallidum und die Capsula interna assoziiert werden.



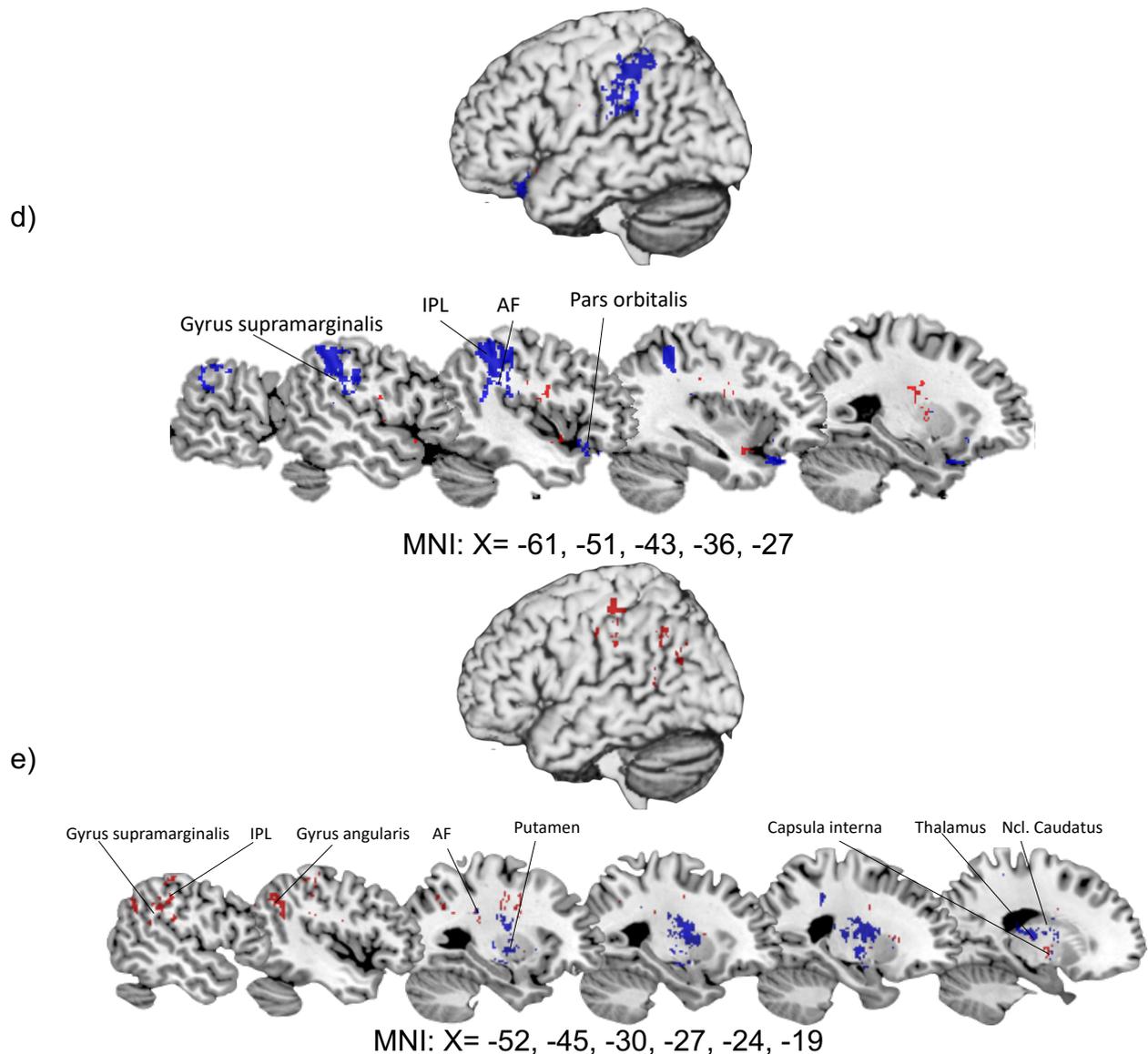


Abbildung 23: Liebermeister Test nach Aphasiestatus (a) und Brunner-Munzel (b-e) der Subgruppen

- Der Liebermeister Test für den Aphasiestatus** zeigt Regionen, welche zum Zeitpunkt T1 (gelbrot) mit den Symptomen einer Aphasie assoziiert waren.
- Für die Gruppe der Aphasiker zum Zeitpunkt T0** zeigen sich Regionen des Gyrus prä-/postcentralis sowie des IPL mit einer schlechten Leistung in FSG verbunden, wohingegen für PSG eher Läsionen des Putamens und gering des Thalamus assoziiert waren.
- Für die Gruppe der Nicht-Aphasiker zu Zeitpunkt T0** zeigt sich lediglich eine Läsion im Gyrus postcentralis mit einer schlechten Leistung in FSG assoziiert. Für PSG stellen sich wie auch für b) Läsionen im Bereich des Putamens und der weißen Hirnmasse dar.
- In der Gruppe der Aphasiker zum Zeitpunkt T1** hingegen ist eine schlechte Leistung in PSG mit Läsionen des IPL und Gyrus supramarginalis sowie in geringerer Form mit dem IFG Pars orbitalis verbunden. Für FSG stellen sich nur wenige Voxel mit Verteilung in der weißen Hirnmasse dar.
- Für die Gruppe der Nicht-Aphasiker zum Zeitpunkt T1** zeigen sich für FSG der Gyrus supramarginalis/angularis sowie der IPL mit einer schlechten Leistung verbunden. Für PSG präsentierten sich hier wieder Voxel im Bereich des Putamens und des Thalamus.

3.2.5 Weitere Einflussfaktoren

Die Untersuchung des **Memory** Effekts erfolgte an insgesamt 53 Probanden, dieser wurde mit einer durchschnittlichen Performanz von P(c) 63,66% und einer Reaktionszeit von 1422,1ms absolviert. Hier konnte kein signifikanter Zuwachs der

Performanz über die drei Runden verzeichnet werden (asymptot. Wilcoxon Test: Delta 2-1: $z=-1.423$; $p=0.155$, $n=46$; Delta 3-2: $z=-1.529$; $p=0.126$; $n=31$). Auch hier wurden unterschiedliche Gruppengrößen durch die abnehmende Zahl an Teilnehmern erreicht, sodass im Verlauf der Analyse die Tests daran angepasst wurden. Die erreichte Performanz unserer Probanden liegt im Durchschnitt somit weit unter den Werten für gesunde Probanden (im Vergleich bei Verwendung des gleichen Paradigmas mit 93,9% für gute Lerner), sodass hier allein durch verminderte kognitive Prozesse von einer verminderten allgemeinen Aufmerksamkeit und einer einhergehenden geringeren Leistung bei den Grammatik-Aufgaben ausgegangen werden kann.

Als weitere Einflussfaktoren wurden hier jeweils das Alter der Probanden sowie das Bildungsalter betrachtet. Auffällig war, dass perfekte Performer sich für beide Parameter zu den übrigen Probanden unterschieden (s. Tabelle 8 unter Abs. 3.1). Das Bildungsalter zeigte sich hier für perfekte Performer signifikant höher, während sie nicht signifikant jünger waren.

Für die weitere Betrachtung dieser Einflussfaktoren mittels Regressionsmodellen verweise ich auf Abs. 5.

4. Diskussion

4.1 Perfekte Erlernbarkeit der Grammatiken bei Probanden mit linkshemisphärischem Schlaganfall

6 Probanden gelang es hier, für FSG und/oder für PSG, eine Performanz mit 100% in Runde 3 oder 4 zu erreichen (s. Abs. 3.1). Interessant ist, dass diese perfekten Performer es schafften, für die jeweils andere Grammatik eine ebenfalls nahezu perfekte Leistung zu erreichen (s. Tabelle 7: Performanz perfekte Performer).

Demnach ist zumindest für einen Teil der Probanden das Erlernen von FSG als auch PSG möglich. Perfekte Performer scheinen also ein Verständnis für beide Grammatiken aufzuweisen, während die restlichen Probanden in FSG und PSG in ihrer Leistung unterschiedlich gut waren. Somit ist anzunehmen, dass diese Probanden über Mechanismen verfügen, welche es ihnen ermöglichen, von der präsentierten Sequenz auf die zugrunde liegenden Regeln zu schließen.

Die jeweiligen geschädigten Hirnareale dieser Probanden sind demnach für das perfekte Erlernen und der Generalisierung einer Grammatik nicht notwendig. Der **Caudatus-Kopf**, welcher allgemein für das implizite Lernen als wichtige Hirnstruktur gesehen wird (Forkstam et al. 2006; Janacsek et al. 2020; Ullman 2004) scheint hier nicht notwendig für das Erlernen der Grammatik zu sein. Auch für einen verminderten Lernfortschritt der Probanden (Delta 3-1, s. Abs. 3.2.2.2.3) konnte hier keine Assoziation zu dem Ncl. Caudatus festgestellt werden. Mehrere Studien, welche das Erlernen einer Grammatik nach Chomsky testeten (Friederici et al. 2006a; Musso et al. 2003; Opitz und Friederici 2003) konnten ebenfalls keine Verbindung mit dem Ncl. Caudatus zeigen. Dieser scheint somit nicht direkt an der Grammatikverarbeitung beteiligt, sondern eher für die Aufgabe des allgemeinen Lernprozesses zuständig zu sein.

Die **anteriore Insula** wird in der Literatur mit der Fähigkeit der Kategorisierung, bzw. der Fähigkeit eine Entscheidung trotz großer Unsicherheit zu treffen, in Verbindung gebracht (Clark et al. 2014; Kim 2014; Levin et al. 2012; Siebenthal et al. 2017). Die Gruppe der perfekten Performer zeigte in Session 1 eine Leistung weit unter Zufallsniveau (s. Tabelle 7: Performanz perfekte Performer). Die Läsion der Insula könnte daher mit den anfänglichen Schwierigkeiten der Probanden mit der Kategorisierung der Stimuli in Session 1, und der Fähigkeit eine Zufalls-Entscheidung zu fällen, zusammenhängen. Diese Beobachtung zeigt zum einen, dass eine perfekte Leistung nicht von der Ausgangslage abhängt. Perfekte Performer zeichnen sich demnach nicht durch einen anfänglichen Wissensvorsprung zu den anderen Probanden aus. Zum anderen zeigt sich, dass die Insula nicht für das Lernen der getesteten Grammatiken notwendig ist, zumindest haben kleine Läsionen keinen Einfluss darauf.

Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass diese Probanden für PSG ein besonderes Antwortverhalten zeigten und nur sehr wenige Antworten abgaben. Dieses zunächst vorsichtige Antwortverhalten zeigten auch andere Probanden und könnte eventuell auch als grundsätzliche Charaktereigenschaft gesehen werden, lieber keine als eine zufällige Antwort zu geben.

Zudem unterscheidet sich diese Gruppe in einigen Punkten ihrer klinischen Parameter signifikant von den restlichen Probanden (s. Tabelle 9). Sie wiesen ein höheres Bildungsalter (18 Jahre zu 12.9 Jahre) sowie kleinere Läsionsvolumina (5.1 ml zu 27.4 ml) auf, und waren, wenn auch nicht signifikant, jünger (55.9 zu 64.4 Jahre). Weitere Untersuchungen konnten ebenfalls einen negativen Einfluss des zunehmenden Probandenalters sowie einen positiven Einfluss des Bildungsalters auf das Lernen zeigen (s. Abs. 5; Modelle S. Kirsch).

4.2 Lernfortschritt aller Probanden

Hier soll nun der Frage nachgegangen werden, ob hier ein Lernerfolg im weiteren Sinn für die übrigen Probanden stattgefunden hat.

Diese Frage kann aufgrund mehrerer gemessenen Parameter bejaht werden. Sowohl das Lerndelta der Performanz (s. 3.2.2.1) als auch das der Reaktionszeit (s. 3.2.2.1.1) zeigten hier einen signifikanten Unterschied und verweisen daher auf einen Lernprozess. Auch die Fähigkeit der Generalisierung war hier mit signifikantem Delta 1 zu 4 für beide Grammatiken gegeben (s. Tabelle 15). **Somit ist es auch Probanden mit linkshemisphärischem Schlaganfall grundsätzlich möglich, neue syntaktische Regeln zu erlernen.** In der Fähigkeit, nach erfolgter Abstraktion der Regel einen anhaltenden Lernfortschritt zu zeigen, gab es jedoch Unterschiede zwischen den Grammatiken. Während es den Probanden für PSG gelang, ihre Leistung in Runde 4 aufrecht zu erhalten und sogar noch zu verbessern, gelang das für FSG nicht (s. Tabelle 15). **Demnach scheint ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Grammatiken in der erfolgreichen und effizienten Anwendung des Regelwerks auf neues Vokabular zu liegen.** Der Vergleich der beiden Grammatiken miteinander zeigte trotz der unterschiedlichen Tendenzen in Session 4 keine signifikanten Unterschiede in den Mittelwerten der einzelnen Runden.

Ein Lernfortschritt konnte also bei den Probanden hier festgestellt werden, dennoch zeigten die hier getesteten Probanden eine deutlich schwächere Performanz, als es in der Literatur beim Erlernen von AGL Paradigmen bei gesunden Probanden bisher beschrieben wurde (s. hierzu auch Opitz und Friederici 2003; Petersson et al. 2012; Wagner 2016). In Allgemeinen wird ein Abschneiden signifikant über Zufallsniveau als Beleg für das erfolgreiche Lernen einer Regel angesehen (Folia und Petersson 2014). Diese Experimente wurden jedoch größtenteils an gesunden Probanden

vorgenommen, sodass hier nicht von einer vollständigen Übertragung der Ergebnisse ausgegangen werden kann. Dennoch würde man klassischerweise Probanden mit einer 100% Performanz einen Lernerfolg akkreditieren, wohingegen man bei einer Performanz von 50% klassischerweise nur von einem Zufallsergebnis ausgehen würde.

Bereits in Session 1 zeigten die Probanden Probleme in der Kategorisierung der Silben, welche sich in einer deutlich unter Zufallsniveau liegenden Leistung äußerte. Probanden mit einer schlechten Leistung in Session 1 (Liebermeister Test für den Vergleich von Probanden unter Chance und über Chance, s. Abbildung 16) zeigten Läsionen in Bereichen des **Ncl. caudatus** und der Capsula interna für PSG sowie für beide Grammatiken innerhalb des SLF/AF assoziiert. Die Leistung der perfekten Performer lag in Session 1 ebenfalls unter Zufallsniveau und diese zeigten auch eine Läsion des Ncl. Caudatus. Dies kann als zusätzlicher Beleg für dessen wichtige Rolle bei der Kategorisierung angesehen werden.

Auch in Session 3, in der das Maximum des Lernprozesses liegen sollte, konnten die Probanden für beide Grammatiken lediglich eine Leistung knapp oberhalb des Zufallsniveaus erreichen. Für Session 4 konnte die Performanz nur für PSG mit 62.45% nochmals gesteigert werden. Erwartungsgemäß würden die Probanden, wenn sie schlicht raten würden, wie oben erwähnt auf Zufallsniveau kommen, wenn sie einen Teil der Regel verstanden hätten, sollten sie mathematisch gesehen auf Werte um die 75% kommen. Somit liegt hier für den Durchschnitt der Probanden schon per se kein gutes Ergebnis vor. Welchen Aspekt der Regel die Probanden nun tatsächlich lernten, bleibt somit offen.

Einschränkend sei hier jedoch erwähnt, dass die zum Teil geringe Antwortabgabe durch die Probanden hier ebenfalls einen negativen Effekt auf die erreichte Leistung hat. Auch in der Reaktionszeiten der beiden Grammatiken zeigten sich die Probanden dieser Studie deutlich langsamer als dies in einem analog durchgeführten Test für gesunde, junge Probanden der Fall war (Dissertation Stocker, noch nicht veröffentlicht). Diese Feststellung ist jedoch, auch in Bezug auf das höhere Probandenalter hier nicht verwunderlich. Zudem konnten (Gerritsen et al. 2003) für den Vergleich von links- und rechtshemisphärischen Schlaganfallpatienten in der subakuten Phase mit gesunden Kontrollen zeigen, dass linkshemisphärische Probanden

insbesondere in komplexen Kategorisierungsaufgaben eine längere Zeit zum Treffen einer Entscheidung benötigten als die gesunde Kontrollgruppe.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass es hier kein binäres Lernen oder Nicht-Lernen in den hier getesteten Probanden gibt, sondern sich die Probanden in ihrem Lernerfolg eher auf einem Kontinuum bewegen. Dennoch erscheint das Lernen hier in unterschiedlichem Maß für die Probanden erschwert, was auf eine komplexere Verarbeitung von Syntax mit mehreren Subkomponenten schließen lässt. Die hier gezeigten Beobachtungen stützen somit die Hypothese eines umfassenden Netzwerks, welches an unterschiedlichen Punkten beeinträchtigt sein kann. Hierfür spricht sowohl die großflächige Ausdehnung der Läsionen im Gesamtüberlap (s. Abbildung 6) als auch die eher diffus verteilten Läsionen über das gesamte Netzwerk in der VLSM.

Der zeitliche Abstand des Testdatums zu dem Schlaganfalldatum betrug hier im Mittel 2.1 Jahre, sodass hier von einem stabilen Bild der Testleistung der Probanden ausgegangen werden kann. Eine Veränderung durch eine weitere neuronale Plastizität ist somit unwahrscheinlich. Zudem zeigten sich die Läsionen nicht auf Regionen, welche in der Literatur allgemein als sprachspezifisch anerkannt sind, begrenzt.

4.3 Verhaltensauffälligkeiten der linkshemisphärischen Patienten

In dieser Studie wurden einige Verhaltensauffälligkeiten bei den getesteten Patienten festgestellt, die nicht bei Testungen von gesunden Probanden beschrieben sind. Auch bei Studien mit Patienten wurden solche Auffälligkeiten nicht berichtet. In den folgenden Abschnitten möchte ich die möglichen Gründe und die anatomischen Korrelate der verschiedenen Verhaltensauffälligkeiten der linkshemisphärischen Patienten diskutieren. Ebenso soll darauf eingegangen werden, in wie weit diese Verhaltensauffälligkeit mit der Erlernbarkeit der Grammatiken oder maximalen Leistung korrelieren.

4.3.1 Die Verwendung von nur einer Taste

Für die Verwendung von nur einer statt beider Tasten können theoretisch mehrere Gründe vorliegen. Die naheliegendste Überlegung wäre die der motorischen Lähmung oder zumindest einer motorischen Einschränkung der verwendeten Hand. Da es den

Probanden allerdings freistand, welche Hand sie zur Beantwortung der Frage verwendeten, erscheint dies recht unwahrscheinlich. Zudem konnte keine Läsion in typischen motorischen Arealen oder der Capsula interna mit einer einseitigen Tastenverwendung assoziiert werden. Hier scheinen eher diffuse kognitive Störungen ursächlich für das gezeigte Verhalten zu sein. Der Liebermeister Test konnte die Verwendung von nur einer Taste nicht mit einer spezifischen Läsion verknüpfen, sondern zeigte weit verteilte, diffus angeordnete kleine Läsionen. Zudem wurden andere Defizite (wie das Delta 3-1 und 4-3) ebenfalls mit den gezeigten Regionen assoziiert.

