



Der N400-Effekt – Diskussion von ereigniskorrelierten Potenzialen in der Sprachverarbeitung und der Versuch einer Elizitation des Effekts in einem EEG-Experiment

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Arts (M.A.)
im Studiengang
Angewandte Sprachwissenschaften

vorgelegt von Jennifer Graak
Matrikelnummer [REDACTED]

[REDACTED]

Erstgutachterin: Prof. Dr. Barbara Mertins
Zweitgutachterin: Dr. Renate Delucchi-Danhier

eingereicht am: 14.09.2020

Danksagung

Es war ein langer Weg von der Idee für diese Masterarbeit bis zu der nun vorliegenden schriftlichen Version. Und wie bei so vielen langen Projekten waren auch an der Arbeit, die auf den folgenden Seiten beschrieben ist, viele Menschen beteiligt, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Zuallererst bedanke ich mich bei dem gesamten Team der *psycholinguistics laboratories*, das die Entwicklung des EEG-Projekts mit offenen Augen und Ohren verfolgt hat. Ganz besonders hervorheben möchte ich jedoch meine Mitstreiterinnen der EEG-Projektgruppe – Kim Meitner, Elena Panfilova und Renate Delucchi-Danhier – ohne die diese Arbeit gar nicht möglich gewesen wäre. Ich bin dankbar, dass ich von ihrer Erfahrung profitieren durfte und mir in jeder noch so schwierigen Situation ihrer Unterstützung sicher sein konnte. Weiterhin danke ich Wolfgang Schmidt-Sielex, der uns bei der technischen Umsetzung unserer Ideen unverzichtbar war.

Zwei weitere Personen, die bei der Entwicklung des Experiments eine entscheidende Rolle gespielt haben, sind Prof. Dr. Barbara Mertins und Dr. Marie Gutberlet. Barbara Mertins hat unserem gesamten N400-Team wichtige Wegweisungen gegeben und mir ganz besonders bei der Erstellung dieser Arbeit einerseits eine enge Betreuung zukommen lassen, während sie mir andererseits ausreichend Freiheit in der Gestaltung gelassen hat. Bei Dr. Marie Gutberlet möchte ich mich für ihre Zeit bedanken, die sie uns geschenkt hat und in der wir von ihrer Expertise lernen konnten.

Was wäre eine experimentelle Studie jedoch ohne Probanden? Herzlichen Dank an all diejenigen, die sich als Versuchspersonen zur Verfügung gestellt haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich in den letzten Monaten auf vielfältige Weise unterstützt haben, indem sie das Geschriebene gelesen, korrigiert, kritisiert haben oder mir einfach mit motivierenden Worten zur Seite standen.

Dortmund, den 14.09.2020

I. Inhaltsverzeichnis

II. Abbildungsverzeichnis	iv
1 Einleitung.....	1
2 Ereigniskorrelierte Potenziale der Sprachverarbeitung	3
2.1 EEG und EKP.....	3
2.2 N400 vs. P600.....	4
2.2.1 N400 – Die semantische Komponente	5
2.2.2 P600 – Die syntaktische Komponente?	8
2.2.3 Sprachbezogene EKPs und ihre Bedeutung für Modelle der Sprachverarbeitung.....	12
3 Interpretation der EKPs im Lichte neuer Erkenntnisse	15
4 Zwischenfazit.....	21
5 Durchführung eines EEG-Experiments.....	24
5.1 Experimentdesign	24
5.1.1 Vorüberlegungen.....	24
5.1.2 Methoden – Kombination von EEG und ET	25
5.1.3 Stimuli	26
5.2 Durchführung.....	32
5.2.1 Probanden	32
5.2.2 Probandenvorbereitung und Aufbau des EEG-Aufnahmesystems.....	32
5.2.3 Ablauf.....	36
5.3 Auswertung	38
5.3.1 Technische Aspekte	39
5.3.2 Auswertung der Eye-Tracking-Daten in BeGaze	40
5.3.3 Analyse der EEG-Daten im BrainVision Analyzer	42
5.3.4 Ergebnisse.....	53
6 Reflexion des Projekts	55
7 Zusammenfassung und Ausblick	58
III. Literaturverzeichnis	v
IV. Anhangsverzeichnis.....	xi

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: EKPs für hochfrequente und niederfrequente Wörter an verschiedenen Satzpositionen	7
Abbildung 2: Neurokognitives Sprachverarbeitungsmodell nach Friederici.....	13
Abbildung 3: N400-Effekte als Reaktion auf kongruente bzw. inkongruente menschliche Handlungen sind besonders an frontalen Elektrodenpositionen sichtbar.	17
Abbildung 4: Sehwinkel bzw. scheinbare Größe entfernter Objekte berechnen	31
Abbildung 5: NeurOne-Setup.....	33
Abbildung 6: Impedanzmessung in NeurOne an den 32 Elektrodenpositionen	35
Abbildung 7: Zeitlicher Ablauf eines Trials.	36
Abbildung 8: Rohdaten der Aufnahme der EEG-Daten in NeurOne.....	38
Abbildung 9: Parameter der Raw Data Inspection.	43
Abbildung 10: Raw Data Inspection.....	44
Abbildung 11: Elektrodenpositionen und Kanalbelegung.....	45
Abbildung 12: Parameter der angewendeten Low Cutoff-, High Cutoff- und Notch-Filter.	46
Abbildung 13: Overlay der Daten vor (rot) und nach (schwarz) Anwendung der Filter	47
Abbildung 14: Blinzler sind besonders in der Nähe der Augen auffällig	48
Abbildung 15: Overlay vor (rot) und nach (schwarz) der Anwendung der Independent Component Analysis (ICA)	49
Abbildung 16: Grid View der kongruenten Segmente	50
Abbildung 17: Overlay vor (rot) und nach (schwarz) der Baseline Correction von ausgewählten Kanälen	51
Abbildung 18: Overlay all averages	53
Abbildung 19: Overlay all averages an der Cz-Elektrode	54