Hierdurch könnte in einem Netzwerkansatz eine Störung der Faserverbindungen relevanter Hirnareale für höhere kognitive Funktionen und somit eine Störung der funktionellen Konnektivität vermutet werden. Diese Störung kann durchaus gering ausfallen, in den hier gemessenen klinischen Parametern unterschieden sich die Probanden mit einseitiger Tastennutzung nicht signifikant von den restlichen Probanden. In einigen Tests (Corsi, Token Test T0) konnten Probanden mit einseitiger Tastenverwendung sogar bessere Ergebnisse erzielen, als Probanden mit beidseitiger Nutzung.

Auch anatomisch gesehen konnte kein Hinweis für eine unterschiedliche oder selektive Läsion für einseitig drückende Probanden gefunden werden. Stattdessen zeigten Probanden mit *beidseitiger* Tastennutzung eine deutlich größere Läsion mit einer Beteiligung des IFG, welche nur für diese Gruppe bestand. Einschränkend sei erwähnt, dass für den Beweis dieser Hypothese und den Nachweis kognitiver Beeinträchtigungen zusätzliche Tests (bspw. Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung, kurz TAP) und Methoden (wie das resting state fMRI) benötigt werden. Das gezeigte Verhalten der Probanden mit der Verwendung von lediglich einer Taste und der teilweise fehlenden Beantwortung von Silben stellt somit ein eindeutig pathologisches Verhaltensmuster dar. Diese Art des Antwortverhaltens konnte in Studien mit gesunden Probanden so nicht gezeigt werden (Wagner 2016). Zudem konnten Riege und Kollegen in einer nicht-verbalen Erkennungsaufgabe zeigen, dass linkshemisphärische Patienten insgesamt zu weniger Einschätzungen in ihrem Experiment kamen (sowohl weniger falsche als auch weniger korrekte Einschätzungen) und damit einen höheren negativen decision bias aufwiesen, als gesunde Probanden (Riege et al. 1982). Demnach wäre es hier denkbar, dass Probanden allein aufgrund ihres negativen

decision bias weniger Antworten abgeben als gesunde Probanden. Dieses Verhalten zeigte hier aber große individuelle Unterschiede, wie an der Gruppe der zu oft drückenden Probanden als auch der perfekten Performer zu sehen ist.

4.3.2 Keine Antwortabgabe in Session 1

Die Abgabe keiner Antwort in der ersten Runde scheint eher mit Defiziten des Gedächtnisses sowie Defiziten in der Überwachung und Selektion intentionaler Handlungen zusammenzuhängen. Der Lieberman-Test (s. Abbildung 16) assoziierte dieses Verhalten für beide Grammatiken, mit jedoch größeren Anteilen für PSG, mit Läsionen des Precuneus und des Hippocampus. Während der Hippocampus in der Literatur eher mit der initialen Gedächtnisbildung und der schnellen Speicherung von Inhalten verbunden ist (Squire und Zola-Morgan 1991), wird dem Precuneus eine Rolle in der Verarbeitung von episodischem Langzeitgedächtnis sowie bei dem visuospatialen Gedächtnis zugeschrieben (Brodt et al. 2016; Cavanna und Trimble 2006; Fletcher et al. 1995). Auch Opitz und Friederici konnten eine Aktivität des Hippocampus zu Beginn der Lernphase feststellen, welche im Verlauf abnahm (Opitz und Friederici 2003). In Verbindung mit dem vPMC sahen sie das ähnlichkeitsbasierte Lernen verbunden, welches besonders zu Beginn des Lernens vorherrschend sei (Opitz und Friederici 2007; Opitz und Hofmann 2015). Brodt et al. (2016) konnten zeigen, dass nicht nur der Hippocampus, sondern auch der Precuneus bereits in der initialen Lernphase aktiviert werden. Somit könnte die anfängliche Schwierigkeit der Probanden, hier eine Entscheidung zu treffen, auf eine gestörte Fähigkeit auf Gedächtnisinhalte zuzugreifen und eine Behinderung des visuospatialen Lernprozesses, zurückzuführen sein.

Zudem konnten Läsionen des anterioren Cingulums, des medialen Gyrus frontalis superior sowie der SMA mit PSG assoziiert werden. Das anteriore Cingulum wird laut Botvinick und Kollegen (2001) für die Überwachung der Handlungssteuerung und zur Registrierung von Konflikten benötigt. Ebenso soll der dorsolaterale präfrontale Cortex der kognitiven Kontrolle und der Aufrechterhaltung von Prozessen für das Erreichen von Zielen zuständig sein (Kane und Engle 2002; Miller und Cohen 2001). Beide Regionen konnten eine Aktivität beim sogenannten „Stroop-task“ zeigen (Botvinick et al. 2001; MacDonald et al. 2000), bei dem Farbwörter in jeweils nicht dazu passenden

Farben dargestellt werden. Volz et al. (2005) konnten einen Zusammenhang der BA 8 mit dem Gefühl der Unsicherheit einhergehend mit der Entscheidungsfindung zeigen. Insgesamt kann hier eine Störung von Prozessen, welche für das Erreichen eines Handlungsziels nötig wären, vermutet werden. Die SMA ergänzt dieses Bild, ihr wird eine wichtige Rolle bei intentionalen Handlungen zugeschrieben. Sowohl Elsner und Kollegen (2002) als auch Melcher et al (2008) konnten in einem auditorischen Experiment bei einer erfolgreichen Integration eine Verbindung zwischen der SMA und dem Hippocampus zeigen.

Für FSG konnten zudem Läsionen im Bereich der Capsula interna festgestellt werden.

Obwohl diese Läsionen zwar mit einer Besonderheit in der Antwortabgabe der Ausgangssituation verbunden sind, beeinflussen diese nicht das hier geprüfte Erlernen der Grammatiken. Alle Probanden mit einer 0-Runde in Session 1 zeigten eine Zunahme der Antwortabgabe, die resultierende Performanz in den weiteren Runden zeigte dabei ein ähnlich breites Spektrum wie das der restlichen Probanden. Tatsächlich erzielten sogar 2 Probanden im Verlauf eine perfekte Leistung, sodass bei diesen Probanden sogar, wie oben bereits beschrieben, eine abwartende Strategie vermutet werden könnte.

4.3.3 Überhöhte Antwortabgabe

Für Probanden mit überhöhter Antwortabgabe konnten für beide Grammatiken Läsionen im Bereich des IPL und SPL sowie des mittleren/superioren okzipitalen Gyrus und Gyrus postcentralis damit assoziiert werden. Mehrere Studien verweisen hier auf die Rolle des IPL im Bereich der visuospatialen Handlungsplanung (Rubia et al. 2001; Rushworth et al. 1997) auch im Rahmen der inhibitorischer Kontrollprozesse (Nakata et al. 2008). Nakata et al. (2008) konnten an gesunden Probanden ein modalitätsübergreifendes bilaterales Netzwerk für inhibitorische Prozesse aufzeigen, welches den dorsolateralen und ventrolateralen präfrontalen Cortex als auch die prä-SMA, den IPL, Insula und anteriorem cingulärem Cortex beinhaltet. Obwohl diese Regionen alle an inhibitorischen Antwortprozessen beteiligt sind, variieren sie in ihrer Aktivität je nach Modalität (ebd.). Rubia verwies auf die Rolle des IPL bei der visuospatialen Handlungsplanung und vermutet hier eine linkshemisphärische

Dominanz des IPL, insbesondere im Rahmen der Antwortauswahl unter der Einbeziehung visueller Hinweise (Rubia et al. 2001). Rushworth assoziiert die Rolle des linken IPL insbesondere bei einer Umorientierung einer erwarteten motorischen Aktion („disengagement“) (Rushworth et al. 1997). Eine Aktivität des Gyrus okzipitalis medialis sowie des IPL und postcentralen Regionen wurde für die Handlungsplanung und den Gebrauch von Hilfsmitteln gezeigt (Brandi et al. 2014). Eine klinisch nicht unbedingt manifeste Störung dieser Areale könnte demnach durchaus die überhöhte Antwortabgabe der Probanden erklären.

Hier kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Läsionen das Lernen durchaus beeinflussen. Das Lerndelta dieser Gruppe lag für beide Grammatiken, wenn auch statistisch nicht signifikant, unterhalb des allgemeinen Durchschnitts. Zudem konnten Läsionen des IPL ebenfalls mit einem schlechten Lernzuwachs und einer schlechten Generalisierung (s. Abbildung 18 BM Delta 3-1, Abbildung 19 Liebermeister Delta 4-3) assoziiert werden.

4.4 Einfluss des Grammatiktyps auf die Erlernbarkeit der Regeln

Der Vergleich der beiden Grammatiken miteinander zeigte *keine* signifikanten Unterschiede in der Performanz in keiner der Sessions für die Subgruppe bis Session 4. Der Verlauf der Lernkurven zeigte sich für Probanden, welche sowohl FSG als auch PSG bis mindestens Session 3 absolvierten, ebenfalls annähernd parallel mit nur einem gering signifikanten Unterschied in ihrer Ausgangsleistung mit leichtem Vorteil für PSG, sodass die Einordnung von PSG bereits initial einfacher zu sein schien. Demnach könnte vermutet werden, dass das vorrangige Absolvieren von FSG vor PSG zu einem zusätzlichen Erkenntnisgewinn bei einigen Probanden geführt hat. Hierdurch gelang ihnen zwar ein besserer Einstieg in die Aufgabe, eine bessere Leistung für Session 3 konnte dadurch dennoch nicht erzielt werden. Für FSG und PSG konnten im Vergleich letztendlich ähnliche Performanz-Werte erreicht werden (55,7% für PSG zu 56,3% in FSG).

Für die Reaktionszeit konnte ein ähnlicher Effekt nachgewiesen werden. Während PSG absolut gesehen eine schnellere Reaktionszeit aufwies, konnte für das Delta 3-1 kein Unterschied festgestellt werden. Übertragen werden könnte dies auf eine höhere Sicherheit der Patienten in der Beantwortung der Silben für PSG, welche sich bereits in Runde 1 zeigt. Da Probanden in PSG mit der Art der Aufgabe bereits vertrauter waren, konnten sie demnach bereits in Runde 1 zügiger zu einer Entscheidung kommen.

Somit starten sie zwar in einer besseren Ausgangslage, benötigen jedoch für die Verbesserung mehr Runden, als für FSG. Während Probanden in FSG scheinbar schon ab Runde 2 zu einer verbesserten Sicherheit bezüglich ihrer Antworten kamen, dauerte es für PSG trotz besserer Ausgangslage bis Session 3. Hier ließe sich vermuten, dass das Auffinden der hier zugrunde liegenden Regel aufgrund ihrer höheren Komplexität für die Probanden mehr Zeit in Anspruch nimmt, sie somit also mehrere Runde benötigen, als für FSG. Sowohl für PSG als auch für FSG ist die Beantwortung korrekter Silben als richtig signifikant schneller, als die Einordnung korrekter Silben als falsche, welche somit ebenfalls mit einer größeren Unsicherheit hinsichtlich der Einordnung einhergingen.

Die höhere Komplexität für die eingebettete Grammatik konnte hier nur durch die leicht erhöhte Fehlerrate für **PSG** gezeigt werden. Dies ergänzt damit die Ergebnisse von (Friederici et al. 2006a), welche ebenfalls sowohl für die Lernphase als auch für die Testphase eine leicht erhöhte Fehlerrate in PSG berichten.

Für beide Grammatiken konnte die Fähigkeit, das erlernte Wissen auf ein neues Vokabular anzuwenden, nachgewiesen werden (signifikantes Delta 4-1, s. Tabelle 15). Somit lässt sich hier kein Einfluss des Grammatiktyps auf die Performanz ableiten.

Lediglich in der weiteren effizienten Anwendung der Regeln nach Abschluss der eigentlichen Lernphase (Delta 4-3, s. Tabelle 15), welche mit einem weiteren Lernanstieg verbunden ist, konnten Unterschiede festgestellt werden.

Eine Studie von Westphal et al konnte zeigen, dass gesunden Probanden eine Generalisierung sowohl für FSG als auch für PSG für kürzere Sequenzen problemlos gelang und sich die Generalisierung nur für längere Sequenzen als die Trainingssequenzen zwischen FSG und PSG unterschied (Westphal-Fitch et al. 2018). Hierbei zeigte sich allerdings die Generalisierung für die *mirror grammar*, wobei AnBn hiervon eine Sonderform darstellt, im Gegensatz zu FSG eingeschränkt.

Auch unter Verwendung des gleichen Paradigmas dieser Studie an gesunden Probanden konnte eine gute Generalisierung für beide Grammatiken nachgewiesen werden. Sowohl für erfolgreiche als auch für schwache Lerner konnte die Leistung der Probanden von Session 3 auf 4 gehalten werden (Stocker noch nicht veröffentlicht; Wagner 2016). Gesunde Menschen scheinen somit im Allgemeinen kein Problem mit der Abstraktion und der erfolgreichen Anwendung der Regel auf neues Vokabular

aufzuweisen. Die Probanden dieser Studie mit einer linkshemisphärischen Schädigung wiesen hierbei jedoch Probleme für lineare Abhängigkeiten auf.

In der Literatur wird eine Aktivierung des Broca Areals selektiv für die Verarbeitung hierarchischer, nicht benachbarter Abhängigkeiten beschrieben, wobei dies sowohl für das explizite (Bahlmann et al. 2008; Friederici et al. 2006a; Makuuchi et al. 2009) als auch für implizites Lernen (Uddén et al. 2017) gezeigt werden konnte. Insbesondere die BA 44, genauer der inferiore Anteil der Pars opercularis, wird hier des Öfteren als Kernregion für die Verarbeitung syntaktischer Komplexität angesehen (Friederici 2011; Friederici et al. 2006b; Zaccarella und Friederici 2017). Entgegen dieser Vermutung konnte hier eine Beteiligung des **IFG** für das Lerndelta von Runde 1 auf 3 für **beide** Grammatiken gezeigt werden. Demnach hing nicht die absolute Endleistung, wohl aber der Lernprozess an sich mit Läsionen im Bereich des IFG, hier der Pars triangularis und Pars opercularis, zusammen. Auch für die Fähigkeit, die bereits abstrahierte Regel effizient einzusetzen, und somit einen anhaltenden Lernprozess aufzuweisen, konnte eine Beteiligung der BA 44 und 45 für beide Grammatiken gezeigt werden.

Trotz fehlender signifikanter Unterschiede in der Performanz der beiden Grammatiken konnten anatomisch unterschiedliche Muster identifiziert werden. Diese zeigten sich sowohl für den Lernzuwachs (BM Delta 3-1, s. Abbildung 18) die maximale Performanz (BM Session 3, s. Abbildung 17) als auch für die Generalisierung (Liebermeister Delta 4-3, s. Abbildung 19).

Die neuroanatomischen Unterschiede, welche sich hier im Lernen der beiden Grammatiken zeigten, sind vermutlich eher aufgrund unterschiedlicher Strategien bedingt.

Für **FSG** ließe sich hier am ehesten eine phonologisch geprägte Strategie vermuten. Der Brunner-Munzel Test (s. Abbildung 18) war hier mit einer Beteiligung des **Gyrus angularis** und des **STGs** sowie der anterioren **Insula** assoziiert. Eine Beteiligung des Gyrus angularis konnte für eine Vielzahl an Prozessen gezeigt werden, unter anderem in der semantischen Verarbeitung, dem Lesen von Wörtern oder dem Abruf von Memory (Bonner et al. 2013; Stoeckel et al. 2009). Dies wurde von Seghier als Integrationsort gesehen, welcher u.a. äußeren Reizen Sinn geben oder bei der Reorientierung von Aufmerksamkeit auf eine relevante Information aktiviert werden soll (Seghier 2013). Demnach geht eine Schädigung dieser Areale mit einer Störung des

phonologischen Anteils des working memorys, welches für den Lernprozess neuer Wörter ebenfalls wichtig ist, sowie des Integrationsortes einher.

Zudem konnte der Permutationsfehler für FSG leichter **erkannt** werden, als Scramblingfehler. Für PSG konnte dies nicht gezeigt werden, hier waren Scrambling- und Permutationsfehler gleich schwer zu erkennen. Nachdem dieser Trend für FSG bereits in Runde 1 existiert, wenn auch zunächst nicht signifikant, so kann dennoch vermutet werden, dass diese bessere Einschätzung von Permutationsfehlern bereits intuitiv erfolgt. Für die **gemachten** Fehler konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Fehlertypen Permutation und Scrambling gezeigt werden

Somit lässt sich vermuten, dass Permutationsfehler in FSG zu einer größeren Diskonkordanz führen, als der Tausch zweier benachbarter Silben wie es für Scrambling der Fall wäre, und demnach als Fehler ersichtlicher waren. Auch hier könnte die Phonologie von Bedeutung sein, da für den Permutationsfehler in FSG die Vokale getauscht wurden. Somit wäre es möglich, dass die fehlende Konkordanz der adjazenten Vokale für die Probanden leichter aufzudecken war, als die der Konsonanten. In PSG könnte diese Art des Fehlers daher durch die ohnehin schon komplexere Struktur ggfs. für die Probanden subtiler ausfallen.

Für **PSG** hingegen scheint eine visuelle Strategie vorstellbar. Der Brunner-Munzel Test zeigte Läsionen im Bereich des Gyrus occipitalis inferior und der V5. Beide Areale werden in der Literatur mit der Wahrnehmung und Integration von Bewegungen in Verbindung gebracht (Büchel et al. 1998; Scheef et al. 2009).

Für das **Delta der Runden 4-3** scheinen hingegen für die beiden Grammatiken komplett unterschiedliche Mechanismen vorzuliegen.

Während Läsionen des AF hier mit einer generell schlechten Performanz (s. Abbildung 17, BM S3) einherzugehen scheinen, sind für den Lernprozess in **FSG** als solchen jedoch zudem Läsionen im Bereich des MdLF und der EmC relevant (s. Abbildung 18 BM Delta 3-1). Ebenso für die weitere effiziente Anwendung der Regel, nachdem diese erkannt und abstrahiert wurde, scheinen diese Strukturen von Bedeutung zu sein (s. Abbildung 19, BM Delta 4-3). Die superiore F3 tri, welche allgemein mit dem verbalen WM verknüpft wird (Makuuchi et al. 2009), ist hier ebenfalls mit FSG assoziiert (BM Delta 4-3). Makuuchi et al (2009) konnten eine beinahe identische Aktivierung des

linken IFS mit zunehmender Distanz zwischen Subjekt und zugehörigem Verb zeigen. Die Beteiligung der BA 44/ posterioren BA 45 für FSG würde zudem für eine Beteiligung des dorsalen Trakts an der Verarbeitung von FSG sprechen und somit die Auffassung Griffiths bestätigen, wonach die Integrität beider Fasertrakte für die korrekte Verarbeitung von Syntax essentiell ist (Griffiths et al. 2013).

Die Beteiligung einer ausgedehnten Läsion des anterioren temporalen Pols konnte außerdem für FSG nachgewiesen werden. Dieser wird in der Literatur mit der Funktion des semantischen Memorys in Verbindung gebracht (Patterson et al. 2007). Tsapkini et al (2011) konnten jedoch zeigen, dass die alleinige unilaterale Schädigung des anterioren temporalen Pols für Probanden mit akutem Schlaganfall nicht ausreichend ist, um signifikante klinische Defizite in Bezug auf das Benennen von Objekten und dem Wortverständnis zu verursachen. Das Läsionsvolumen war hier der einzig signifikante Prädiktor. Diese Ergebnisse stützen die Theorie des anterioren temporalen Pols als semantischen Speicher und als Teil eines größeren Netzwerkes. Es wird angenommen, dass dieses Netzwerk, bezogen auf das Benennen und das Verständnis von Objekten, aus den bilateralen anterioren temporalen Polen, dem anterioren STG, MTG/STS, ITG, und dem anterioren Gyrus fusiformis besteht (Tsapkini et al. 2011). Verbindungen zu Arealen des IFG und posterioren temporoparietalen Arealen sollen der semantischen Kontrolle dienen (Noonan et al. 2010).

Auch hier konnten zu den anterioren temporalen Läsionen weitere posterior gelegene Bereiche, welche den temporoparietalen Arealen (*hier*: BA 39, 37, 20-22) des o.g. Netzwerkes entsprechen, gefunden werden. Daher scheint es für FSG wichtig, dass eine Anerkennung der Silben in ihrer semantischen Bedeutung und eine Übernahme derer in den eigenen Wortschatz stattgefunden hat. Hier könnte vermutet werden, dass dadurch die Wörter und deren zugrunde liegendes Regelwerk gleichzeitig integriert werden.

Für das Benennen sowie das Verständnis von Aktionen und Handlungen scheint ein nur teilweise überlappendes Netzwerk mit einer Beteiligung der BA 44 und 45 und des posterioren frontalen Cortex in Zusammenhang mit dem posterioren MTG/STS und des Gyrus supramarginalis zuständig (Kemmerer et al. 2012). Während hier die Areale, welche mit der semantischen Verarbeitung von Objekten verknüpft sind, eher mit FSG einhergehen, zeigten sich die Areale für die Verarbeitung von Handlungen zwar für beide Grammatiken, allerdings stärker mit PSG assoziiert. Diese Beobachtung passt

daher ebenfalls zu der für den Lernprozess (Delta 3-1) bereits genannten, optisch geprägten Strategie für PSG.

Mit einer schlechten Leistung in **PSG** für Session 3 scheinen abgesehen von Läsionen des Putamen und des Thalamus, Faserverbindungen der weißen Substanz von Bedeutung zu sein. Umarova und Kollegen konnten ein Netzwerk für visuospatiale Aufmerksamkeit identifizieren (Umarova et al. 2010). Es konnte eine Verbindung zwischen der Pars opercularis und dem posterioren STG mittels des AF/SLF III als Teil einer dorsalen Verbindung gezeigt werden. Ebenso beobachteten sie eine Verbindung der Pars triangularis und der anterioren Insula mit temporoparietalen Regionen (dem IPS, dem SMG, STG und der V5) über die EmC als Teil einer ventralen Verbindung. Diese Verbindungen konnten sowohl in Affen (Petrides und Pandya 2009) als auch mittels DTI in Menschen nachvollzogen werden (Makris und Pandya 2009; Vry et al. 2012). Angesichts der hier zudem bestehenden Läsionen des IPLs und des posterioren MTG/STGs könnte hier eine Verbindung sowohl durch den AF als auch durch die EmC vermutet werden. Diese Läsionen zeigen sich größtenteils auch für das Delta 4-3. Läsionen der anterioren Insula und des rolandischen Operculums stützen hier die Hypothese einer ventralen Verbindung über die EmC.

Für das erfolgreiche Weiterlernen und die weitere effiziente Anwendung der Regel werden jedoch noch weitere Areale benötigt. Läsionen der inferioren Pars triangularis waren hier mit einer schlechten Leistung für das Delta 4-3 assoziiert. Eine Aktivierung der inferioren pars triangularis und opercularis konnten auch Musso et al sowohl für das Erlernen natürlicher Sprache als auch für die Verarbeitung von Musik zeigen (Musso et al. 2003; 2015). Die inferioren Anteile der Pars triangularis konnten zudem als Knotenpunkt für die Verarbeitung von Syntax identifiziert werden (Moro et al. 2001). Demnach scheint es, dass für die weitere Anwendung der Regel und ihrer effizienten Anwendung ein Netzwerk benötigt wird, welches in der Literatur allgemein als Kern der syntaktischen Verarbeitung angesehen wird (Friederici 2011). Hier zeigten sich sowohl der dorsale Trakt mit direkten Läsionen im Bereich des AF, als auch der ventrale Trakt durch die Beteiligung der kortikalen Areale indirekt, betroffen. Die EmC war hier zwar nicht direkt betroffen, jedoch kann die Schädigung der inferioren F3tri und der Insula in Verbindung mit Läsionen des posterioren MTG hier Hinweise auf die essentielle Rolle des ventralen Trakts geben (Makris und Pandya 2009). Somit führt eine Läsion des

Grammatiknetzwerks auch zu großen Problemen im Weiterlernen der Grammatikregeln.

Folgt man dem Vorschlag Friedericis, so sollte eine bevorzugte Beteiligung von BA 44 bei der Verarbeitung von AG Stimuli erfolgen, also eine Verarbeitung von syntaktischen Stimuli unabhängig von der Semantik, wohingegen die BA 45 eher in der Verarbeitung von semantischen Prozessen beteiligt wäre (Friederici 2009). Diese Unterteilung ließ sich hier nicht bestätigen, da in dieser Studie trotz der Verwendung eines AGL Paradigmas unter Ausschluss semantischer Informationen eine Schädigung sowohl der BA 44 (Pars opercularis) als auch der BA 45 (Pars triangularis) mit einer signifikant schlechteren Lernleistung einherging. Die Aktivierung des Broca Areals konnte jedoch durch Uddén auch für die Verarbeitung benachbarter Abhängigkeiten gezeigt werden (Uddén et al. 2008). Zudem konnten (Ben-Shachar et al. 2004; Santi und Grodzinsky 2010; Snijders et al. 2009) eine Beteiligung der BA45 in der Verarbeitung von hierarchischen Prozessen zeigen. In Zusammenhang mit den hier dargestellten Ergebnissen spricht die gefundene Beteiligung des IFGs an den Läsionen von FSG und PSG für eine Verarbeitung von Syntax allgemein innerhalb des Broca Areals, unabhängig von deren Abhängigkeiten. Obwohl in o.g. Studien eine Verzerrung des Ergebnisses durch die Beteiligung einer semantischen Komponente möglich wäre (s. hierzu (Friederici 2011, „Shift“ in IFG), welche die Beteiligung der BA 45 wiederum erklären würde, so ist dies jedoch unwahrscheinlich. Musso et al. (2015) fanden ebenfalls eine Aktivierung der BA 45 in der Verarbeitung von Musik. Da diese Verarbeitung frei von Semantik ist, und das hier verwendete Paradigma ebenfalls keine Hinweise auf semantische Inhalte zuließ, ist diese Art der Interpretation der Ergebnisse zumindest in dem hier vorliegenden Fall als nicht sinnvoll anzusehen.

4.5 Einfluss spezifischer Hirnregionen

Während der IFG sich als nicht notwendig zeigte, um eine syntaktische Regel zu verarbeiten (siehe Abbildung 17 für Session 3), zeigte er sich aber essentiell um einen guten Lerneffekt zu erzielen (siehe Abbildung 18 für das Delta 3-1). Es zeigten sich jedoch zusätzliche Areale, abgesehen von dem Broca Areal, welche das Erlernen einer neuen Regel erschwerten. Läsionen, welche hier sowohl das Lernen an sich (Delta 3-1) als auch die Endleistung in S3 beeinflussten, waren hier der posteriore STG/STS, der Gyrus supramarginalis und der IPL sowie postcentrale Regionen. In der weißen

Hirnsubstanz zeigten sich beide Male Bereiche des AF beteiligt. Auch in der Literatur wird die Integrität des AF und des posterioren STG als essentieller Teil des Netzwerks für die Verarbeitung von Syntax gesehen (Friederici 2011; Griffiths et al. 2013; Rolheiser et al. 2011). Diese Regionen können daher als notwendig für das Erlernen in beiden Grammatiken gesehen werden. Der posteriore STG wird hauptsächlich mit der Zuordnung thematischer Rollen sowie der Integration syntaktischer und semantischer Informationen zum Sprachverständnis in Verbindung gebracht (Friederici et al. 2006a; 2010; Friederici 2009). Somit scheint nicht das IFG allein, sondern zudem das dorsale Fasensystem, für den Erwerb von Syntax entscheidend zu sein, und bestätigt somit dessen Rolle.

Die Generalisierung (Liebermeister 4-3) zeigte sich hier ebenfalls beeinträchtigt durch Läsionen des IPL, Gyrus angularis und des posterioren MTG/STS sowie deren Verbindung mittels MdLF (Makris und Pandya 2009) und SLF/AF (Catani et al. 2005; Musso et al. 2015; Umarova et al. 2010). Der Gyrus angularis und die Verbindung mit posterioren temporalen Regionen wird phylogenetisch als jüngere Region angesehen (Catani und Bambini 2014). Diese scheinen zwar im Menschen, nicht jedoch in Affen, besonders ausgeprägt zu sein und werden mit einer höheren kontextbezogenen Integration in Zusammenhang gebracht. Auch für die Verbindung des MdLF scheinen deutliche Unterschiede zu der bei Affen zu bestehen (Catani und Bambini 2014). Läsionen dieser Verbindungen scheinen damit zu Schwierigkeiten in dem Erlernen komplexer syntaktischer Sequenzen sowie der Abstraktion und somit in der Generalisierung zu führen. Somit erscheinen die Schwierigkeiten anderer Spezies, wie bsp. Vögeln und Affen, diese Sequenzen zu erlernen und zu generalisieren, schlüssig (Berwick et al. 2011; Fitch und Hauser 2004; Gentner et al. 2006).

4.6 Einfluss der Aphasie

Allgemein sei angemerkt, dass die Läsionen, welche sprachrelevante Areale betrafen, die Lernfähigkeit der Probanden für syntaktische Strukturen beeinflussen. Wir konnten zeigen, dass nicht nur Areale, die klinisch zu sprachlichen Einschränkungen führen, für syntaktische Verarbeitung wichtig sind. Dies zeigt sich unter anderem daran, dass, obwohl zunächst die Mehrheit der getesteten Probanden (46 Aphasiker, 22 Nicht-Aphasiker) an einer Aphasie litten, zum Testzeitpunkt nur noch ein kleiner Anteil mit 18 Probanden Aphasiker waren. Auch der Token Test zeigte hier mit einem Prozentrang

von **85.2** in T0 und **92.7** in T1 Werte, welche auf nur auf eine minimale Beeinträchtigung der Probanden im Schnitt schließen lässt. Passend hierzu konnte keine Korrelation mit dem Aphasiestatus zum Zeitpunkt T0 gefunden werden (s. u. sowie Abs. 5).

Dennoch wiesen Aphasiker hier eine signifikant höhere Läsionsgröße auf. Die Beeinträchtigung der klinischen Beeinträchtigung der Sprache lässt somit auf ein ausgedehntes Netzwerk der Sprachverarbeitung schließen.

Es kann festgehalten werden, dass Probanden, welche ein anhaltendes Sprachdefizit aufweisen, wie erwartet große Schwierigkeiten im Erlernen von Grammatik aufweisen. Diese zeigen sich dann sowohl für FSG als auch PSG (sign. kleineres Delta 3-1 für FSG, für PSG nicht signifikant). Der Liebermeister Test für den Aphasiestatus zum Zeitpunkt T1 konnte hier sehr ähnliche Regionen mit einer anhaltenden Aphasie verknüpfen, welche ebenfalls mit einer schlechten Lernleistung des Delta 3-1 einhergingen. Dies bestätigt die Korrelation der anhaltenden Aphasie mit einer schlechten Lernleistung. Ebenso konnte für eine schlechte Endleistung in der Gruppe der Aphasiker zum Zeitpunkt T1 teilweise identische Areale identifiziert werden, wie es für S3 für alle Probanden der Fall war. Diese lagen für PSG im Bereich des IPL und Gyrus supramarginalis, für FSG im Bereich der Insula. Die Areale der weißen Substanz (AF) zeigten sich hier für beide Grammatiken.

Die absolut betrachtet niedrigere Leistung für FSG in der Gruppe der Aphasiker zum Zeitpunkt T1 zeigt sich hier über das gesamte Experiment hinweg in allen Gruppen und dürfte daher durch die Reihenfolge der Tests bedingt sein, welche sich aber bei den Aphasikern in T1 besonders bemerkbar macht.

Die Schwierigkeiten der Aphasiker zeigen sich auch in einer Staffelung des Lernzuwachses: dieser zeigte sich für „Immer-Aphasiker“ (10%) am geringsten und für „Nie-Aphasiker“ (31.5%) am größten, Probanden mit Recovery lagen mit durchschnittlich 30.3% in der Mitte. Demnach konnte ein signifikanter Unterschied im Lernzuwachs für FSG zwischen Probanden mit anhaltender Aphasie und Nie-Aphasikern oder Recovery-Probanden festgestellt werden, nicht jedoch für PSG. In ihrer Endleistung konnte sowohl für FSG als auch PSG kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden.

Erstaunlicherweise zeigten Probanden, welche sich von einer Schlaganfallbedingten Aphasie erholten, in Runde 3 eine ähnliche Performanz wie Probanden, welche nie

eine Aphasie hatten. Zudem konnte beobachtet werden, dass es sowohl Probanden gibt, welche in T0 aphasisch waren und daher zwangsläufig eine Läsion in einem sprachrelevanten Areal aufwiesen, und trotzdem eine perfekte Performanz absolvierten (s. Absatz 3.1). Dies bestätigt den oben bereits genannten fehlenden Einfluss der Aphasie in T0.

Nie Aphasiker weisen kaum kortikale Areale auf, eine Überschneidung mit Immer-Aphasikern nur im Bereich des Putamens. Dies könnte darauf hindeuten, dass bei fehlender Klinik subkortikale Areale im Sinne eines Verbindungsproblems für eine schlechte Leistung verantwortlich sind. Damit wären die BG eher für einen allgemeinen Lernprozess zuständig.

Probanden, welche jedoch nie ein Sprachdefizit aufwiesen (Nicht-Aphasiker T0), konnten dennoch nur eine Endleistung von 52.53% für FSG und 56.95% in PSG in Session 3 erzielen und lagen somit nur knapp über Zufallsniveau und somit, trotz fehlender Schädigung sprachrelevanter Areale, deutlich unterhalb der Leistung von gesunden Probanden. Diese Beobachtung lässt mehrere Schlussfolgerungen zu: Zum einen benötigt eine schlechte Leistung in dieser Testung nicht unbedingt eine Schädigung sprachrelevanter Areale, zum anderen ist es möglich, dass hier Strukturen geschädigt wurden, welche das allgemeine Lernen (nicht speziell nur das Lernen von Syntax) behindern und daher zu der geminderten Leistung führen. Eine anhaltende Aphasie scheint somit zwar mit Einschränkungen des Lernfortschritts verbunden zu sein, behindert allerdings das Syntaxlernen nicht vollständig. Damit ist die Aphasie zwar durchaus ein einschränkender Faktor, die hier aufgeführten Beobachtungen legen jedoch nahe, dass noch weitere Faktoren existieren müssen, um das gezeigte Verhalten vollständig zu erklären.

4.7 Weitere Einflussfaktoren auf den Lernerfolg

Abschließend soll hier noch ein kurzer Blick auf weitere mögliche Einflussfaktoren geworfen werden.

Die Memory Aufgabe konnte hier von allen Aufgaben am besten absolviert werden und lag mit mindestens 58.2 % in Session 1 und maximal 70.8% in Session 3 weit über den durchschnittlichen Werten für die Grammatikaufgaben. Somit scheint die Memory Funktion hier unabhängig von dem Erlernen von Syntax zu sein. Das grundsätzliche, visuospatiale Kurzzeitgedächtnis konnte hier mittels Corsi-Tests kontrolliert werden.

Der Corsi lag zum Zeitpunkt T1 mit 5.34 Punkten vorwärts und 4.98 Punkten rückwärts im Mittel im unteren Normalbereich, sodass hier von einer durchschnittlichen non-verbale Memoryleistung ausgegangen werden kann. Auch für die Gruppe der perfekten Performer konnte für den Zeitpunkt T1 kein signifikanter Unterschied in den Corsi-Werten im Vergleich zu den restlichen Probanden festgestellt werden (s. Tabelle 9).

Das Bildungsalter konnte hier für perfekte Performer im Vergleich zu den restlichen Probanden als signifikant höher gezeigt werden (s. Tabelle 8). Dies liefert somit Hinweise auf den positiven Einfluss des Bildungsalters. (Danner et al. 2017) untersuchten den Einfluss des Intelligenzquotienten sowie der Abschlussnote auf das implizite Lernen, konnten jedoch zeigen, dass die erreichte Leistung in einer impliziten AGL Aufgabe unabhängig hiervon war. Dies unterscheidet sich jedoch insofern, als dass Danner et al ein qualitatives Maß als Einfluss auf AGL untersuchten, wohingegen hier ein quantitatives Maß (Anzahl Jahre an Bildung) untersucht wurde. Ob diese zwei Maßeinheiten nun tatsächlich vergleichbar sind und insbesondere in Bezug auf Syntax den gleichen Einfluss aufweisen, ist jedoch fraglich. Demnach wären weitere Studien für die Validierung dieses Einflusses nötig.

Auch hinsichtlich des Alters unterschieden sich die perfekten Performer zu den übrigen Probanden. Diese zeigten sich zwar durchschnittlich jünger, allerdings jedoch nicht signifikant. Über den Einfluss des Alters auf das implizite Lernen besteht derzeit in der Literatur noch Uneinigkeit. Einige Autoren konnten einen negativen Einfluss des höheren Lebensalters auf das implizite Erlernen bei SRT Aufgaben feststellen (Howard und Howard 1997; Simon et al. 2011). Dieser konnte jedoch in einer anderen Studie nicht für das regelbasierte Lernen bei AGL gezeigt werden (Kürten et al. 2012). Somit wäre hier weitere Forschung gefragt, um den genauen Einfluss des Alters auf das Erlernen zu untersuchen.

5. Vorgehensweise und Limitationen der Studie

Da hier Probanden mit körperlichen und teils auch kognitiven Einschränkungen untersucht wurden, ergaben sich hier auch in der Datenstruktur Besonderheiten.

Aufgrund der Tatsache, dass nicht auf jede gestellte Aufgabe, also auf jede Silbengruppe, auch eine Antwort gegeben wurde, stellte sich die Frage, wie mit ausgelassenen Antworten umgegangen werden soll.