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit ist eine praktische Arbeit. Sie verfolgt das primäre Ziel, die Angehörigen des Teams der *psycholinguistics laboratories* der Technischen Universität Dortmund mit der Methode der Elektroenzephalographie vertraut zu machen, damit diese erfolgreich in zukünftigen Forschungsprojekten zum Einsatz kommen kann. Aus diesem Grund wurde ein bereits bekanntes Phänomen der Sprachverarbeitung – die N400-Komponente – genauer betrachtet und deren Elizitation in einem eigenen Experiment angestrebt.

Um einen Rahmen für dieses Vorhaben zu schaffen, wird im theoretischen Teil dieser Arbeit zunächst grob auf die Methode der Elektroenzephalographie (EEG) und die bereits untersuchten sprachbezogenen ereigniskorrelierten Potenziale (EKPs) eingegangen (Kapitel 2). Darin werden vor allem Studien zu der hier im Fokus stehenden N400-Komponente vorgestellt, bevor sie von anderen EKPs (P600, ELAN und LAN) abgegrenzt wird. Darüber hinaus werden die Implikationen der bereits durchgeführten Studien zu Hirnaktivitäten während der Sprachverarbeitung für die Modellierung ebendieser diskutiert.

In Kapitel 3 wird ein besonderes Augenmerk auf aktuellere Erkenntnisse bezüglich der Komponente, aber auch ihrer Beziehung zum P600-Effekt sowie EKPs generell, gelegt. Aufgrund dieser neueren Daten soll eine Neuinterpretation des N400-Effekts vollzogen werden, indem versucht wird, die Forschungsergebnisse aus fast 40 Jahren miteinander in Einklang zu bringen.

Nach einer kurzen Zusammenfassung der theoretischen Erkenntnisse (Kapitel 4) beginnt der praktische Teil dieser Arbeit, in dem die Durchführung des zuvor bereits erwähnten, eigenen Experiments dokumentiert wird. Die Entwicklung dieses Experiments basiert auf den Ergebnissen der Recherche, die im theoretischen Teil dieser Arbeit dargestellt sind. Bei der Beschreibung des praktischen Teils soll jeder Schritt betrachtet werden, sodass bereits die Vorüberlegungen, z. B. zur Methodik und der Entwicklung der Stimuli, wiedergegeben werden (Kapitel 5.1).

Daran anschließend folgt ein Tätigkeitsbericht, in dem hands-on die Durchführung eines EEG-Experiments beschrieben wird (Kapitel 5.2). Dabei geht es u. a. um die Vorbereitung der Probanden, die Nutzung des EEG-Geräts sowie die Präsentation der Stimuli mithilfe der Software *E-Prime*. Nachfolgend wird die Analyse der Ergebnisse, die mithilfe der Software *BrainVision Analyzer 2.0* durchgeführt wurde, dokumentiert (Kapitel 5.3).

Im Anschluss an die genaue Beschreibung der Verwendung der EKP-Methode soll das durchgeführte Projekt reflektiert und evaluiert werden (Kapitel 6). Dies dient der Erkenntnissicherung sowie der Wissensweitergabe, damit auch zukünftige Studien die EEG-Geräte nutzen und damit eigenen Forschungsfragen nachgehen können. Zu diesem Zweck werden auch jegliche Schwierigkeiten und Herausforderungen in den einzelnen Schritten der

Experimententwicklung und -durchführung thematisiert. An den Stellen, an denen eine Lösung gefunden wurde, werden die Workarounds geschildert.

Kapitel 7 dient letztendlich der gesamten Zusammenfassung der hier vorliegenden Arbeit. Es soll also ein Zusammenhang zwischen der theoretischen Annäherung an das Thema der ereigniskorrelierten Potenziale und der praktischen Arbeit hergestellt werden. Darüber hinaus wird die Methodik und ihre Anwendung in linguistischer Forschung auf einer Metaebene betrachtet und ein Ausblick für ihre Verwendung in zukünftigen Forschungen der *psycholinguistics laboratories* gegeben.

An dieser Stelle soll auf einige Aspekte hingewiesen werden, die für die gesamte hier vorliegende Arbeit Gültigkeit haben. Aufgrund des bereits angedeuteten explorativen Charakters der Arbeit, handelt es sich besonders bei dem Teil, der sich mit der praktischen Umsetzung des entwickelten Experiments auseinandersetzt, eher um einen Tätigkeitsbericht, der die getroffenen Entscheidungen darlegen und auf Basis wissenschaftlicher Literatur begründen soll. Die hier dargestellte Methodik soll für zukünftige EEG-Forschungsvorhaben als Orientierung und explizit gewünscht auch als Ausgangspunkt für Verbesserungen dienen. Mögliche Unvollständigkeiten, besonders im Bereich der Datenanalyse, sind u. a. auf die Tatsache zurückzuführen, dass es sich bei den hier thematisierten Vorgängen für alle Beteiligten um deren erste Erfahrungen mit der Methode der Elektroenzephalographie handelt und die geleistete Arbeit für sie daher ebenfalls als Erkenntnisgewinn und Lernphase angesehen werden muss.

Hinzu kamen einige rein praktische Komplikationen, die sich aus der während der Durchführung des Projekts herrschenden Covid-19-Krise ergeben haben. So mussten während der Aufnahmen beispielsweise zusätzliche Hygienemaßnahmen beachtet werden, deren Einfluss auf die Qualität der Signalaufzeichnungen nicht ermittelt werden konnte. Ebenso konnte in dieser Ausnahmesituation nicht eine größere Anzahl an Probanden eingeladen werden. Stattdessen wurde nur ein einzelner externer Proband aufgenommen. Wegen dieser Besonderheiten erfolgte die später beschriebene Analyse nicht explizit ergebnisorientiert, sondern lediglich modellhaft. Gleiches gilt für die Durchführung des einzelnen Durchlaufs, der zwar ebenso nur als beispielhaft anzusehen ist, allerdings vollständig und nach bestem Wissen und Gewissen – auch unter den verschärften Hygienemaßnahmen – durchgeführt wurde.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Folgenden das generische Maskulin verwendet, ohne dabei Angehörige anderer Geschlechter ausschließen zu wollen – sie sind, ganz im Gegenteil, ausdrücklich mit gemeint.

2 Ereigniskorrelierte Potenziale der Sprachverarbeitung

Sprachrezeption und Sprachproduktion sind hochkomplexe Abläufe, die tagtäglich unzählige Male in Sekundenbruchteilen stattfinden. Bei der Sprachverarbeitung, sei es von schriftlicher oder mündlicher Sprache, spielen Informationen aus – da sind sich die Wissenschaftler einig – mindestens drei Wissensbereichen eine Rolle: Semantik, Syntax und Phonologie (vgl. Friederici et al. 1993: 183). Doch welche Prozesse stecken hinter dem Gesamtkonzept Sprachverarbeitung? Welcher Teilbereich der Linguistik liefert welche Informationen? Und wann werden diese verschiedenen Hinweise integriert?

Auch wenn über die Jahre Einblicke in die kognitiven Mechanismen gewonnen werden konnten, so sind die heutzutage existierenden Modelle noch immer eine eher vage Abstraktion dessen, was sich bei der Rezeption von sprachlichem Input im Gehirn abspielt. Der technologische Fortschritt hat es jedoch ermöglicht, eine immer genauere Vorstellung davon zu bekommen. Bestanden die ersten Untersuchungen zu dieser Fragestellung noch aus Beobachtungen des Sprachverhaltens von Patienten (häufig solchen mit Läsionen) sowie postmortem durchgeführten Autopsien, konnten die so vermuteten Annahmen der Relation von Hirnverletzungen und Sprachverhalten später vor allem durch bildgebende Verfahren überprüft bzw. weiterentwickelt werden. Jedoch sind die Computertomographie und die strukturelle Magnetresonanztchnik invasive Verfahren und somit nicht für die Anwendung in der experimentellen Forschung geeignet (vgl. Friederici et al. 1996: 1219). Daher stammen die meisten Daten zur Sprachverarbeitung aus Studien, die mit Reaktionszeitexperimenten oder Eye-Tracking arbeiten (vgl. Friederici et al. 1993: 183). Diese Daten ermöglichen es zwar, eine grobe Vorstellung davon zu bekommen, welche Subprozesse an der Sprachverarbeitung beteiligt sind, jedoch spiegeln sie die zugrundeliegenden neurokognitiven Prozesse niemals unmittelbar wider. An dieser Stelle kommt die Elektroenzephalographie ins Spiel, die in dieser Arbeit im Fokus stehen wird. Im folgenden Unterkapitel sollen zunächst zwei Formen der EEG-Methode vorgestellt werden, bevor daran anschließend zwei Komponenten, die durch verschiedene Studien mit der Sprachverarbeitung in Verbindung gebracht werden konnten, detailliert beschrieben werden.

2.1 EEG und EKP

Die Methoden der Elektroenzephalographie (EEG) und der Ereigniskorrelierten Potenziale (EKP) basieren auf dem gleichen Messprinzip: Mithilfe von auf der Kopfhaut platzierten Elektroden, die heutzutage meist von einer Kappe gehalten werden, wird die vom Gehirn erzeugte elektrische Energie gemessen. Dies ist möglich, da ein Teil des elektrischen Signals, das von den Neuronen im Gehirn produziert wird, über die Kopfhaut nach außen dringt. Der EEG-Forschung liegt weiterhin die Annahme zu Grunde, dass die so gemessenen

Spannungsveränderungen mit Gehirnaktivitäten zusammenhängen (vgl. Molfese et al. 2001: 177 f.). Durch das Elektroenzephalogramm können demnach zunächst einmal Einblicke in die „Spontan- bzw. Grundaktivität des Gehirns“ (Drenhaus/beim Graben 2012: 69) gewonnen werden, die vor allem in der klinischen Diagnostik nützlich sind.