Eine Auslegung von nicht-gegebenen Antworten als falsche Antworten wäre eine Interpretation, welche hier nicht zulässig erscheint: ein Proband entschied sich aktiv weder für noch gegen eine Silbengruppe, die Einstufung als falsche Antwort würde hier jedoch eine willentliche Einordnung voraussetzen. Nicht-gegebene Antworten zu ignorieren, sodass die Performanz sich als Relation von korrekt gegebenen Antworten im Verhältnis zu allen abgegebenen Antworten definieren würde, gestaltet sich hier auch schwierig. Durch die extrem breite Varianz an abgegebenen Antworten wäre es möglich, dass ein Proband mit einer einzigen abgegebenen korrekten Antwort eine Performanz von 100% erzielte, wohingegen andere Probanden mit beispielsweise 15 korrekten Einstufungen bei 18 gegebenen Antworten lediglich eine Performanz von 83% erzielten.

Auch eine Betrachtung des a -Prime Wertes, welcher ein gebräuchlicher Wert in den Sozialwissenschaften darstellt (Stanislaw und Todorov 1999), würde für die Berechnung lediglich die richtig korrekten und falsch korrekten Antworten berücksichtigen und somit indirekt die nicht abgegebenen Antworten den inkorrekten Antworten zuschreiben.

Jede der o.g. Methoden weist Vor- und Nachteile auf und beleuchtet den einen oder anderen Aspekt mehr, vernachlässigt dafür aber wiederum einen anderen. Daher wurde hier die Entscheidung zugunsten des Performanzwertes gefällt, welcher in der unter Abs. 2.3.1 aufgeführten Anpassung einen für alle Probanden und über alle Runden hinweg vergleichbaren Wert für die Lernleistung angibt und somit hier die beste Beurteilbarkeit für die zu messende Größe liefert.

Ein Hauptkritikpunkt an der hier durchgeführten Studie könnte somit die Auswertung der Daten mittels der korrigierten Performanz darstellen, da hierdurch zumindest indirekt bereits eine Interpretation der Rohdaten entsteht.

Daher ist hier der Vergleich zu den nicht durch den Autor dieser Dissertation durchgeführten logistischen Regressionsmodellen dennoch lohnenswert (s. **Modelle S. Kirsch**). Diese Interpretation kann durch die Schätzung der Wahrscheinlichkeit von korrekten Antworten der Rohdaten vermieden werden.

Die Schätzung des logistischen Basismodells zeigt hier zwar einen positiven Effekt für die Anzahl Runden, aber auch gleichzeitig einen negativen Haupteffekt für PSG (s. Modelle S. Kirsch; Abbildung 30 im Anhang). Zwar zeigen sich auch hier wieder beide Grammatiken für Runde 3 vergleichbar, dennoch scheint PSG im Schnitt zu weniger korrekten Einordnungen zu führen und liefert somit ebenfalls einen Hinweis auf dessen höhere Komplexität. Die Unterschiede, welche hier für PSG in den beiden Berechnungen vorliegen, sind höchstwahrscheinlich der unterschiedlichen Betrachtungsweise geschuldet: während die logistische Regression die Wahrscheinlichkeit korrekter Antworten an den abgegebenen Antworten betrachtet, wird in der korrigierten Performanz dieser Studie das Verhältnis zu allen möglichen Antworten betrachtet.

Während die Untersuchung des Einflusses der Aphasie in T0 auch hier keinen signifikanten Effekt auf die Leistung zeigte (s. Modelle S. Kirsch; Abbildung 31 im Anhang), konnte eine anhaltende Aphasie jedoch mit einem signifikant negativen Einfluss auf den Lernzuwachs verbunden werden (Modelle S. Kirsch; Abbildung 32 im Anhang). Dies bestätigt oben genannte Ergebnisse, dass eine anhaltende Aphasie mit einer flacheren Lernkurve vergesellschaftet ist.

Als weiterer Einfluss wurde das Alter der Probanden untersucht, hier konnte eine negative Interaktion des Alters in Zusammenhang mit der Session und PSG festgestellt werden (s. Modelle S. Kirsch; Abbildung 33). Somit hätte ein höheres Alter einen stärkeren negativen Einfluss auf den Lernzuwachs für PSG als für FSG.

Zudem konnte ebenfalls ein grundsätzlich positiver Einfluss des Bildungsalters auf die Lernleistung festgestellt werden (s. Modelle S. Kirsch; Abbildung 34).

Eine weitere Limitation stellt hier die Testreihenfolge dar. Die meisten Probanden absolvierten zuerst FSG und erst später PSG. Für PSG konnten sie eine bessere Anwendung der Regel auf neue Beispiele erzielen, als für FSG. Da es sich bei PSG um die allgemein anerkannt komplexere Grammatik handelt, wäre hier ggfs. aufgrund der Testreihenfolge ein höherer Trainingsgrad für PSG denkbar. Somit könnte vermutet werden, dass Probanden mit linkshemisphärischer Schädigung, länger den Stimuli ausgesetzt sein müssen als Gesunde, um hieraus eine effiziente Abstraktion zu entwickeln. Falls dies jedoch gelingt, ist dies auch für die eigentlich schwerere

Grammatik anwendbar, sodass hieraus die bessere Leistung für PSG in Runde 4 entsteht.

6. Klinische Relevanz der Studie

Der Schlaganfall zählt derzeit sowohl in Deutschland als auch weltweit als die zweithäufigste Todesursache nach dem Herzinfarkt und stellt somit eine der häufigsten neurologischen Erkrankungen dar (Busch und Kuhnert 2017; Plass et al. 2014). Die Aphasie tritt als initiales Symptom bei 30-40 % der Patienten auf und stellt, je nach Ausprägung, eine drastische Einschränkung im täglichen Leben der Betroffenen dar (Baumgärtner und Staiger 2020). Eine Untersuchung, sowohl an gesunden Probanden als auch an Probanden mit Einschränkungen in der Verarbeitung von Sprache aufgrund eines linkshemisphärischen Schlaganfalls, liefert wertvolle neue Aspekte im Zusammenhang mit der Sprachverarbeitung. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass Probanden mit einer linkshemisphärischen neuronalen Schädigung aufgrund eines Schlaganfalls, in der Verarbeitung von hierarchischen Strukturen, trotz ihrer allgemein anerkannt höheren Komplexität, annähernd ebenso gut wie weniger komplexe, lineare Satzstrukturen von den Probanden erlernt werden konnten. Hinweise auf eine unterschiedliche Verarbeitung der beiden Grammatiken, gegebenenfalls auch durch differente Lernstrategien, ergaben sich hier aus einer unterschiedlichen Fähigkeit der Probanden zur Generalisierung. Die unterschiedliche Bedeutung der neuronalen Korrelate konnte mittels VLSM hier gezeigt werden. Die nähere Betrachtung der Läsionen lässt auf ein geteiltes neuronales Netzwerk schließen, welches jedoch bei einer Schädigung zu Defiziten mit unterschiedlichen Auswirkungen führen kann.

Die vorliegende Studie liefert Erkenntnisse über die unterschiedliche Sprachverarbeitung bei Sätzen unterschiedlich komplexer Grammatik und liefert somit einen Beitrag für das tiefergehende Verständnis des Ablaufs und der neuronalen Strukturen im Prozess der Sprachverarbeitung. Das Verständnis für die hierbei ablaufenden Lernprozesse bei gesunden als auch bei erkrankten Personen, sind von entscheidender Bedeutung für das weiterführende Verständnis unterschiedlichster neurologischer Erkrankungen und bietet neue Möglichkeiten zur Entwicklung zielgerichteter Therapien in der Zukunft.

7. Zusammenfassung

Die Fähigkeit zur Verarbeitung hierarchischer, syntaktischer Strukturen wurde hier an 68 Probanden mit linkshemisphärischer Schädigung in der chronischen Phase nach einem Schlaganfall getestet. Das Ziel lag in einer differenzierten Betrachtung der unterschiedlichen Grammatiken mittels eines AGL Paradigmas nach den Regeln der Chomsky Hierarchie.

Ein nahezu perfektes Erlernen der Grammatikregeln gelang für sechs der Probanden. Da die Probanden Läsionen im Bereich des Ncl. Caudatus und der anterioren Insula aufwiesen, können diese Strukturen als nicht syntaxrelevant eingestuft werden.

Insgesamt zeigten die Testpersonen einen signifikanten Lernzuwachs und eine Generalisierung der erlernten Regeln auf neues Vokabular. Die maximale Leistung lag allerdings nur knapp über Zufallsniveau. Besonders initial in Session eins zeigten die Probanden Probleme in der Kategorisierung der Silben. Bezüglich der unterschiedlichen Grammatiktypen konnten Unterschiede in der effizienten Anwendung der Grammatikregeln auf neue Beispiele gefunden werden. Nur für PSG konnten die Probanden eine weitere Steigerung ihrer Leistung für die vierte Runde erzielen.

Als neuronale Korrelate bei einem schlechten Lernzuwachs konnte eine Beteiligung des IFG für beide Grammatiken gefunden werden. Mit einer schlechten Endleistung als auch mit einem schlechten Lernzuwachs konnten der posteriore superiore temporale Gyrus und Sulcus, der Gyrus supramarginalis, der inferiore Parietallappen sowie Teile der weißen Hirnmasse für beide Grammatiken in Verbindung gebracht werden.

Unterschiede zeigten sich in einer stärkeren Beteiligung des Gyrus angularis und der Insula für FSG und okzipitaler Regionen für PSG. Diese deuten auf strategiebedingte Unterschiede hin (FSG phonologische, PSG visuelle Herangehensweise).

Eine anhaltende Aphasie konnte zwar als negativer Faktor auf die erzielte Leistung identifiziert werden, dennoch müssen weitere Faktoren vorliegen, um das hier gezeigte Verhalten zu erklären. Neben einem höheren Alter und einem geringen Bildungsalter als negativer Einfluss konnten Verhaltensweisen festgestellt werden, welche auf weitere kognitive und exekutive Funktionsstörungen hindeuten. Ein Einfluss des Arbeitsgedächtnisses auf die erzielte Leistung konnte in dieser Studie nicht gefunden werden.

Hier wären ggfs. zukünftige Studien gefragt, die genaue Störung und das Wiedererlangen der zuständigen Prozesse bei der hierarchischen Syntaxverarbeitung zu erforschen.

8. Literaturverzeichnis

Bahlmann, Jörg; Gunter, Thomas C.; Friederici, Angela D. (2006): Hierarchical and Linear Sequence Processing: An Electrophysiological Exploration of Two Different Grammar Types. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* (Vol 18, Number 11), S. 1829–1842.

Bahlmann, Jörg; Schubotz, Ricarda I.; Friederici, Angela D. (2008): Hierarchical artificial grammar processing engages Broca's area. In: *NeuroImage* 42 (2), S. 525–534. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2008.04.249.

Bates, Elizabeth; Wilson, Stephen M.; Saygin, Ayse Pinar; Dick, Frederic; Sereno, Martin I.; Knight, Robert T.; Dronkers, Nina F. (2003): Voxel-based lesion-symptom mapping. In: *Nature Neuroscience* 6 (5), S. 448–450. DOI: 10.1038/nn1050.

Baumgärtner, Annette; Staiger, Anja (2020): Neurogene Störungen der Sprache und des Sprechens. In: *Neurologie up2date* 3 (02), S. 155–173. DOI: 10.1055/a-0966-0974.

Ben-Shachar, Michal; Palti, Dafna; Grodzinsky, Yosef (2004): Neural correlates of syntactic movement. Converging evidence from two fMRI experiments. In: *NeuroImage* 21 (4), S. 1320–1336. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2003.11.027.

Berwick, Robert C.; Friederici, Angela D.; Chomsky, Noam; Bolhuis, Johan J. (2013): Evolution, brain, and the nature of language. In: *Trends in Cognitive Sciences* 17 (2), S. 89–98. DOI: 10.1016/j.tics.2012.12.002.

Berwick, Robert C.; Okanoya, Kazuo; Beckers, Gabriel J. L.; Bolhuis, Johan J. (2011): Songs to syntax. The linguistics of birdsong. In: *Trends in Cognitive Sciences* 15 (3), S. 113–121. DOI: 10.1016/j.tics.2011.01.002.

Bonner, Michael F.; Peelle, Jonathan E.; Cook, Philip A.; Grossman, Murray (2013): Heteromodal conceptual processing in the angular gyrus. In: *NeuroImage* 71, S. 175–186. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.01.006.

Bornkessel, Ina; Zysset, Stefan; Friederici, Angela D.; Cramon, D. Yves von; Schlesewsky, Matthias (2005): Who did what to whom? The neural basis of argument hierarchies during language comprehension. In: *NeuroImage* 26 (1), S. 221–233. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.01.032.

Bortz, Jürgen; Schuster, Christof (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10448295>.

Botvinick, M. M.; Braver, T. S.; Barch, D. M.; Carter, C. S.; Cohen, J. D. (2001): Conflict monitoring and cognitive control. In: *Psychological review* 108 (3), S. 624–652. DOI: 10.1037/0033-295x.108.3.624.

Brandi, Marie-Luise; Wohlschläger, Afra; Sorg, Christian; Hermsdörfer, Joachim (2014): The neural correlates of planning and executing actual tool use. In: *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 34 (39), S. 13183–13194. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0597-14.2014.

Brodman, K. (1909): Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde. In ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues: J.A. Barth, Leipzig, Germany.

Brodth, Svenja; Pöhlchen, Dorothee; Flanagin, Virginia L.; Glasauer, Stefan; Gais, Steffen; Schönauer, Monika (2016): Rapid and independent memory formation in the parietal cortex. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (46), S. 13251–13256. DOI: 10.1073/pnas.1605719113.

- Brown, Thackery I.; Ross, Robert S.; Tobyne, Sean M.; Stern, Chantal E. (2012): Cooperative interactions between hippocampal and striatal systems support flexible navigation. In: *NeuroImage* 60 (2), S. 1316–1330. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.046.
- Brunner, Edgar; Munzel, Ullrich (2000): The Nonparametric Behrens-Fisher Problem. Asymptotic Theory and a Small-Sample Approximation. In: *Biom. J.* 42 (1), S. 17–25. DOI: 10.1002/(SICI)1521-4036(200001)42:1<17::AID-BIMJ17>3.0.CO;2-U.
- Büchel, C.; Josephs, O.; Rees, G.; Turner, R.; Frith, C. D.; Friston, K. J. (1998): The functional anatomy of attention to visual motion. A functional MRI study. In: *Brain : a journal of neurology* 121 (Pt 7), S. 1281–1294. DOI: 10.1093/brain/121.7.1281.
- Busch, Markus A.; Kuhnert, Ronny (2017): 12-Monats-Prävalenz von Schlaganfall oder chronischen Beschwerden infolge eines Schlaganfalls in Deutschland. In: *Journal of Health Monitoring*, S. 70–76.
- Catani, Marco; Bambini, Valentina (2014): A model for Social Communication And Language Evolution and Development (SCALED). In: *Current opinion in neurobiology* 28, S. 165–171. DOI: 10.1016/j.conb.2014.07.018.
- Catani, Marco; Jones, Derek K.; ffytche, Dominic H. (2005): Perisylvian language networks of the human brain. In: *Annals of Neurology* 57 (1), S. 8–16. DOI: 10.1002/ana.20319.
- Cavanna, Andrea E.; Trimble, Michael R. (2006): The precuneus. A review of its functional anatomy and behavioural correlates. In: *Brain : a journal of neurology* 129 (Pt 3), S. 564–583. DOI: 10.1093/brain/awl004.
- Chomsky, Noam (1956): Three models for the description of language. In: *IRE Trans. Inf. Theory IT*, S. 113–124. DOI: 10.1109/TIT.1956.1056813.
- Chomsky, Noam (2010): Approaching UG from Below. In: Uli Sauerland und Hans-Martin Gärtner (Hg.): *Interfaces + recursion = language? Chomsky's minimalism and the view from syntax-semantics*. Berlin, New York: Mouton de Gruyter (Studies in generative grammar 0167-4331, 89), S. 1–30.
- Chomsky, Noam (2013): Problems of projection. In: *Lingua* 130, S. 33–49. DOI: 10.1016/j.lingua.2012.12.003.
- Chomsky, Noam (2015a): Some core contested concepts. In: *Journal of psycholinguistic research* 44 (1), S. 91–104. DOI: 10.1007/s10936-014-9331-5.
- Chomsky, Noam (2015b): *The minimalist program*. 20th anniversary edition ; [with a new preface by the author]. 20th anniversary edition. Cambridge, Mass.: MIT Press (Current studies in linguistics).
- Chomsky, Noam (2017): The language capacity. Architecture and evolution. In: *Psychonomic Bulletin & Review* 24 (1), S. 200–203. DOI: 10.3758/s13423-016-1078-6.
- Chomsky, Noam; Gallego, Ángel J.; Ott, Dennis (2019): La gramàtica generativa i la facultat del llenguatge. Descobriments, preguntes i desafiaments. In: *catJL*, S. 229. DOI: 10.5565/rev/catjl.288.
- Christiansen, Morten H.; Chater, Nick (2008): Language as shaped by the brain. In: *The Behavioral and brain sciences* 31 (5), 489-508; discussion 509-58. DOI: 10.1017/S0140525X08004998.
- Christiansen, Morten H.; Kelly, M. Louise; Shillcock, Richard C.; Greenfield, Katie (2010): Impaired artificial grammar learning in agrammatism. In: *Cognition* (116), S. 382–393. Online verfügbar unter 10.1016/j.cognition.2010.05.015.
- Clark, Luke; Studer, Bettina; Bruss, Joel; Tranel, Daniel; Bechara, Antoine (2014): Damage to insula abolishes cognitive distortions during simulated gambling. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (16), S. 6098–6103. DOI: 10.1073/pnas.1322295111.