Ereigniskorrelierte Potenziale gehen noch einen Schritt weiter und bringen die Potenzialschwankungen unmittelbar mit spezifischen Ereignissen in Verbindung. Bei dieser Technik werden kurze, häufig etwa eine Sekunde lang andauernde EEG-Signale aus dem kontinuierlich aufgezeichneten EEG-Signal herausgegriffen, die der Präsentation eines konkreten Stimulus folgen (vgl. Beres 2017: 248). Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass verschiedene Stimuli verschiedene Gehirnwellen erzeugen (vgl. Molfese et al. 2001: 178). Aus diesem Grund ist die Methodik der EKPs besonders für die Untersuchung der Gehirnaktivität bei der Sprachverarbeitung interessant, da kognitive Prozesse mithilfe dieser nichtinvasiven Methode sichtbar gemacht werden können. Die Messung der Daten geschieht so viel unmittelbarer als beispielsweise bei Reaktionszeitexperimenten, sodass zwischen Stimuluspräsentation und sichtbarer Reaktion eine viel geringere zeitliche Abweichung besteht. Darüber hinaus können die EKP-Daten aufgrund ihrer verschiedenen Eigenschaften hinsichtlich Topographie, Polarität, Latenz und Amplitude klassifiziert werden. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass nicht nur quantitative, sondern zusätzlich qualitative Unterschiede mentaler Prozesse erfasst werden können (vgl. Drenhaus/beim Graben 2012: 75).

Die große Mehrheit der EKP-Studien zur Sprachverarbeitung macht sich das Verletzungsparadigma zunutze. Dabei werden die bei der Rezeption von korrekten Sätzen gemessenen Gehirnwellen mit denen verglichen, die auftreten, wenn der Stimulus eine bestimmte Verletzung (syntaktischer, semantischer, morphologischer oder prosodischer Art) aufweist (vgl. Hahne/Friederici 2002: 339 f.). Verschiedene Studien, auf die im Folgenden teilweise noch genauer eingegangen wird, fanden mehrere Komponenten, die sich abhängig von der Art der Abweichung voneinander unterscheiden. Daher kann bereits an dieser Stelle vorweggenommen werden, dass sich die häufig vorgenommene Unterscheidung von semantischen und syntaktischen Prozessen in Modellen der Sprachverarbeitung auch in der Gehirnaktivität widerspiegelt (vgl. Hagoort et al. 1993: 467). Zwei dieser so erforschten Potenziale sollen im Folgenden genauer betrachtet werden.

2.2 N400 vs. P600

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus ohne Zweifel auf der bereits gut belegten N400-Komponente. Diese soll an dieser Stelle ausführlich beschrieben werden, indem vorherige Studien und die daraus hervorgegangenen Erkenntnisse betrachtet werden. Darüber hinaus soll sie zur Veranschaulichung mit einer anderen, ebenfalls viel untersuchten Komponente

verglichen werden. Dazu wurde hier die P600 ausgewählt, da diese beiden Potenziale häufig in einem Satz genannt werden.

2.2.1 N400 – Die semantische Komponente

Bei der N400 handelt es sich um die am umfangreichsten erforschte Komponente in der Untersuchung der Sprachverarbeitung. Ihre erste Erwähnung fand die negative Ausprägung, die in der Regel vor allem über den zentralen und parietalen Elektroden der rechten Hemisphäre messbar ist, in den Studien von Marta Kutas und Steven Hillyard in den 1980er Jahren (vgl. Luck 2014: 102). Auf deren Erkenntnissen soll die Vorstellung der N400 aufbauen. Ausgehend von der Hypothese, dass Wörter schneller erkannt und verarbeitet werden können, wenn sie in einem Kontext auftreten, in dem sie zu erwarten sind, als wenn sie alleine stehen oder in einem semantisch weiter entfernten Kontext präsentiert werden, untersuchten Kutas und Hillyard 1980 ereigniskorrelierte Potenziale am Satzende (vgl. Kutas/Hillyard 1980b: 203). In ihren Experimenten sollten die Probanden jeweils 160 Sätze lesen, deren jeweils sieben Wörter Wort für Wort präsentiert wurden. 25 % der Sätze endeten dabei mit einem semantisch unpassenden Wort, während sie syntaktisch jedoch korrekt formuliert waren. In der ersten Version dieses Experiments wurden moderate Abweichungen untersucht, in der zweiten Version starke Verletzungen der Semantik. Darüber hinaus testeten Kutas und Hillyard in einer dritten Version, inwieweit physische Abweichungen die Sprachverarbeitung beeinflussen, indem 25 % der präsentierten Sätze zwar semantisch korrekt endeten, jedoch abweichend in einer größeren Schriftgröße präsentiert wurden. Mit diesem Versuchsaufbau stellten sie fest, dass physische und semantische Abweichungen unterschiedliche EKPs hervorrufen. Während die Veränderung der Schriftgröße eine positive Auslenkung erzeugte (P560), auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, trat in der Folge von semantischen Verletzungen eine negative Komponente auf, die etwa 250 ms nach Stimulus-Onset beginnt und bei etwa 400 ms ihre größte Amplitude erreicht (vgl. Kutas/Hillyard 1980b: 203). Aufgrund der negativen Auslenkung und dem Peak nach 400 ms, wird diese Komponente als N400 bezeichnet.

Bereits in dieser ersten Untersuchung fiel auf, dass sie bei schwerwiegenden Verletzungen stärker auftritt als bei moderaten Abweichungen. Jedoch konnte erst einige Jahre später ein Zusammenhang mit der Erwartbarkeit von Wörtern in einem bestimmten Kontext hergestellt werden. Vorher wurde mit einer vergleichbaren Studie nachgewiesen, dass sich diese beiden Abweichungen (semantisch und physisch) nicht gegenseitig beeinflussen. Unabhängig davon, ob das kritische letzte Wort in regulärer oder abweichend größerer Schriftgröße präsentiert wurde, löste eine semantische Inkongruenz eine N400 aus. Ebenso trat eine positive Auslenkung auf, wenn das Wort (semantisch passend oder nicht) größer dargestellt wurde (vgl. Kutas/Hillyard 1980a: 111).