- Conway, Christopher M.; Christiansen, Morten H. (2001): Sequential learning in non-human primates. In: *Trends in Cognitive Sciences* 5 (12), S. 539–546. DOI: 10.1016/s1364-6613(00)01800-3.
- Danner, Daniel; Hagemann, Dirk; Funke, Joachim (2017): Measuring Individual Differences in Implicit Learning with Artificial Grammar Learning Tasks. In: *Zeitschrift für Psychologie* 225 (1), S. 5–19. DOI: 10.1027/2151-2604/a000280.
- Dell, Gary S. (1986): A spreading-activation theory of retrieval in sentence production. In: *Psychological review* 93 (3), S. 283–321. DOI: 10.1037/0033-295X.93.3.283.
- Dell, Gary S.; Chang, Franklin (2014): The P-chain. Relating sentence production and its disorders to comprehension and acquisition. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 369 (1634), S. 20120394. DOI: 10.1098/rstb.2012.0394.
- Dell, Gary S.; Chang, Franklin; Griffin, Zenzi M. (1999): Connectionist Models of Language Production: Lexical Access and Grammatical Encoding. In: *COGNITIVE SCIENCE* (Vol 23 (4)), S. 517–542.
- Diessel, Holger; Hoffmann, Thomas; Trousdale, Graeme (2013): Construction Grammar and First Language Acquisition - Oxford Handbooks: Oxford University Press (1).
- Dominey, Peter F.; Hoen, Michel; Blanc, Jean-Marc; Lelekov-Boissard, Taïssia (2003): Neurological basis of language and sequential cognition. Evidence from simulation, aphasia, and ERP studies. In: *Brain and language* 86 (2), S. 207–225. DOI: 10.1016/S0093-934X(02)00529-1.
- Döring, Nicola; Bortz, Jürgen (2016): Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. Unter Mitarbeit von Sandra Pöschl-Günther. 5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5>.
- Dronkers, Nina F.; Wilkins, David P.; van Valin, Robert D.; Redfern, Brenda B.; Jaeger, Jeri J. (2004): Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. In: *Cognition* 92 (1-2), S. 145–177. DOI: 10.1016/j.cognition.2003.11.002.
- Elsen, Hilke (2009): Morphologie und Kognitive Grammatik. In: Armin Burkhardt, Rudolf Hoberg, Peter Schlobinski, Eva Teubert und Alfred Warner (Hg.): Muttersprache. Vierteljahresschrift für deutsche Sprache. Gesellschaft für deutsche Sprache (4), S. 259–277.
- Elsner, Birgit; Hommel, Bernhard; Mentschel, Claudia; Drzezga, Alexander; Prinz, Wolfgang; Conrad, Bastian; Siebner, Hartwig (2002): Linking actions and their perceivable consequences in the human brain. In: *NeuroImage* 17 (1), S. 364–372. DOI: 10.1006/nimg.2002.1162.
- Fadiga, Luciano; Craighero, Laila; D'Ausilio, Alessandro (2009): Broca's area in language, action, and music. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169, S. 448–458. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.04582.x.
- Fitch, W. Tecumseh; Friederici, Angela D. (2012): Artificial grammar learning meets formal language theory. An overview. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 367 (1598), S. 1933–1955. DOI: 10.1098/rstb.2012.0103.
- Fitch, W. Tecumseh; Hauser, Marc D. (2004): Computational constraints on syntactic processing in nonhuman primates. In: *Science* (Vol. 303, Issue 5656), S. 377–380.
- Fitch, W. Tecumseh; Hauser, Marc D.; Chomsky, Noam (2005): The evolution of the language faculty. Clarifications and implications. In: *Cognition* 97 (2), 179-210; discussion 211-25. DOI: 10.1016/j.cognition.2005.02.005.
- Fletcher, P. C.; Frith, C. D.; Baker, S. C.; Shallice, T.; Frackowiak, R. S.; Dolan, R. J. (1995): The mind's eye--precuneus activation in memory-related imagery. In: *NeuroImage* 2 (3), S. 195–200. DOI: 10.1006/nimg.1995.1025.

Flöel, Agnes; Vries, Meinou H. de; Scholz, Jan; Breitenstein, Caterina; Johansen-Berg, Heidi (2009): White matter integrity in the vicinity of Broca's area predicts grammar learning success. In: *NeuroImage* 47 (4), S. 1974–1981. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.05.046.

Folia, Vasiliki; Petersson, Karl Magnus (2014): Implicit structured sequence learning. An fMRI study of the structural mere-exposure effect. In: *Frontiers in psychology* 5 (41), S. 1–13. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00041.

Folia, Vasiliki; Uddén, Julia; Forkstam, Christian; Ingvar, Martin; Hagoort, Peter; Petersson, Karl Magnus (2008): Implicit learning and dyslexia. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1145, S. 132–150. DOI: 10.1196/annals.1416.012.

Folia, Vasiliki; Uddén, Julia; Forkstam, Christian; Petersson, Karl Magnus (2010): Artificial Language Learning in Adults and Children. In: *Language Learning* (60:Suppl. 2), S. 188–220.

Forkstam, Christian; Hagoort, Peter; Fernandez, Guillen; Ingvar, Martin; Petersson, Karl Magnus (2006): Neural correlates of artificial syntactic structure classification. In: *NeuroImage* 32 (2), S. 956–967. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.03.057.

Forkstam, Christian; Petersson, Karl Magnus (2005): Towards an explicit account of implicit learning. In: *Current opinion in neurology* 18 (4), S. 435–441. DOI: 10.1097/01.wco.0000171951.82995.c4.

Foygel, Dan; Dell, Gary S. (2000): Models of Impaired Lexical Access in Speech Production. In: *Journal of Memory and Language* 43 (2), S. 182–216. DOI: 10.1006/jmla.2000.2716.

Frey, Stephen; Campbell, Jennifer S. W.; Pike, G. Bruce; Petrides, Michael (2008): Dissociating the human language pathways with high angular resolution diffusion fiber tractography. In: *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 28 (45), S. 11435–11444. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2388-08.2008.

Friederici, Angela D. (2002): Towards a neural basis of auditory sentence processing. In: *Trends in Cognitive Sciences* 6 (2), S. 78–84. DOI: 10.1016/S1364-6613(00)01839-8.

Friederici, Angela D. (2009): Pathways to language. Fiber tracts in the human brain. In: *Trends in Cognitive Sciences* 13 (4), S. 175–181. DOI: 10.1016/j.tics.2009.01.001.

Friederici, Angela D. (2011): The brain basis of language processing. From structure to function. In: *Physiological reviews* 91 (4), S. 1357–1392. DOI: 10.1152/physrev.00006.2011.

Friederici, Angela D.; Bahlmann, Jörg; Heim, Stefan; Schubotz, Ricarda I.; Anwander, Alfred (2006a): The brain differentiates human and non-human grammars: Functional localization and structural connectivity. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (vol. 103 no. 7), S. 2458–2463.

Friederici, Angela D.; Fiebach, Christian J.; Schlesewsky, Matthias; Bornkessel, Ina D.; Cramon, D. Yves von (2006b): Processing linguistic complexity and grammaticality in the left frontal cortex. In: *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)* 16 (12), S. 1709–1717. DOI: 10.1093/cercor/bhj106.

Friederici, Angela D.; Kotz, Sonja A. (2003): The brain basis of syntactic processes. Functional imaging and lesion studies. In: *NeuroImage* 20, S8-S17. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2003.09.003.

Friederici, Angela D.; Kotz, Sonja A.; Scott, Sophie K.; Obleser, Jonas (2010): Disentangling syntax and intelligibility in auditory language comprehension. In: *Human brain mapping* 31 (3), S. 448–457. DOI: 10.1002/hbm.20878.

Friederici, Angela D.; Pfeifer, Erdmut; Hahne, Anja (1993): Event-related brain potentials during natural speech processing. Effects of semantic, morphological and syntactic violations. In: *Cognitive Brain Research* 1 (3), S. 183–192. DOI: 10.1016/0926-6410(93)90026-2.

- Gentner, Timothy Q.; Fenn, Kimberly M.; Margoliash, Daniel; Nusbaum, Howard C. (2006): Recursive syntactic pattern learning by songbirds. In: *Nature* 440 (7088), S. 1204–1207. DOI: 10.1038/nature04675.
- Gerritsen, Marleen J.J.; Berg, Ina J.; Deelman, Betto G.; Visser-Keizer, Annemarie C.; Jong, Betty Meyboom-de (2003): Speed of Information Processing After Unilateral Stroke. In: *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 25 (1), S. 1–13. DOI: 10.1076/jcen.25.1.1.13622.
- Gomez, R. L.; Schvaneveldt, Roger W. (1994): What Is Learned From Artificial Grammars? Transfer Tests of Simple Association. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* Vol 20 (2), 396-410.
- Griffiths, John D.; Marslen-Wilson, William D.; Stamatakis, Emmanuel A.; Tyler, Lorraine K. (2013): Functional organization of the neural language system. Dorsal and ventral pathways are critical for syntax. In: *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)* 23 (1), S. 139–147. DOI: 10.1093/cercor/bhr386.
- Grodzinsky, Yosef; Friederici, Angela D. (2006): Neuroimaging of syntax and syntactic processing. In: *Current opinion in neurobiology* 16 (2), S. 240–246. DOI: 10.1016/j.conb.2006.03.007.
- Hauser, Marc D.; Chomsky, Noam; Fitch, W. Tecumseh (2002): The faculty of language. What is it, who has it, and how did it evolve? In: *Science* 298 (5598), S. 1569–1579. DOI: 10.1126/science.298.5598.1569.
- Hickok, Gregory; Poeppel, David (2004): Dorsal and ventral streams. A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. In: *Cognition* 92 (1-2), S. 67–99. DOI: 10.1016/j.cognition.2003.10.011.
- Hickok, Gregory; Poeppel, David (2007): The cortical organization of speech processing. In: *Nature reviews. Neuroscience* 8 (5), S. 393–402. DOI: 10.1038/nrn2113.
- Hoffmann, Ludger (2007): Der Mensch und seine Sprache - eine anthropologische Skizze. In: Angelika Redder (Hg.): *Diskurse und Texte. Festschrift für Konrad Ehlich zum 65. Geburtstag. Unter Mitarbeit von Konrad Ehlich.* Tübingen: Stauffenburg-Verl. (Stauffenburg-Festschriften), S. 21–37.
- Hornak, J.; O'Doherty, J.; Bramham, J.; Rolls, E. T.; Morris, R. G.; Bullock, P. R.; Polkey, C. E. (2004): Reward-related reversal learning after surgical excisions in orbito-frontal or dorsolateral prefrontal cortex in humans. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 16 (3), S. 463–478. DOI: 10.1162/089892904322926791.
- Howard, Darlene V.; Howard JR, James H. (2001): When it does hurt to try: Adult age differences in the effects of instructions on implicit pattern learning. In: *Psychonomic Bulletin & Review* (8 (4)), S. 798–805.
- Howard, James H.; Howard, Darlene V. (1997): Age differences in implicit learning of higher order dependencies in serial patterns. In: *Psychology and Aging* 12 (4), S. 634–656. DOI: 10.1037/0882-7974.12.4.634.
- Humphries, Colin; Willard, Kimberley; Buchsbaum, Bradley; Hickok, Gregory (2001): Role of anterior temporal cortex in auditory sentence comprehension: an fMRI study. In: *Neuroreport* 12 (8), S. 1749–1752.
- Indefrey, P.; Brown, C. M.; Hellwig, F.; Amunts, K.; Herzog, H.; Seitz, R. J.; Hagoort, P. (2001a): A neural correlate of syntactic encoding during speech production. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (10), S. 5933–5936. DOI: 10.1073/pnas.101118098.
- Indefrey, P.; Hagoort, P.; Herzog, H.; Seitz, R. J.; Brown, C. M. (2001b): Syntactic processing in left prefrontal cortex is independent of lexical meaning. In: *NeuroImage* 14 (3), S. 546–555. DOI: 10.1006/nimg.2001.0867.

- Janacsek, Karolina; Shattuck, Kyle F.; Tagarelli, Kaitlyn M.; Lum, Jarrad A. G.; Turkeltaub, Peter E.; Ullman, Michael T. (2020): Sequence learning in the human brain. A functional neuroanatomical meta-analysis of serial reaction time studies. In: *NeuroImage* 207, S. 116387. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116387.
- Kaan, Edith; Harris, Anthony; Gibson, Edward; Holcomb, Philip (2000): The P600 as an index of syntactic integration difficulty. In: *language and cognitive process* 15 (2), S. 159–201.
- Kaan, Edith; Swaab, Tamara Y. (2002): The brain circuitry of syntactic comprehension. In: *Trends in Cognitive Sciences* 6 (8), S. 350–356. DOI: 10.1016/S1364-6613(02)01947-2.
- Kane, Michael J.; Engle, Randall W. (2002): The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence. An individual-differences perspective. In: *Psychonomic Bulletin & Review* 9 (4), S. 637–671. DOI: 10.3758/BF03196323.
- Kemmerer, David; Rudrauf, David; Manzel, Ken; Tranel, Daniel (2012): Behavioral patterns and lesion sites associated with impaired processing of lexical and conceptual knowledge of actions. In: *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior* 48 (7), S. 826–848. DOI: 10.1016/j.cortex.2010.11.001.
- Kim, Hongkeun (2014): Involvement of the dorsal and ventral attention networks in oddball stimulus processing. A meta-analysis. In: *Human brain mapping* 35 (5), S. 2265–2284. DOI: 10.1002/hbm.22326.
- Knowlton, Barbara J.; Squire, Larry R. (1996): Artificial grammar learning depends on implicit acquisition of both abstract and exemplar-specific information. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 22 (1), S. 169–181. DOI: 10.1037/0278-7393.22.1.169.
- Koelsch, Stefan; Gunter, Thomas C.; Wittfoth, Matthias; Sammler, Daniela (2005): Interaction between syntax processing in language and in music. An ERP Study. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 17 (10), S. 1565–1577. DOI: 10.1162/089892905774597290.
- Kotz, Sonja A.; Anwender, Alfred; Axer, Hubertus; Knösche, Thomas R. (2013): Beyond cytoarchitectonics. The internal and external connectivity structure of the caudate nucleus. In: *PloS one* 8 (7), e70141. DOI: 10.1371/journal.pone.0070141.
- Kümmerer, Dorothee; Hartwigsen, Gesa; Kellmeyer, Philipp; Glauche, Volkmar; Mader, Irina; Klöppel, Stefan; Suchan, Julia; Karnath, Hans-Otto; Weiller, Cornelius; Saur, Dorothe (2013): Damage to ventral and dorsal language pathways in acute aphasia. In: *Brain : a journal of neurology* 136 (Pt 2), S. 619–629. DOI: 10.1093/brain/aws354.
- Kürten, Julia; Vries, Meinou H. de; Kowal, Kristina; Zwitserlood, Pienie; Flöel, Agnes (2012): Age affects chunk-based, but not rule-based learning in artificial grammar acquisition. In: *Neurobiology of aging* 33 (7), S. 1311–1317. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2010.10.008.
- Levin, Irwin P.; Xue, Gui; Weller, Joshua A.; Reimann, Martin; Lauriola, Marco; Bechara, Antoine (2012): A neuropsychological approach to understanding risk-taking for potential gains and losses. In: *Frontiers in neuroscience* 6, S. 15. DOI: 10.3389/fnins.2012.00015.
- Lieberman, Matthew D.; Chang, Grace Y.; Chiao, Joan; Bookheimer, Susan Y.; Knowlton, Barbara J. (2004): An event-related fMRI study of artificial grammar learning in a balanced chunk strength design. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 16 (3), S. 427–438. DOI: 10.1162/089892904322926764.
- Lindenberger, Ulman; Mariske, Michael; Baltes, Paul B. (2000): Memorizing While Walking: Increase in Dual-Task Costs From Young Adulthood to Old Age. In: *Psychology and Aging* 15 (3), S. 417–436. DOI: 10.1037/0882-7974.15.3.417.
- MacDonald, A. W.; Cohen, J. D.; Stenger, V. A.; Carter, C. S. (2000): Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. In: *Science* 288 (5472), S. 1835–1838. DOI: 10.1126/science.288.5472.1835.

- Maess, B.; Koelsch, S.; Gunter, T. C.; Friederici, A. D. (2001): Musical syntax is processed in Broca's area. An MEG study. In: *Nature Neuroscience* 4 (5), S. 540–545. DOI: 10.1038/87502.
- Makris, Nikos; Pandya, Deepak N. (2009): The extreme capsule in humans and rethinking of the language circuitry. In: *Brain structure & function* 213 (3), S. 343–358. DOI: 10.1007/s00429-008-0199-8.
- Makuuchi, Michiru; Bahlmann, Jörg; Anwender, Alfred; Friederici, Angela D. (2009): Segregating the core computational faculty of human language from working memory. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (20), S. 8362–8367. DOI: 10.1073/pnas.0810928106.
- Makuuchi, Michiru; Grodzinsky, Yosef; Amunts, Katrin; Santi, Andrea; Friederici, Angela D. (2013): Processing noncanonical sentences in broca's region. Reflections of movement distance and type. In: *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)* 23 (3), S. 694–702. DOI: 10.1093/cercor/bhs058.
- Meinzer, Marcus; Mohammadi, Siawoosh; Kugel, Harald; Schiffbauer, Hagen; Flöel, Agnes; Albers, Johannes; Kramer, Kira; Menke, Ricarda; Baumgärtner, Annette; Knecht, Stefan; Breitenstein, Caterina; Deppe, Michael (2010): Integrity of the hippocampus and surrounding white matter is correlated with language training success in aphasia. In: *NeuroImage* 53 (1), S. 283–290. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.06.004.
- Melcher, Tobias; Weidema, Maaïke; Eenshuistra, Rena M.; Hommel, Bernhard; Gruber, Oliver (2008): The neural substrate of the ideomotor principle. An event-related fMRI analysis. In: *NeuroImage* 39 (3), S. 1274–1288. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.09.049.
- Mesulam, M.-Marsel (1990): Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. In: *Annals of Neurology* (Vol 28 No 5), S. 597–613.
- Mesulam, M.-Marsel (1998): From sensation to cognition. In: *Brain : a journal of neurology* 121 (Pt 6), S. 1013–1052. DOI: 10.1093/brain/121.6.1013.
- Meulemans, T.; Peigneux, Philippe; van der Linden, Martial (1998): Preserved Artificial Grammar Learning in Parkinson's Disease. In: *Brain and cognition* 37 (1), S. 109–112. DOI: 10.1006/brcg.1997.0991.
- Miller, E. K.; Cohen, J. D. (2001): An integrative theory of prefrontal cortex function. In: *Annual review of neuroscience* 24, S. 167–202. DOI: 10.1146/annurev.neuro.24.1.167.
- Mishkin, Mortimer; Ungerleider, Leslie G.; Macko, Kathleen A. (1983): Object vision and spatial vision. Two cortical pathways. In: *Trends in Neurosciences* 6, S. 414–417. DOI: 10.1016/0166-2236(83)90190-X.
- Moro, A.; Tettamanti, M.; Perani, D.; Donati, C.; Cappa, S. F.; Fazio, F. (2001): Syntax and the brain. Disentangling grammar by selective anomalies. In: *NeuroImage* 13 (1), S. 110–118. DOI: 10.1006/nimg.2000.0668.
- Musso, Mariachristina; Moro, Andrea; Glauche, Volkmar; Rintjes, Michel; Reichenbach, Jürgen; Büchel, Christian; Weiller, Cornelius (2003): Broca's area and the language instinct. In: *Nature Neuroscience* (Volume 6; Number 7), S. 774–781.
- Musso, Mariacristina; Weiller, Cornelius; Horn, Andreas; Glauche, Volkmer; Umarova, Roza; Hennig, Jürgen; Schneider, Albrecht; Rijntjes, Michel (2015): A single dual-stream framework for syntactic computations in music and language. In: *NeuroImage* 117, S. 267–283. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.05.020.
- Nakata, Hiroki; Sakamoto, Kiwako; Ferretti, Antonio; Gianni Perrucci, Mauro; Del Gratta, Cosimo; Kakigi, Ryusuke; Luca Romani, Gian (2008): Somato-motor inhibitory processing in humans. An event-related functional MRI study. In: *NeuroImage* 39 (4), S. 1858–1866. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.10.041.
- Noonan, Krist A.; Jefferies, Elizabeth; Corbett, Faye; Lambon Ralph, Matthew A. (2010): Elucidating the nature of deregulated semantic cognition in semantic aphasia. Evidence for the