1983 führten Kutas und Hillyard ihre Untersuchungen zur N400 fort, indem sie Probanden statt isolierten Sätzen Prosapassagen präsentierten, um festzustellen, dass die Komponente auch bei solchen zusammenhängenden Stimuli auftritt (Kutas/Hillyard 1983: 545). Darüber hinaus gingen sie in der gleichen Studie der Frage nach, ob die N400 ausschließlich bei semantischen Unstimmigkeiten auftritt oder grundsätzlich Verletzungen linguistischer Beziehungen anzeigt. Zu diesem Zweck wurden manche Wörter in den Prosapassagen so manipuliert, dass sie grammatikalische Fehler aufwiesen, während der semantische Gehalt der Sätze beibehalten wurde. Dabei wurden vor allem morphologische Fehler betrachtet, die Auswirkungen auf Numerus und Tempus hatten (vgl. Kutas/Hillyard 1983: 540). Im Gegensatz zu den N400-Effekten, die bei semantischen Inkongruenzen in isolierten Sätzen sowie in den Prosapassagen nachgewiesen werden konnten, zeigten die grammatikalischen Fehler

a much smaller and less consistent late negativity that also differed in scalp topography, being much reduced over posterior temporal areas. These results add to the evidence that a large N400 is specific to words that are unexpected or inappropriate in semantic content and suggests that grammatical aberrations are processed in a different fashion (either qualitatively or quantitatively) from such semantic deviations (Kutas/Hillyard 1983: 546).

Diese Erkenntnisse stützen die Annahme, dass beim Sprachverstehen semantische und syntaktische Informationen nicht parallel von den gleichen Mechanismen verarbeitet werden. Obwohl bereits offenkundig ist, dass der N400-Effekt die Beziehung eines Wortes zu dessen Kontext anzeigt, ist dieser Zusammenhang noch recht vage. Nur kurze Zeit später wurde die negative Auslenkung zusätzlich quantifizierbar. Eine Überprüfung der EKPs von satzfinalen Wörtern mit unterschiedlich hoher Erwartbarkeit ergab, dass eine semantische Unstimmigkeit keine notwendige Bedingung für einen N400-Effekt ist. Vielmehr besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Ausprägung des Effekts und der sogenannten Cloze Probability (vgl. Kutas/Hillyard 1984: 162). Dabei handelt es sich um einen Wert, der die Vorhersagbarkeit eines bestimmten Wortes in einem gegebenen Kontext angibt. Ermittelt wird dieser Wert, indem einer Gruppe von Menschen unvollständige Sätze gegeben werden, die sie mit dem für sie wahrscheinlichsten Wort vervollständigen sollen. „The percentage of subjects who used that particular word, from one to 100 %” (van Petten/Luka 2012: 177) ist dementsprechend die Cloze Probability dieses spezifischen Wortes in ebendiesem Kontext.

In ihrem Experiment untersuchten Kutas und Hillyard also die EKPs von satzfinalen Wörtern, die semantisch kongruent waren, sich jedoch im Hinblick auf ihre Erwartbarkeit – quantifiziert durch die Cloze Probability – unterschieden. Darüber hinaus ließen sie auch mit einfließen, wie stark der Satzkontext das letzte Wort bestimmte (vgl. Kutas/Hillyard 1984: 161).

Wie bereits angedeutet, erzeugen stark erwartbare Wörter keinen N400-Effekt, sondern vielmehr eine späte positive Auslenkung der EEG-Kurven. Demgegenüber tritt in der Folge von wenig vorhersehbaren Wörtern die N400-Komponente auf. Dabei scheint der Grad der

Bestimmtheit des Kontextes jedoch kaum Auswirkungen auf die Amplitude zu haben (vgl. Kutas/Hillyard 1984: 161 f.).

Die Position des Wortes im Satz hingegen hat Auswirkungen auf die Stärke des N400-Effekts. Während Kutas und Hillyard ausschließlich EKPs von satzfinalen Wörtern untersuchten, nahmen van Petten und Kutas 1990 erstmals auch andere Satzpositionen in den Blick. Dabei nutzten sie einen ähnlichen Versuchsaufbau, sodass wieder ereigniskorrelierte Potenziale gemessen wurden, während Probanden isolierte, diesmal jedoch semantisch kongruente Sätze still für sich lasen. Die Ergebnisse (s. Abbildung 1) bestätigen zunächst diejenigen von Kutas und Hillyard, da satzfinale kongruente Wörter der offenen Wortklasse keinen N400-Effekt auslösen. Open class-Wörter am Satzanfang bzw. in der Mitte des Satzes zeigen jedoch eine negative Auslenkung, die nach etwa 400 ms ihren Höhepunkt erreicht. Dabei ist auffällig, dass die ersten open class-

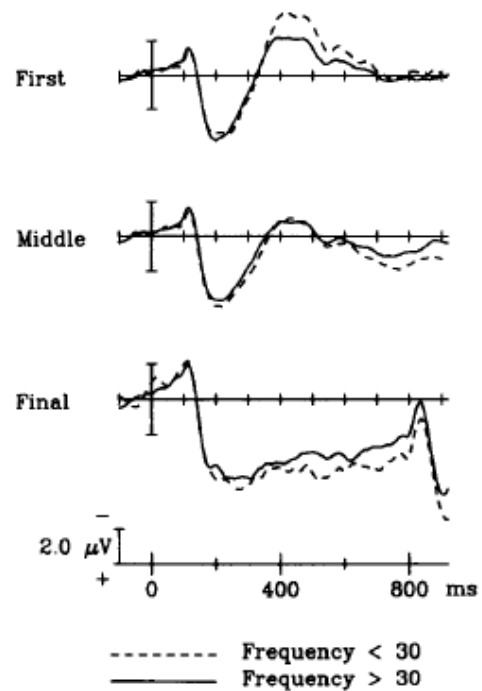


Abbildung 1:
EKPs für hochfrequente und niederfrequente
Wörter an verschiedenen Satzpositionen.
Entnommen aus van Petten/Kutas 1990,
Seite 384.

Wörter einen Effekt mit größerer Amplitude erzeugen als solche, die in der Mitte des Satzes auftauchen (vgl. van Petten/Kutas 1990: 384). Dies unterstützt die Annahme, dass die N400 die Beziehung eines Wortes zu dessen Kontext anzeigt. Am Anfang eines Satzes – vor allem eines Satzes, der isoliert steht – ist noch kein Kontext gegeben, sodass die Verarbeitung eines Wortes mehr Arbeit erfordert. Mit jedem weiteren Wort kommt jedoch Kontext hinzu, was zur Folge hat, dass die Vorhersagbarkeit eines Wortes zunimmt, der N400-Effekt also verringert wird oder ganz verschwindet (vgl. van Petten/Kutas 1990: 388).

Ein weiterer Faktor, der in diesen Experimenten untersucht wurde, ist die Frequenz der Wörter. Sie scheint jedoch lediglich Einfluss auf open class-Wörter am Satzanfang zu haben, während die N400 von satzfinalen Wörtern davon unbeeinflusst scheint. Ein genauerer Blick auf die Daten legt jedoch nahe, dass auch der Einfluss der Worthäufigkeit im Laufe des Satzes nachlässt, sodass ein Zusammenhang zwischen Frequenz und Satzposition besteht (vgl. van Petten/Kutas 1990: 389).

In Anbetracht der Tatsache, dass gesprochene Sprache die am weitesten verbreitete Modalität ist und bedeutend früher existierte als das geschriebene Wort, erscheint es auf den ersten Blick zumindest etwas befremdlich, dass die meisten Studien geschriebene Stimuli nutzen. Jedoch lässt sich diese Diskrepanz leicht dadurch erklären, dass geschriebene Sätze in

linguistischen Studien einfacher zu präsentieren und zu kontrollieren sind (vgl. Holcomb/Neville 1991: 286). Dennoch muss man sich früher oder später die Frage stellen, ob die bisher dargestellten Ergebnisse tatsächlich modalitätsunabhängig sind.

In einer Gegenüberstellung der beiden Modalitäten wurden den Probanden jeweils Wortpaare präsentiert, bestehend aus einem Primewort und einem zweiten Wort, das entweder zu diesem Wort passte, nicht passte oder gar kein richtiges Wort darstellte. Dabei wurde zunächst erneut herausgestellt, dass in beiden Modalitäten die N400-Komponente von nicht verbundenen Wörtern stärker ausgeprägt war als die von verwandten Wörtern. Darüber hinaus stellten Holcomb und Neville jedoch fest, dass der „priming effect“ (1991: 287) bei der auditiven Präsentation der Stimuli früher einsetzte als in der visuellen Modalität. Dieses Ergebnis spricht für eine unterstützende Wirkung prosodischer Informationen bei der Sprachverarbeitung. Außerdem fanden sie eine leicht abweichende Verteilung der EKPs über die Gehirnhälften. Während die visuellen Stimuli vor allem Effekte auslösten, die von den Elektroden über der rechten Hemisphäre gemessen werden konnten, waren die Gehirnwellen in der linken Hemisphäre stärker ausgeprägt, wenn die Stimuli mündlich präsentiert wurden. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Verarbeitungsprozesse zwar sehr ähnlich, jedoch nicht vollkommen identisch sind (vgl. Holcomb/Neville 1991: 287). Da im weiteren Verlauf der Arbeit jedoch vor allem auf Studien eingegangen wird, die visuell präsentierte Stimuli verwenden, soll an dieser Stelle nicht weiter auf den Einfluss von auditiven und prosodischen Informationen eingegangen werden. Einige Ergebnisse dazu, inwiefern die Prosodie die Sprachverarbeitung unterstützt, können in den Arbeiten von Steinhauer et al. (1999), Steinhauer und Friederici (2001) sowie Pannekamp et al. (2005) nachgelesen werden.

Stattdessen soll hier nun zunächst auf Basis der bis hierher vorgestellten Daten festgehalten werden, dass die N400-Komponenten den Verarbeitungsschritt der „semantic integration of a word into its sentential context“ (Hahne/Freiderici 2002: 340) anzeigt. Auf diese Weise wird deutlich, dass der gegebene Kontext die Geschwindigkeit und Leichtigkeit der semantischen Verarbeitung eines Wortes maßgeblich beeinflusst und die negative Auslenkung nicht ausschließlich mit semantischen Inkongruenzen in Verbindung gebracht werden kann. Vielmehr zeigt sie einen graduellen Verlauf der Schwierigkeit der Integration in den Kontext an, die mit abnehmender Nähe des kritischen Wortes zum gegebenen Kontext zunimmt.