- roles of prefrontal and temporo-parietal cortices. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 22 (7), S. 1597–1613. DOI: 10.1162/jocn.2009.21289.
- Opitz, Bertram; Friederici, Angela D. (2003): Interactions of the hippocampal system and the prefrontal cortex in learning language-like rules. In: *NeuroImage* 19 (4), S. 1730–1737. DOI: 10.1016/S1053-8119(03)00170-8.
- Opitz, Bertram; Friederici, Angela D. (2007): Neural basis of processing sequential and hierarchical syntactic structures. In: *Human brain mapping* 28 (7), S. 585–592. DOI: 10.1002/hbm.20287.
- Opitz, Bertram; Hofmann, Juliane (2015): Concurrence of rule- and similarity-based mechanisms in artificial grammar learning. In: *Cognitive psychology* 77, S. 77–99. DOI: 10.1016/j.cogpsych.2015.02.003.
- Packard, Mark G.; Knowlton, Barbara J. (2002): Learning and memory functions of the Basal Ganglia. In: *Annual review of neuroscience* 25, S. 563–593. DOI: 10.1146/annurev.neuro.25.112701.142937.
- Pagano, Robert R. (2013): Understanding statistics in the behavioral sciences. Tenth edition. Belmont, CA: Wadsworth/Cengage Learning (Cengage advantage books).
- Patel, Aniruddh D.; Iversen, John R.; Wassenaar, Marlies; Hagoort, Peter (2008): Musical syntactic processing in agrammatic Broca's aphasia. In: *Aphasiology* 22 (7-8), S. 776–789. DOI: 10.1080/02687030701803804.
- Patterson, Karalyn; Nestor, Peter J.; Rogers, Timothy T. (2007): Where do you know what you know? The representation of semantic knowledge in the human brain. In: *Nature reviews. Neuroscience* 8 (12), S. 976–987. DOI: 10.1038/nrn2277.
- Perani, Daniela; Paulesu, Eraldo; Galles, Nuria Sebastian; Dupoux, Emmanuel; Dehaene, Stanislas; Bettinardi, Valentino; Cappa, Stefano F.; Fazio, Ferruccio; Mehler, Jacques (1998): The bilingual brain. Proficiency and age of acquisition of the second language. In: *Brain : a journal of neurology* 121 (10), S. 1841–1852.
- Perruchet, Pierre; Rey, Arnaud (2005): Does the mastery of center-embedded linguistic structures distinguish humans from nonhuman primates? In: *Psychonomic Bulletin & Review* 12 (2), S. 307–313.
- Petersson, Karl Magnus; Forkstam, Christian; Ingvar, Martin (2004): Artificial syntactic violations activate Broca's region. In: *COGNITIVE SCIENCE* 28 (3), S. 383–407. DOI: 10.1016/j.cogsci.2003.12.003.
- Petersson, Karl-Magnus; Folia, Vasiliki; Hagoort, Peter (2012): What artificial grammar learning reveals about the neurobiology of syntax. In: *Brain and language* 120 (2), S. 83–95. DOI: 10.1016/j.bandl.2010.08.003.
- Petrides, Michael; Pandya, Deepak N. (2009): Distinct parietal and temporal pathways to the homologues of Broca's area in the monkey. In: *PLoS biology* 7 (8), e1000170. DOI: 10.1371/journal.pbio.1000170.
- Pinker, Steven; Jackendoff, Ray (2005): The faculty of language. What's special about it? In: *Cognition* 95 (2), S. 201–236. DOI: 10.1016/j.cognition.2004.08.004.
- Plass, Dietrich; Vos, Theo; Hornberg, Claudia; Scheidt-Nave, Christa; Zeeb, Hajo; Krämer, Alexander (2014): Trends in Disease Burden in Germany. In: *Deutsches Arzteblatt Online*. DOI: 10.3238/arztebl.2014.0629.
- Poldrack, R. A.; Clark, J.; Paré-Blagoev, E. J.; Shohamy, D.; Creso Moyano, J.; Myers, C.; Gluck, M. A. (2001): Interactive memory systems in the human brain. In: *Nature* 414 (6863), S. 546–550. DOI: 10.1038/35107080.
- Pothos, Emmanuel M.; Kirk, Jane (2004): Investigating learning deficits associated with dyslexia. In: *Dyslexia (Chichester, England)* 10 (1), S. 61–76. DOI: 10.1002/dys.266.

- Rauschecker, Josef P. (1998): Cortical processing of complex sounds. In: *Current opinion in neurobiology* 8 (4), S. 516–521. DOI: 10.1016/s0959-4388(98)80040-8.
- Reber, Arthur S. (1967): Implicit learning of artificial grammars. In: *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 6, S. 855–863. DOI: 10.1016/S0022-5371(67)80149-X.
- Riege, W. H.; Mane, L. T.; Metter, E. J.; Hanson, W. R. (1982): Decision Speed And Bias After Unilateral Stroke. In: *Cortex* 18 (3), S. 345–355. DOI: 10.1016/S0010-9452(82)80033-6.
- Robertson, E. M.; Tormos, J. M.; Maeda, F.; Pascual-Leone, A. (2001): The role of the dorsolateral prefrontal cortex during sequence learning is specific for spatial information. In: *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)* 11 (7), S. 628–635. DOI: 10.1093/cercor/11.7.628.
- Rolheiser, Tyler; Stamatakis, Emmanuel A.; Tyler, Lorraine K. (2011): Dynamic processing in the human language system. Synergy between the arcuate fascicle and extreme capsule. In: *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 31 (47), S. 16949–16957. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2725-11.2011.
- Rorden, Chris; Bonilha, Leonardo; Nichols, Thomas E. (2007): Rank-order versus mean based statistics for neuroimaging. In: *NeuroImage* 35 (4), S. 1531–1537. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.12.043.
- Rose, Michael; Haider, Hilde; Weiller, Cornelius; Büchel, Christian (2002): The Role of Medial Temporal Lobe Structures in Implicit Learning. An Event-Related fMRI Study. In: *Neuron* 36 (6), S. 1221–1231. DOI: 10.1016/s0896-6273(02)01105-4.
- Rubia, K.; Russell, T.; Overmeyer, S.; Brammer, M. J.; Bullmore, E. T.; Sharma, T.; Simmons, A.; Williams, S. C.; Giampietro, V.; Andrew, C. M.; Taylor, E. (2001): Mapping motor inhibition. Conjunctive brain activations across different versions of go/no-go and stop tasks. In: *NeuroImage* 13 (2), S. 250–261. DOI: 10.1006/nimg.2000.0685.
- Rüschemeyer, Shirley-Ann; Fiebach, Christian J.; Kempe, Vera; Friederici, Angela D. (2005): Processing lexical semantic and syntactic information in first and second language. fMRI evidence from German and Russian. In: *Human brain mapping* 25 (2), S. 266–286. DOI: 10.1002/hbm.20098.
- Rushworth, M.; Nixon, Philip D.; Renowden, Shelley; Wade, Derick T.; Passingham, R. E. (1997): The left parietal cortex and motor attention. In: *Neuropsychologia* 35 (9), S. 1261–1273. DOI: 10.1016/s0028-3932(97)00050-x.
- Salkind, Neil J. (Hg.) (2010): Encyclopedia of research design. Thousand Oaks, Calif: Sage. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=474297>.
- Salthouse, Timothy (1996): The Processing-Speed Theory of Adult Age Differences in Cognition. In: *Psychological review* 103 (3), S. 403–428.
- Sanides, F. (1962): Die Architektur des Menschlichen Stirnhirns. Zugleich eine Darstellung der Prinzipien seiner Gestaltung als Spiegel der Stammesgeschichtlichen Differenzierung der Grosshirnrinde: Springer Berlin Heidelberg (Monographien aus dem Gesamtgebiete der Neurologie und Psychiatrie).
- Santi, Andrea; Grodzinsky, Yosef (2007): Working memory and syntax interact in Broca's area. In: *NeuroImage* 37 (1), S. 8–17. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.04.047.
- Santi, Andrea; Grodzinsky, Yosef (2010): fMRI adaptation dissociates syntactic complexity dimensions. In: *NeuroImage* 51 (4), S. 1285–1293. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.03.034.
- Saur, Dorothee; Kreher, Björn W.; Schnell, Susanne; Kümmerer, Dorothee; Kellmeyer, Philipp; Vry, Magnus-Sebastian; Umarova, Roza; Musso, Mariachristina; Glauche, Volkmar; Abel, Stefanie; Huber, Walter; Rijntjes, Michel; Hennig, Jürgen; Weiller, Cornelius (2008): Ventral and dorsal pathways for language. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the*

United States of America 105 (46), S. 18035–18040. Online verfügbar unter www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0805234105.

Scheef, Lukas; Boecker, Henning; Daamen, Marcel; Fehse, Ursula; Landsberg, Martin W.; Granath, Dirk-Oliver; Mechling, Heinz; Effenberg, Alfred O. (2009): Multimodal motion processing in area V5/MT. Evidence from an artificial class of audio-visual events. In: *Brain research* 1252, S. 94–104. DOI: 10.1016/j.brainres.2008.10.067.

Schendan, Haline E.; Searl, Meghan M.; Melrose, Rebecca J.; Stern, Chantal E. (2003): An fMRI Study of the Role of the Medial Temporal Lobe in Implicit and Explicit Sequence Learning. In: *Neuron* 37 (6), S. 1013–1025. DOI: 10.1016/S0896-6273(03)00123-5.

Seghier, Mohamed L. (2013): The angular gyrus. Multiple functions and multiple subdivisions. In: *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry* 19 (1), S. 43–61. DOI: 10.1177/1073858412440596.

Siebenthal, Zorina von; Boucher, Olivier; Rouleau, Isabelle; Lassonde, Maryse; Lepore, Franco; Nguyen, Dang K. (2017): Decision-making impairments following insular and medial temporal lobe resection for drug-resistant epilepsy. In: *Social cognitive and affective neuroscience* 12 (1), S. 128–137. DOI: 10.1093/scan/nsw152.

Simon, Jessica R.; Howard, James H.; Howard, Darlene V. (2011): Age differences in implicit learning of probabilistic unstructured sequences. In: *The journals of gerontology. Series B, Psychological sciences and social sciences* 66 (1), S. 32–38. DOI: 10.1093/geronb/gbq066.

Smith, J.; Siegert, R. J.; McDowall, J.; Abernethy, D. (2001): Preserved implicit learning on both the serial reaction time task and artificial grammar in patients with Parkinson's disease. In: *Brain and cognition* 45 (3), S. 378–391. DOI: 10.1006/brcg.2001.1286.

Snijders, Tineke M.; Vosse, Theo; Kempen, Gerard; van Berkum, Jos J. A.; Petersson, Karl Magnus; Hagoort, Peter (2009): Retrieval and unification of syntactic structure in sentence comprehension. An fMRI study using word-category ambiguity. In: *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)* 19 (7), S. 1493–1503. DOI: 10.1093/cercor/bhn187.

Squire, L. R.; Knowlton, B.; Musen, G. (1993): The structure and organization of memory. In: *Annual review of psychology* 44, S. 453–495. DOI: 10.1146/annurev.ps.44.020193.002321.

Squire, L. R.; Zola-Morgan, S. (1991): The medial temporal lobe memory system. In: *Science* 253 (5026), S. 1380–1386. DOI: 10.1126/science.1896849.

Stanislaw, Harold; Todorov, Natasha (1999): Calculation of signal detection theory measures. In: *Behavior Research Methods, Instruments & Computers* 31 (1), S. 137–149.

Stocker, Johannes Philipp (noch nicht veröffentlicht): Der Einfluss des initialen Lernerfolgs auf die neuronale Repräsentation der Syntax. Dissertation. Albert-Ludwigs Universität, Freiburg i. Br. Neurologische Universitätsklinik.

Stoeckel, Cornelia; Gough, Patricia M.; Watkins, Kate E.; Devlin, Joseph T. (2009): Supramarginal gyrus involvement in visual word recognition. In: *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior* 45 (9), S. 1091–1096. DOI: 10.1016/j.cortex.2008.12.004.

Strange, B. A. (2001): Anterior Prefrontal Cortex Mediates Rule Learning in Humans. In: *Cerebral Cortex* 11 (11), S. 1040–1046. DOI: 10.1093/cercor/11.11.1040.

Strange, B. A.; Fletcher, P. C.; Henson, R. N. A.; Friston, K. J.; Dolan, R. J. (1999): Segregating the functions of human hippocampus. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96 (7), S. 4034–4039. DOI: 10.1073/pnas.96.7.4034.

Tettamanti, Marco; Weniger, Dorothea (2006): Broca's Area. A Supramodal Hierarchical Processor? In: *Cortex* 42 (4), S. 491–494. DOI: 10.1016/S0010-9452(08)70384-8.

Tomasello, Michael (1992): First verbs. A case study of early grammatical development. Transf. to digital print. Cambridge: Cambridge Univ. Press.

Tomasello, Michael (2012): *Cognitive Linguistics and First Language Acquisition* - Oxford Handbooks: Oxford University Press.

Tsapkini, Kyra; Frangakis, Constantine E.; Hillis, Argye E. (2011): The function of the left anterior temporal pole. Evidence from acute stroke and infarct volume. In: *Brain : a journal of neurology* 134 (Pt 10), S. 3094–3105. DOI: 10.1093/brain/awr050.

Uddén, Julia; Folia, Vasiliki; Forkstam, Christian; Ingvar, Martin; Fernandez, Guillen; Overeem, Sebastiaan; van Elswijk, Gijs; Hagoort, Peter; Petersson, Karl Magnus (2008): The inferior frontal cortex in artificial syntax processing. An rTMS study. In: *Brain research* 1224, S. 69–78. DOI: 10.1016/j.brainres.2008.05.070.

Uddén, Julia; Ingvar, Martin; Hagoort, Peter; Petersson, Karl Magnus (2017): Broca's region. A causal role in implicit processing of grammars with crossed non-adjacent dependencies. In: *Cognition* 164, S. 188–198. DOI: 10.1016/j.cognition.2017.03.010.

Ueno, Taiji; Saito, Satoru; Rogers, Timothy T.; Lambon Ralph, Matthew A. (2011): Lichtheim 2. Synthesizing aphasia and the neural basis of language in a neurocomputational model of the dual dorsal-ventral language pathways. In: *Neuron* 72 (2), S. 385–396. DOI: 10.1016/j.neuron.2011.09.013.

Ullman, Michael T. (2001): The neural basis of lexicon and grammar in first and second language. The declarative/procedural model. In: *Bilingualism* 4 (02). DOI: 10.1017/S1366728901000220.

Ullman, Michael T. (2004): Contributions of memory circuits to language. The declarative/procedural model. In: *Cognition* 92 (1-2), S. 231–270. DOI: 10.1016/j.cognition.2003.10.008.

Umarova, Roza M.; Saur, Dorothee; Schnell, Susanne; Kaller, Christoph P.; Vry, Magnus-Sebastian; Glauche, Volkmar; Rijntjes, Michel; Hennig, Jürgen; Kiselev, Valerij; Weiller, Cornelius (2010): Structural connectivity for visuospatial attention. Significance of ventral pathways. In: *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)* 20 (1), S. 121–129. DOI: 10.1093/cercor/bhp086.

Viegas, Jennifer (2018): Profile of Michael Tomasello. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (34), S. 8466–8468. DOI: 10.1073/pnas.1812244115.

Volz, Kirsten G.; Schubotz, Ricarda I.; Cramon, D. Yves von (2005): Variants of uncertainty in decision-making and their neural correlates. In: *Brain research bulletin* 67 (5), S. 403–412. DOI: 10.1016/j.brainresbull.2005.06.011.

Vries, Meinou H. de; Monaghan, Padraic; Knecht, Stefan; Zwitserlood, Pienie (2008): Syntactic structure and artificial grammar learning. The learnability of embedded hierarchical structures. In: *Cognition* 107 (2), S. 763–774. DOI: 10.1016/j.cognition.2007.09.002.

Vries, Meinou H. de; Petersson, Karl Magnus; Geukes, Sebastian; Zwitserlood, Pienie; Christiansen, Morten H. (2012): Processing multiple non-adjacent dependencies. Evidence from sequence learning. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 367 (1598), S. 2065–2076. DOI: 10.1098/rstb.2011.0414.

Vries, Meinou H. de; Ulte, Catrin; Zwitserlood, Pienie; Szymanski, Barbara; Knecht, Stefan (2010): Increasing dopamine levels in the brain improves feedback-based procedural learning in healthy participants. An artificial-grammar-learning experiment. In: *Neuropsychologia* 48 (11), S. 3193–3197. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.024.

Vry, Magnus-Sebastian; Saur, Dorothee; Rijntjes, Michel; Umarova, Roza; Kellmeyer, Philipp; Schnell, Susanne; Glauche, Volkmar; Hamzei, Farsin; Weiller, Cornelius (2012): Ventral and dorsal fiber systems for imagined and executed movement. In: *Experimental brain research* 219 (2), S. 203–216. DOI: 10.1007/s00221-012-3079-7.

Wagner, Andreas (2016): Hirnplastizität beim erfolgreichen Erlernen syntaktischer Regeln: eine fMRT-Studie. Dissertation. Albert-Ludwigs Universität, Freiburg i. Br. Neurologische Universitätsklinik.

Weiller, Cornelius; Bormann, Tobias; Saur, Dorothee; Musso, Mariachristina; Rijntjes, Michel (2011): How the ventral pathway got lost. And what its recovery might mean. In: *Brain and language* 118 (1-2), S. 29–39. DOI: 10.1016/j.bandl.2011.01.005.

Weiller, Cornelius; Musso, Mariachristina; Rijntjes, Michel; Saur, Dorothee (2009): Please don't underestimate the ventral pathway in language. In: *Trends in Cognitive Sciences* 13 (9), S. 368–369. DOI: 10.1016/j.tics.2009.07.003.

Westphal-Fitch, Gesche; Giustolisi, Beatrice; Cecchetto, Carlo; Martin, Jordan S.; Fitch, W. Tecumseh (2018): Artificial Grammar Learning Capabilities in an Abstract Visual Task Match Requirements for Linguistic Syntax. In: *Frontiers in psychology* 9, S. 1210. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.01210.

Wilcox, Rand R. (2012): Introduction to robust estimation and hypothesis testing. 3. ed. Amsterdam: Elsevier/Academic Press (Statistical Modeling and Decision Science). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10521171>.

Wilson, Stephen M.; Galantucci, Sebastiano; Tartaglia, Maria Carmela; Rising, Kindle; Patterson, Dianne K.; Henry, Maya L.; Ogar, Jennifer M.; DeLeon, Jessica; Miller, Bruce L.; Gorno-Tempini, Maria Luisa (2011): Syntactic processing depends on dorsal language tracts. In: *Neuron* 72 (2), S. 397–403. DOI: 10.1016/j.neuron.2011.09.014.

Zaccarella, E.; Friederici, A. D. (2017): The neurobiological nature of syntactic hierarchies. In: *Neuroscience and biobehavioral reviews* 81 (Pt B), S. 205–212. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2016.07.038.