2.2.2 P600 – Die syntaktische Komponente?

So wie die N400-Komponente anscheinend mit der semantischen Integration in Verbindung gebracht werden kann, so untersuchten Wissenschaftler auch EKPs in Folge von syntaktischen Fehlern. Während einige dieser Fehler in verschiedenen Studien bereits betrachtet wurden (u. a. bei Kutas/Hillyard 1983), waren Anfang der 1990er-Jahre vor allem Lee Osterhout und Phillip Holcomb Vorreiter auf diesem Gebiet. So untersuchten sie 1992

zunächst die Gehirnwellen von Probanden, denen syntaktische Ambiguitäten präsentiert wurden, aus denen wiederum Anomalien bezüglich der Satzstruktur (im Englischen) resultierten. Zu diesem Zweck nutzten sie Satzpaare wie das Folgende:

- (1) a. The woman struggled to prepare the meal.
- b. *The woman persuaded to answer the door.

In Satz 1a wird der Infinitiv problemlos mit dem intransitiven Verb verbunden, während das transitive Verb in Satz 1b eigentlich eine Nominalphrase verlangt, sodass der Satz grammatikalisch falsch ist. Die Doppeldeutigkeit geht aus diesem Beispiel nur indirekt hervor, da Satz 1b korrekt sein könnte, würde es sich dabei um einen verkürzten Relativsatz handeln (im Sinne von ‚The woman [who was] persuaded to answer the door ...‘). Da dies jedoch nicht der Fall ist, muss Satz 1b als grammatikalisch falsch bewertet werden (vgl. Osterhout/Holcomb 1992: 788). Die EKP-Daten aus diesem Experiment zeigen, dass der Infinitivmarker ‚to‘ in den Fällen von transitiven Verben (Satz 1b) eine positive Auslenkung auslöst, die ca. 600 ms nach Stimulus-Onset ihren Höhepunkt erreicht. Diese von diesem Moment an als P600 bezeichnete Komponente ist besonders an den Elektroden der rechten Hemisphäre messbar (vgl. Osterhout/Holcomb 1992: 791). Basierend auf diesen ersten Ergebnissen kamen Osterhout und Holcomb zu dem Schluss, dass

the P600 seems to act as an electrophysiological marker of the syntactic garden-path effect. Furthermore, the P600 effect is clearly distinct from the response typically observed following semantically inappropriate words (the N400 effect; cf. Kutas & Hillyard, 1980). Given these data, one might speculate that the P600 and N400 effects are elicited as a function of anomaly type, i.e., syntactic and semantic, respectively. Such an interpretation implies that the response to these anomaly types is neurally (and, by extension, cognitively) distinct (1992: 797).

In diesem Sinne handelt es sich bei der P600-Komponente um einen Indikator des garden path-Effekts. Darunter versteht man die Notwendigkeit einer Reanalyse der zuvor angenommenen Satzstruktur, die erst bei der Konfrontation mit einem bestimmten Wort (im obigen Beispielsatz 1b ‚to‘) offenkundig wird (vgl. Friederici et al. 1993: 185).

Hagoort und Kollegen erweiterten die Überlegungen dahingehend, dass sie drei verschiedene syntaktische Fehlertypen untersuchten (1993: 444). Sie wollten überprüfen, ob die P600 neben dem garden path-Effekt auch syntaktische Verletzungen anzeigt. Dazu nahmen sie EKPs zu den folgenden Fehlertypen auf:

- 2) a. Subjekt-Verb-Kongruenz:
 - * “On a rainy day the old man buy a life insurance.”
- b. Subkategorisierungsfehler:
 - * “The tired young man elapsed the book on the floor.”
- c. Verletzungen der Satzstruktur:
 - * “Most of the visitors like the colourful very tulips in Holland.”

In den Konditionen 2a und 2c traten positive Auslenkungen auf, die starke Ähnlichkeiten mit der P600 aufwiesen. Im Laufe ihrer Arbeit betitelten Hagoort und Kollegen diesen Effekt als *syntactic positive shift* (SPS). Aus ihren Daten geht diesbezüglich hervor, dass es sich dabei um ein Anzeichen sowohl für syntaktische Verletzungen als auch für den zuvor erwähnten garden path-Effekt handelt (vgl. Hagoort et al. 1993: 467 f.). Darüber hinaus ergibt sich aus den beiden bisher vorgestellten Studien, dass die P600-Komponente unabhängig von der Wortklasse ist. Während Osterhout und Holcomb Wörter der geschlossenen Klasse als Zielwörter untersuchten, waren die kritischen Wörter in den Stimuli von Hagoort et al. allesamt Mitglieder der offenen Klasse. Das legt die Schlussfolgerung nahe, dass der SPS nicht von der Wortklasse abhängt, sondern dann auftritt, wenn ein bestimmtes Wort – open class oder closed class – die Interpretation eines Satzes entsprechend einer zuvor angenommenen Struktur folgend stört (vgl. Hagoort et al. 1993: 470).