Zacks, Rose T.; Hasher, Lynn; Li, Karen Z.H. (2000): Human Memory. In: F. I. M. Craik und Timothy Salthouse (Hg.): *The handbook of aging and cognition*. 2nd ed. Mahwah, N.J., London: Lawrence Erlbaum Associates, S. 293–358.

Zimmerer, Vitor C.; Cowell, Patricia E.; Varley, Rosemary A. (2014): Artificial grammar learning in individuals with severe aphasia. In: *Neuropsychologia* 53, S. 25–38. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2013.10.014.

9. Anhang

9.1 Probanden mit 0-Runde

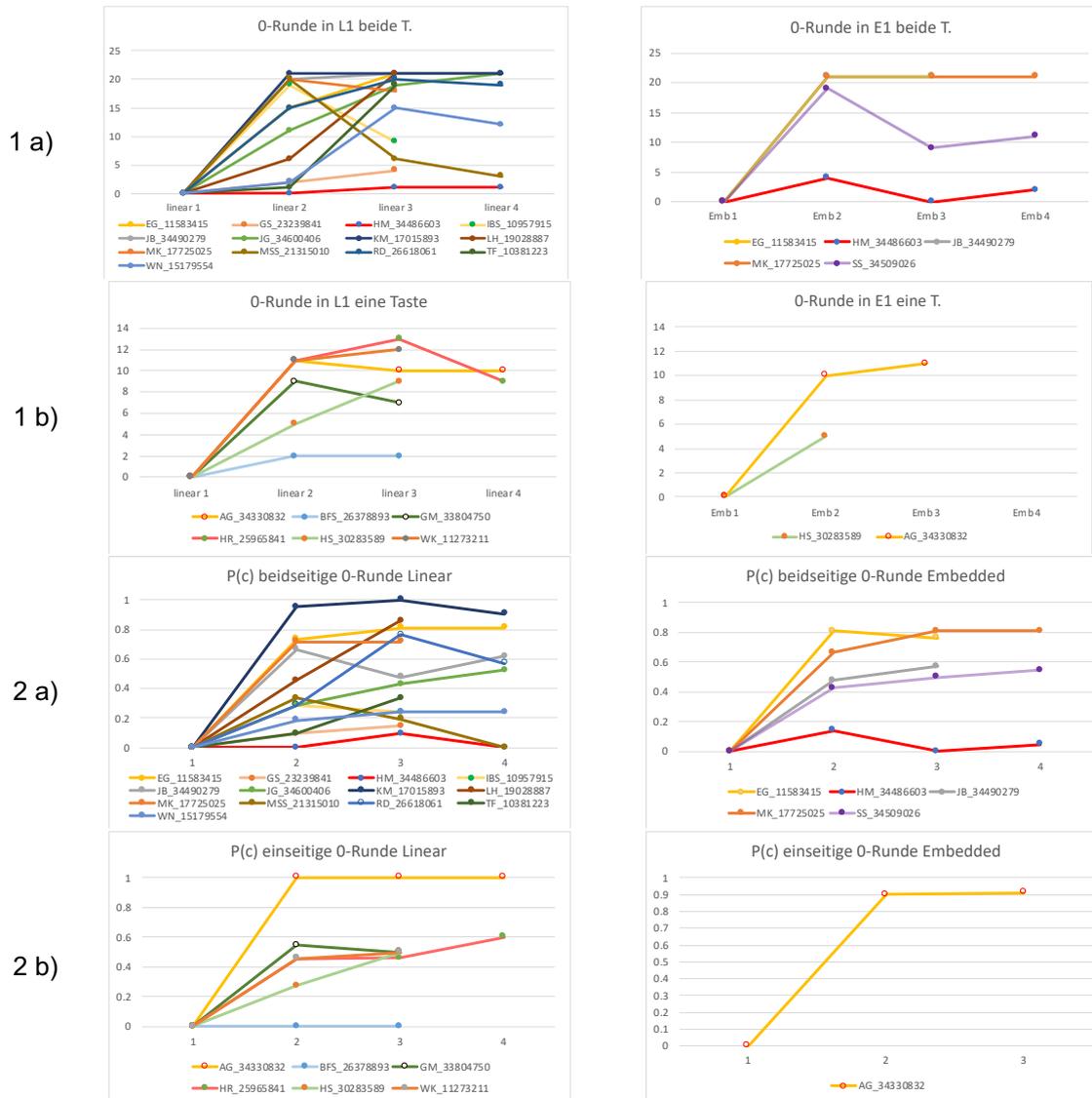


Abbildung 24: Antwortabgabe und Performanz bei Probanden mit 0-Runde und unterschiedlicher Tastenbenutzung

1 Antwortabgabe in Anzahl Klicks; 2 Performanz für jeweils

- c) Probanden mit beidseitiger Tastenbenutzung und b) einseitiger Tastenbenutzung. Es zeigt sich sowohl eine Zunahme der Klickanzahl sowie der Performanz für alle Probanden bis auf HM_34486603. Dieser Proband zeigte als einziger keine Steigerung.

9.2 Probanden mit überhöhter Antwortabgabe



Abbildung 25: Antwortabgabe und Performanz (unkorrigiert und korrigiert) für Probanden mit überhöhter Antwortabgabe

1 Antwortabgabe in Anzahl Klicks: Einige Probanden zeigten nur eine moderat erhöhte Antwortabgabe und wurden somit im Folgenden nicht weiter betrachtet. Probanden, welche eine konstant überhöhte Antwortabgabe zeigten, wurden in ihrer Performanz verglichen.

2

d) Unkorrigierte Performanz und

e) b) korrigierte Performanz für Probanden mit konstant überhöhter Antwortabgabe. Während sich in der nicht korrigierten Performanz die erhöhte Klickanzahl in einer deutlich besseren Leistung niederschlägt, wird dies durch die korrigierte Performanz vermindert.

9.3 Subgruppe Session 3

Die Definition für die mittleren und schwachen Lerner erfolgte über die letzte reguläre Grammatikrunde (Session 3): Probanden, welche hier unterhalb des Zufallsniveaus (50%) blieben, zählten zu den schwachen Lernern. Die restlichen Probanden, welche zwar über 50% kamen, aber dennoch keine perfekte Performanz absolvierten, wurden in die Gruppe der mittleren Lerner eingeteilt.

Für diese Einteilung in mittlere und schlechte Lerner konnte für die beiden Grammatiken keine so eindeutige Zuordnung der Probanden erfolgen, wie für die perfekten Performern. Probanden, welche in der einen Grammatik eine mittlere Leistung erzielten, konnten in der anderen teilweise nur eine schlechte Leistung erreichen sowie umgekehrt. In der Gruppe der *schlechten Lerner* ergab sich damit für die FSG eine Gruppengröße von $n=32$, für die PSG hingegen nur $n=20$. 9 Probanden zählten jeweils in beiden Grammatiken zu den schlechten Lernern. In der Gruppe der mittleren Lerner ergab sich eine Gruppengröße von $n=28$ für FSG und $n=28$ für PSG mit 13 Probanden, welche jeweils für beide Grammatiken in diese Gruppe zählten.

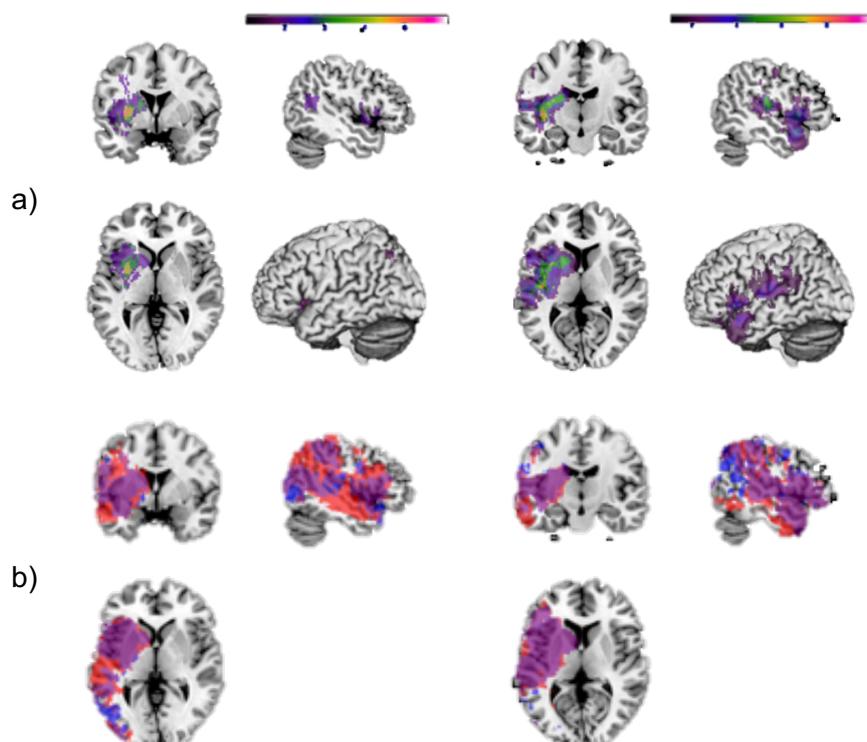


Abbildung 26: Overlaps S3 für links: schwache Lerner (<Chance), rechts: mittlere Lerner (>Chance, aber nicht perfekt)
 a) Probanden, welche der jeweiligen Gruppe in FSG und PSG angehörten und

b) FSG und PSG jeweils getrennt

Schwache Lerner zeigten das Maximum der Läsionen im Bereich der weißen Substanz (Capsula externa) und der Basalganglien (Putamen). Obwohl sich im Gesamt-overlap b) eine Schnittmenge für die lineare als auch die eingebettete Grammatik über der F3op zeigt, weisen Probanden, welche für beide Grammatiken schwache Lerner darstellten, keinerlei Schädigung im Bereich des IFG auf.

Mittlere Lerner (Performanz in Session 3 >0,5) zeigten das Maximum im Bereich der posterioren Insula mit einer Ausdehnung über die F3op.

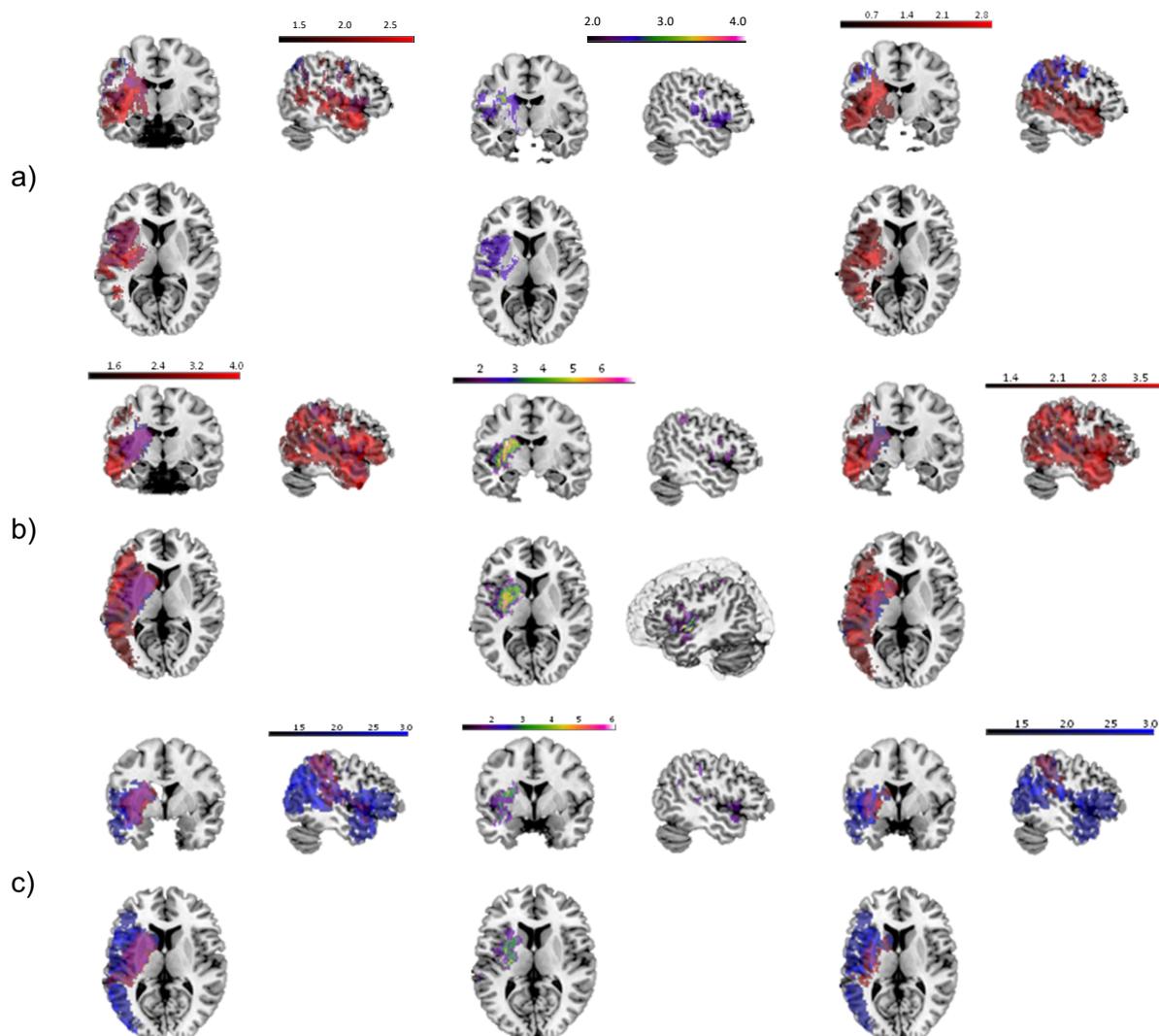
9.4 Subgruppe Session 1

Abbildung 27: Overlaps der Probanden in Session 1 mit a) 0-Runde b) <Chance c) >Chance
Links: Vergleich aller Probanden der jeweiligen Gruppe in FSG (rot) zu PSG (blau),
Mitte: Probanden, welche der Gruppe sowohl für FSG als auch PSG zugeordnet werden konnten,
rechts: Läsionen ohne die Probanden aus FSG und PSG (Mitte)

Es zeigen sich für alle 3 Gruppen Ausdehnungen der Läsionen über dem IFG, sodass hier davon ausgegangen werden kann, dass dieser zumindest für die initiale Einschätzung keine Bedeutung hat und erst für den Lernprozess relevant wird.

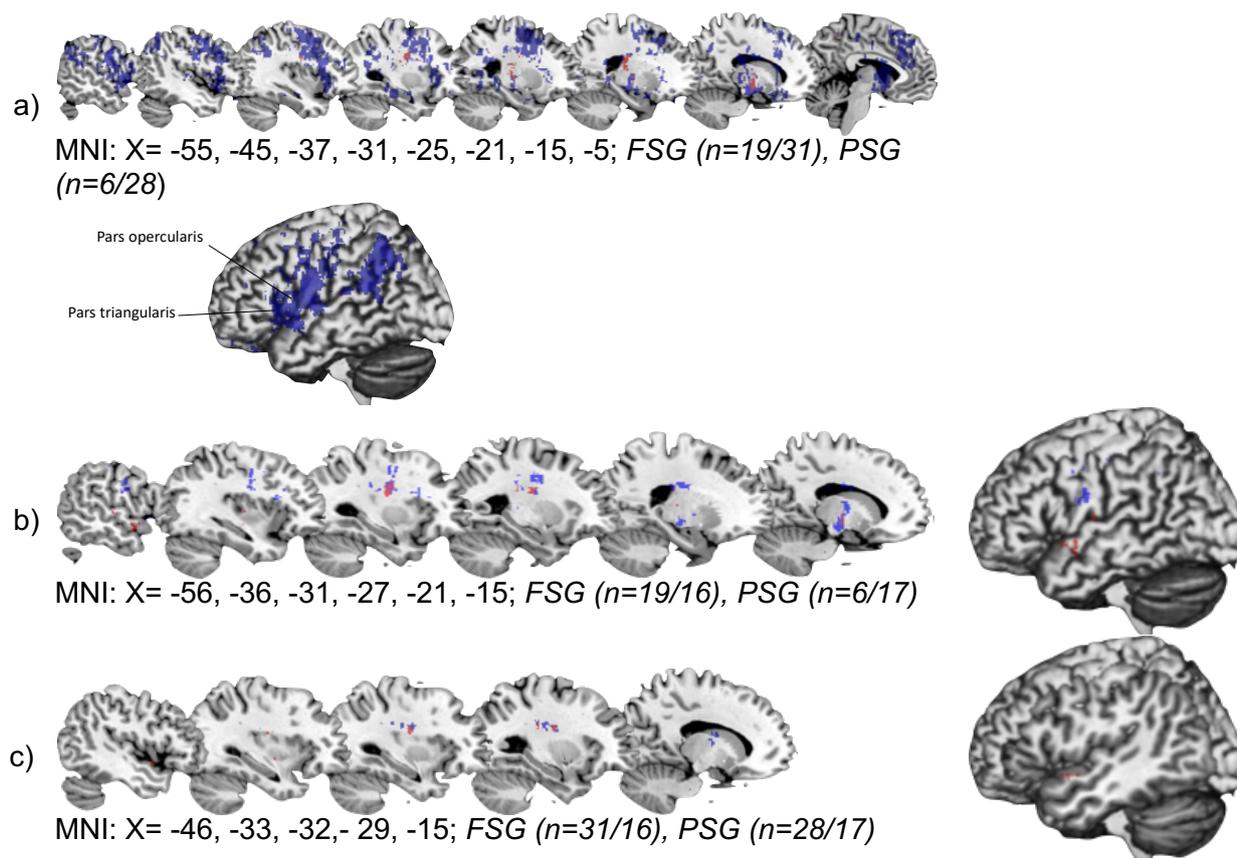
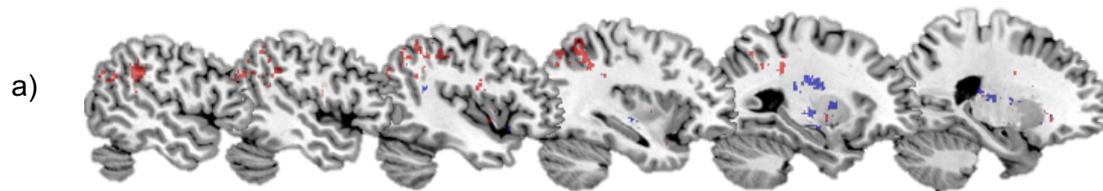


Abbildung 28: Liebermeister Tests des Subgruppen S1 (FSG in rot, PSG in blau)

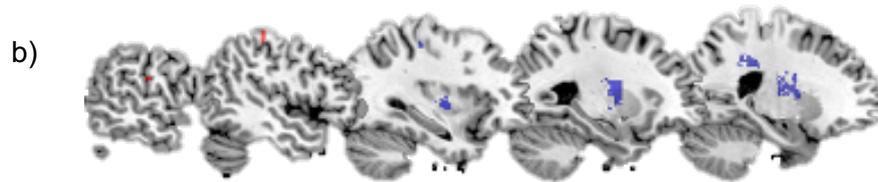
- a) **0-Runde vs. <Chance:** Der Vergleich zeigt hier selektiv für PSG eine Assoziation der 0-Runde in Session 1 mit Teilen des IFGs und des posterioren STG und Gyrus supramarginalis verknüpft. FSG zeigte sich hauptsächlich mit Arealen der weißen Hirnmasse sowie gering mit Teilen des Thalamus verbunden.
- b) **0-Runde vs. >Chance:** Beide Grammatiken zeigen vorrangig Voxel im Bereich der weißen Hirnmasse mit einer sehr schlechten Anfangsleistung assoziiert. Die Beteiligung des Thalamus für FSG verschwindet beinahe vollständig. Es zeigt sich für beide Grammatiken keine Beteiligung des IFG oder des post. STGs.
- c) **0-Runde oder <Chance vs. >Chance:** zeigt ein ähnliches Bild wie der Vergleich von Probanden </>Chance ohne die Probanden der 0-Runde. Signifikante Datenpunkte zeigen sich auch hier im Bereich der weißen Hirnsubstanz sowie des Ncl. caudatus

9.5 Subgruppe Aphasiker

T0

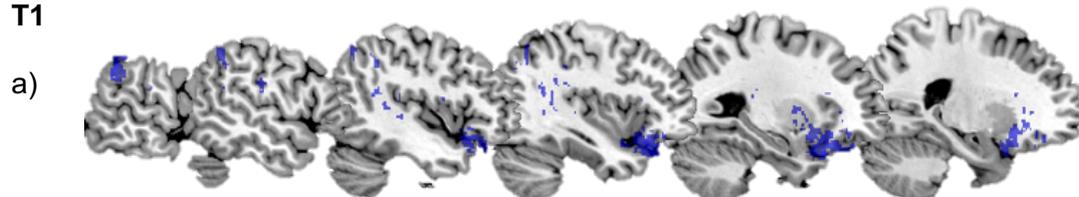


MNI-Koordinaten: -51, -48, -43, -35 -28, -22

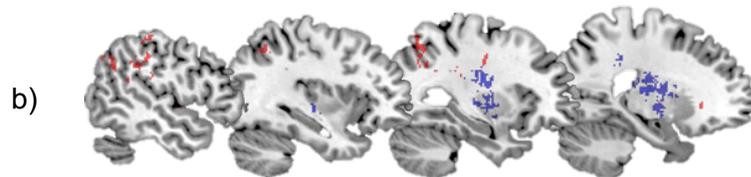


MNI-Koordinaten: -57, -48, -33, -27, -22

T1



MNI-Koordinaten: -61, -53, -44, -38, -28, -22



MNI-Koordinaten: -50, -36, -30, -22

Abbildung 29: Liebermeister Test (Lerner/ Nicht-Lerner) Aphasiker und Nicht-Aphasiker in T0 und T1

a) Aphasiker b) Nicht-Aphasiker

Die dargestellten Läsionen zeigen hier sehr ähnliche Muster zu der des BM Tests unter Abs. 3.2.4.2

9.6 Modelle S. Kirsch

Basic Model (Model0): Condition * Session

Logistic Regression (Correctness estimation)

```
## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: binomial ( logit )
## Formula: Correct ~ condition * TrainingSession + (1 | Subject)
## Data: co_dat
##
##      AIC      BIC   logLik deviance df.resid
## 6495.8  6528.3  -3242.9  6485.8    4843
##
## Scaled residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.4271 -1.0080  0.5662  0.9133  1.5461
##
## Random effects:
## Groups Name          Variance Std.Dev.
## Subject (Intercept) 0.336     0.5797
## Number of obs: 4848, groups: Subject, 68
##
## Fixed effects:
##
##              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
## (Intercept)    -0.17956   0.11551  -1.554   0.1201
## condition[S.Embedded] -0.17885   0.08929  -2.003   0.0452
## TrainingSession  0.16494   0.03916   4.212 2.53e-05
## condition[S.Embedded]:TrainingSession 0.04567   0.03879   1.177   0.2390
##
## (Intercept)
## condition[S.Embedded] *
## TrainingSession ***
## condition[S.Embedded]:TrainingSession
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Correlation of Fixed Effects:
##              (Intr) cn[S.E] TrnngS
## cndtn[S.Em] -0.082
## TrainngSsn -0.730  0.094
## cnd[S.E]:TS  0.072 -0.935 -0.066
```

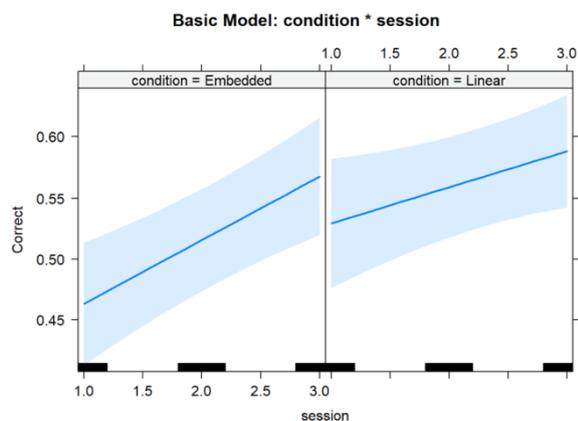


Abbildung 30: Basis Modell

Es konnte ein positiver Einfluss der Anzahl Runden sowie ein geringer, negativer Einfluss von PSG auf die Korrektheit der gegebenen Antworten festgestellt werden.

Model1: Condition * Session * Aphasia T0

Logistic Regression (Correctness estimation)

```
## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: binomial ( logit )
## Formula: Correct ~ condition * TrainingSession * AphasiaT0 + (1 | Subject)
## Data: co_dat
## Control: glmerControl(optimizer = "bobyqa")
##
##      AIC      BIC  logLik deviance df.resid
## 6502.8  6561.1 -3242.4  6484.8    4839
##
## Scaled residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.4320 -1.0139  0.5680  0.9226  1.5708
##
## Random effects:
##  Groups Name          Variance Std.Dev.
## Subject (Intercept) 0.3366   0.5801
## Number of obs: 4848, groups: Subject, 68
##
## Fixed effects:
##
##              Estimate Std. Error
## (Intercept)    -0.182831   0.124903
## condition[S.Embedded] -0.145715   0.097118
## TrainingSession    0.164439   0.042555
## AphasiaT0[S.1]     0.019127   0.124905
## condition[S.Embedded]:TrainingSession 0.035318   0.042075
## condition[S.Embedded]:AphasiaT0[S.1] -0.083533   0.097143
## TrainingSession:AphasiaT0[S.1] -0.002155   0.042536
## condition[S.Embedded]:TrainingSession:AphasiaT0[S.1] 0.025599   0.042081
##
##              z value Pr(>|z|)
## (Intercept)    -1.464 0.143252
## condition[S.Embedded] -1.500 0.133514
## TrainingSession    3.864 0.000111 ***
## AphasiaT0[S.1]     0.153 0.878293
## condition[S.Embedded]:TrainingSession 0.839 0.401237
## condition[S.Embedded]:AphasiaT0[S.1] -0.860 0.389843
## TrainingSession:AphasiaT0[S.1] -0.051 0.959586
## condition[S.Embedded]:TrainingSession:AphasiaT0[S.1] 0.608 0.542972
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Correlation of Fixed Effects:
##      (Intr) cn[S.E] TrnngS AT0[S. cn[S.E]:TS c[S.E]:A TS:AT0
## cndtn[S.Em] -0.057
## TrainngSsn -0.738  0.063
## AphasT0[S.1] -0.378 -0.004  0.292
## cnd[S.E]:TS  0.053 -0.936 -0.041 -0.001
## c[S.E]:AT0[ -0.004 -0.391  0.009 -0.058  0.366
## TS:AT0[S.1]  0.293  0.008 -0.390 -0.738 -0.011  0.063
## c[S.E]:TS:A -0.001  0.365 -0.012  0.054 -0.386 -0.937 -0.041
```

Abbildung 31: Einfluss der Aphasie in T0

Hier konnte, außer dem bereits bekannten positiven Effekt der Sessions, kein weiterer Einfluss festgestellt werden.

Model2: Condition * Session * Aphasia T1

Logistic Regression (Correctness estimation)

```
## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: binomial ( logit )
## Formula: Correct ~ condition * TrainingSession * AphasiaT1 + (1 | Subject)
## Data: co_dat
## Control: glmerControl(optimizer = "bobyqa")
##
##           AIC      BIC  logLik deviance df.resid
##    6344.6   6402.8  -3163.3   6326.6     4738
##
## Scaled residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.5170 -0.9914  0.5683  0.9111  1.5690
##
## Random effects:
##  Groups Name          Variance Std.Dev.
## Subject (Intercept) 0.355     0.5958
## Number of obs: 4747, groups: Subject, 65
##
## Fixed effects:
##
##              Estimate Std. Error
## (Intercept)      -0.04971    0.13491
## condition[S.Embedded] -0.16767    0.10470
## TrainingSession      0.09687    0.04536
## AphasiaT1[S.1]      0.29404    0.13493
## condition[S.Embedded]:TrainingSession 0.03996    0.04502
## condition[S.Embedded]:AphasiaT1[S.1] -0.02499    0.10468
## TrainingSession:AphasiaT1[S.1]      -0.16511    0.04533
## condition[S.Embedded]:TrainingSession:AphasiaT1[S.1] 0.01237    0.04502
##
##              z value Pr(>|z|)
## (Intercept)      -0.368  0.71253
## condition[S.Embedded] -1.601  0.10928
## TrainingSession      2.136  0.03271 *
## AphasiaT1[S.1]      2.179  0.02932 *
## condition[S.Embedded]:TrainingSession  0.888  0.37480
## condition[S.Embedded]:AphasiaT1[S.1] -0.239  0.81133
## TrainingSession:AphasiaT1[S.1]      -3.642  0.00027 ***
## condition[S.Embedded]:TrainingSession:AphasiaT1[S.1]  0.275  0.78343
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Correlation of Fixed Effects:
##      (Intr) cn[S.E] TrnngS AT1[S. cn[S.E]:TS c[S.E]:A TS:AT1
## cndtn[S.Em] -0.101
## TrainngSsn -0.724  0.122
## AphsT1[S.1]  0.472 -0.048 -0.346
## cnd[S.E]:TS  0.088 -0.934 -0.094  0.041
## c[S.E]:AT1[ -0.048  0.501  0.063 -0.100 -0.458
## TS:AT1[S.1] -0.347  0.063  0.480 -0.724 -0.046  0.122
## c[S.E]:TS:A  0.041 -0.458 -0.046  0.088  0.484 -0.934 -0.094
```

Abbildung 32: Einfluss der Aphasie T1

Die Aphasie zum Zeitpunkt T1 scheint einen signifikant negativen Einfluss auf die Zunahme der Korrektheit der abgegebenen Antworten mit steigender Rundenanzahl, unabhängig von der Grammatik, zu haben. Dies bestätigt nochmals die unter Abs. 4.6 diskutierten Ergebnisse.

```

Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace Approximation) ['glmerMod']
Family: binomial ( logit )
Formula: Correct ~ condition * TrainingSession * scale(Age) + (1 | Subject)
Data: co_dat

      AIC      BIC    logLik deviance df.resid
 6497.9  6556.3  -3240.0  6479.9    4839

Scaled residuals:
   Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.6583 -1.0006  0.5655  0.9122  1.5076

Random effects:
 Groups Name      Variance Std.Dev.
 Subject (Intercept) 0.321    0.5666
Number of obs: 4848, groups: Subject, 68

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   -0.200225   0.115057  -1.740   0.0818 .
condition[S.Embedded]
-0.185596     0.089835  -2.066   0.0388 *
TrainingSession
 0.174339     0.039431   4.421  9.81e-06 ***
scale(Age)
-0.006709     0.114877  -0.058   0.9534
condition[S.Embedded]:TrainingSession
 0.050437     0.039043   1.292   0.1964
condition[S.Embedded]:scale(Age)
 0.164022     0.089396   1.835   0.0665 .
TrainingSession:scale(Age)
-0.031404     0.039493  -0.795   0.4265
condition[S.Embedded]:TrainingSession:scale(Age)
-0.081367     0.039052  -2.084   0.0372 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Abbildung 33: Einfluss des Alters

Zunehmendes Alter scheint insbesondere für PSG einen negativen Einfluss auf die Zunahme korrekter Einschätzungen zu haben.

Model3: condition * session * educational age

Logistic Regression (Correctness estimation)

```
## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: binomial ( logit )
## Formula:
## Correct ~ condition * TrainingSession * scale_edAge + (1 | Subject)
## Data: co_dat
## Control: glmerControl(optimizer = "bobyqa")
##
##      AIC      BIC   logLik deviance df.resid
## 6465.0  6523.3 -3223.5  6447.0    4839
##
## Scaled residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.6423 -0.9931  0.5040  0.9166  1.4661
##
## Random effects:
## Groups Name          Variance Std.Dev.
## Subject (Intercept) 0.2402   0.4901
## Number of obs: 4848, groups: Subject, 68
##
## Fixed effects:
##
##              Estimate Std. Error
## (Intercept)    -0.21167   0.10926
## condition[S.Embedded] -0.20214   0.08947
## TrainingSession    0.18471   0.03951
## scale_edAge     -0.11426   0.11131
## condition[S.Embedded]:TrainingSession 0.05890   0.03907
## condition[S.Embedded]:scale_edAge -0.10513   0.08809
## TrainingSession:scale_edAge 0.19134   0.04021
## condition[S.Embedded]:TrainingSession:scale_edAge 0.04758   0.03976
##
## z value Pr(>|z|)
## (Intercept)    -1.937   0.0527 .
## condition[S.Embedded] -2.259   0.0239 *
## TrainingSession    4.675 2.94e-06 ***
## scale_edAge     -1.026   0.3047
## condition[S.Embedded]:TrainingSession 1.507   0.1317
## condition[S.Embedded]:scale_edAge -1.193   0.2327
## TrainingSession:scale_edAge 4.759 1.95e-06 ***
## condition[S.Embedded]:TrainingSession:scale_edAge 1.197   0.2314
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Correlation of Fixed Effects:
##      (Intr) cn[S.E] TrnngS scl_dA cn[S.E]:TS c[S.E]:_ TrS:_A
## cndtn[S.Em] -0.077
## TrainngSssn -0.774  0.081
## scale_edAge  0.047  0.066 -0.057
## cnd[S.E]:TS  0.065 -0.935 -0.051 -0.059
## cnd[S.E]:_A  0.066  0.047 -0.071 -0.040 -0.056
## TrnngSss:_A -0.058 -0.070  0.086 -0.753  0.070    0.039
## c[S.E]:TS:_ -0.057 -0.054  0.069  0.032  0.074   -0.931  -0.012
```

Abbildung 34: Einfluss des Bildungsalters

Wie bereits durch die unter Abs. dargestellten Ergebnisse vermutet, konnte hier der positive Einfluss des Bildungsalters auf die Zunahme korrekter Antworten gezeigt werden.

10. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegenbringen, ohne deren Hilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Weiller, für die Betreuung dieser Arbeit sowie die freundliche Unterstützung und der Gelegenheit, bei einem solch interessanten Themengebiet wissenschaftlich mitarbeiten zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. Musso für die Betreuung dieser Arbeit, der freundlichen Hilfe und der mannigfachen Ideengebung, welche die Auseinandersetzung mit der Thematik in vielfacher Hinsicht bereicherten. Die zahlreichen Gespräche, auch außerhalb des ohnehin vollen Terminkalenders, werden mir als wertvoller Austausch, Inspiration und weitere Motivation in bester Erinnerung bleiben.

Ich danke zudem Herrn Prof. Urbach für die hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Des Weiteren danke ich Simon Kirsch für die Bereitstellung und Überlassung notwendiger Dokumente sowie für die wissenschaftliche Zusammenarbeit über das Ausmaß dieser Dissertation hinaus.

Ferner möchte ich mich bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern, insbesondere Frau Dr. Kümmerer und Herrn Glauche, bedanken, welche mir stets bei fachlichen Problemen zur Seite standen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, welche mich durch diese nervenaufreibende Zeit und meinem Weg durch mein Studium begleitet haben.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Verwandten, Freunden und Studienkollegen, die mich auch in schwierigen Zeiten unterstützt und immer wieder aufgeheitert haben. Dies war stets ein großer Rückhalt für mich, der als wichtiger Teil zum Erfolg meines Studiums beigetragen hat.

11. Lebenslauf

Die Seite 131 (Lebenslauf) enthält persönliche Daten. Sie ist deshalb nicht Bestandteil der Veröffentlichung.

Anlage 2

Zum Antrag auf Zulassung zur Promotion

Zum Dr. _____
(med. / med.dent.)

(Name) (Vorname)

Eidesstattliche Versicherung

gemäß § 8 Absatz 1 Nr. 3 der Promotionsordnung der Universität Freiburg für die Medizinische Fakultät

1. Bei der eingereichten Dissertation zu dem Thema

handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.

2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner unzulässigen Hilfe Dritter bedient. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.
3. Die Ordnung der Albert-Ludwigs-Universität zur Sicherung der Redlichkeit in der Wissenschaft habe ich zur Kenntnis genommen und akzeptiert
4. Die Dissertation oder Teile davon habe ich
(Zutreffendes bitte ankreuzen)
 - bislang nicht an einer Hochschule des In- oder Auslands als Bestandteil einer Prüfungs- oder Qualifikationsleistung vorgelegt.
 - wie folgt an einer Hochschule des In- oder Auslands als Bestandteil einer Prüfungs- oder Qualifikationsleistung vorgelegt:

Titel der andernorts vorgelegten Arbeit:

Name der betreffenden Hochschule:

Jahr der Vorlage der Arbeit:

Art der Prüfungs- oder Qualifikationsleistung:

5. Die Richtigkeit der vorstehenden Erklärungen bestätige ich.
6. Die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt.

Ich versichere an Eides statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erklärt und nichts verschwiegen habe.

Ort und Datum

Unterschrift

Erklärung zum Eigenanteil der Dissertationsschrift

Die Arbeit wurde in der Klinik für Neurologie und Neurophysiologie des Universitätsklinikums Freiburg im Breisgau unter Betreuung von Prof. C. Weiller durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch Frau Dr. Mariachristina Musso.

Die Testung der neu rekrutierten Probanden und deren Datenerhebung wurden von mir eigenständig durchgeführt; 19 Datensätze der 68 eingeschlossenen Probanden lagen bereits vor. Klinische Daten sowie die normalisierten Läsionen wurden im Rahmen des Large Scale Projekts erfasst und mir freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Die statistische Auswertung erfolgte eigenständig nach Beratung durch das Institut für Medizinische Biometrie und Statistik. Eine Aufarbeitung des Rohdatensatzes sowie die Erarbeitung der statistischen Modelle im Anhang erfolgte in Zusammenarbeit mit S. Kirsch.

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Teile dieser Arbeit werden für eine derzeit sich noch in Planung befindlichen Publikation verwendet; eine Ergänzung des Eigenanteils erfolgt nach Fertigstellung der Publikation.

Freiburg, den