Osterhout nahm diese Fragestellung 1997 jedoch zum Anlass für eine weitere Untersuchung des Einflusses von Wortposition im Satz und Wortklasse auf den P600-Effekt. Dabei stellte er zunächst fest, dass die P600-Komponente bei Wörtern der geschlossenen Klasse stark ausgeprägt auftrat, unabhängig davon, ob sich das kritische Wort am Satzende oder inmitten des Satzes befand. Jedoch riefen diese Wörter zusätzlich eine negative Auslenkung ähnlich der N400 hervor, wenn sie am Satzende standen. Im Gegensatz dazu zeigen open class-Wörter, die syntaktische Verletzungen aufweisen, subjektabhängig entweder einen N400-Effekt oder einen P600-Effekt, wobei der Anteil der Probanden, bei denen eine N400-Komponente auftrat, größer ausfiel, wenn die kritischen Wörter am Satzende standen (vgl. Osterhout 1997: 513 f.). Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Rückschlüsse ziehen: Zum einen scheint die P600 „a general electrophysiological indicator of syntactic anomaly“ (Osterhout 1997: 514) zu sein, und das unabhängig von der Position des Wortes und dessen Wortklasse. Zum anderen spricht das Auftreten von N400-Effekten in Osterhouts Experiment für die vermutete getrennte Verarbeitung von Semantik und Syntax. Ähnliche Ergebnisse erzielten auch Ainsworth-Darnell und Kollegen, als sie EKPs zu ausschließlich semantischen, ausschließlich syntaktischen Anomalien sowie einer Kombination beider Verletzungen im gleichen Wort untersuchten:

These findings suggest that there are distinct cognitive processes associated with processing syntactic and semantic anomalies. Therefore, when semantic and syntactic anomalies in a sentence were encountered simultaneously, the N400 and P600 did not cancel each other out, but remained distinct and were similar in amplitude and latency to the comparable components in the pure anomaly conditions. These results indicate that the generators of the brain responses that are measured by the N400 and P600 may be independent (Ainsworth-Darnell et al. 1998: 126).

Auf die Auswirkungen dieser Erkenntnisse auf Sprachverarbeitungsmodelle soll im nächsten Schritt noch genauer eingegangen werden, wenn das Verhältnis von N400 und P600

detaillierter geklärt und deren Implikationen für die Sprachverarbeitung zusammenfassend betrachtet werden.

Zuvor soll jedoch noch ein kurzer Blick auf die Frage geworfen werden, ob es sich bei der P600 um eine sprachspezifische Komponente handelt. Diese Fragestellung steht in Verbindung mit einer in den 1990er-Jahren verbreiteten Meinung, bei der P600 handele es sich lediglich um ein Mitglied der P300-Familie, deren Komponenten allgemein als Antwort auf unvorhersehbare Stimuli interpretiert werden (vgl. van Petten/Luka 2012: 181). Hagoort und Kollegen argumentieren in ihren Schriften (1993, 1999) jedoch dagegen. In ihrer Studie von 1993 spricht die Tatsache, dass die Probanden keine konkrete Aufgabe zur Beurteilung der Grammatikalität oder Akzeptabilität der Stimuli bekamen, gegen die Auffassung, die P600-Effekte würden durch die unerwarteten syntaktischen Verletzungen in den Stimuli ausgelöst (vgl. Hagoort et al. 1993: 469). Darüber hinaus werden EEG-Wellen immer von einem Komplex vieler verschiedener, gleichzeitig ablaufender Prozesse ausgelöst. Daher ist es kaum möglich, die gleichen zugrundeliegenden neuronalen Netze sowohl für den Effekt von Unerwartetem als auch für den von syntaktischen Verletzungen verantwortlich zu machen (vgl. Hagoort et al. 1999: 293).

Auch wenn es auf Basis dieser Daten unwahrscheinlich erscheint, dass die P600 zur Familie der P300-Komponenten gehört, so ist dennoch offen, ob es sich dabei um ein sprachspezifisches Potenzial handelt. Dass es mit Sprache – genauer mit Sprachstrukturen – verbunden ist, konnte bereits anhand der vorgestellten Studien gezeigt werden.

Ausgehend von der Annahme, dass westeuropäische tonale Musik jedoch ebenfalls gewissen strukturellen Normen (und damit einer Syntax) folgt, untersuchten Patel und Kollegen (1998), ob sich bei Verletzungen dieser musikalischen Regeln ein ähnliches ereigniskorreliertes Potenzial finden lässt. Tatsächlich fanden sie entsprechende Positivitäten, die etwa 600 ms nach Stimulus-Onset auftraten. Außerdem bildeten die gemessenen Daten eine Hierarchie, die den Abstufungen der N400-Kurven zu starken Inkongruenzen, moderaten Verletzungen und kongruenten Sätzen entsprachen, sodass auch bei der P600-Komponente davon ausgegangen werden kann, dass eine zunehmende Schwierigkeit der Integration eine größere Amplitude nach sich zieht (vgl. Patel et al. 1998: 724 f.). Daraus folgt, dass die zugrundeliegenden Prozesse der P600-Komponenten vermutlich nicht sprachspezifisch sind. Vielmehr scheint es sich um einen Indikator für Schwierigkeiten bei der strukturellen Integration zu handeln, denen im Fall von garden path-Effekten mit einer Reanalyse des Inputs begegnet wird.

Ohne im Detail darauf eingehen zu wollen, sollen an dieser Stelle noch die early left anterior negativities (ELAN) erwähnt werden, da sie ebenfalls mit syntaktischen Aspekten in Verbindung gebracht werden. Diese Negativitäten, die vor allem mit einer Latenz von 100 - 300 ms auftreten, konnten bisher nachgewiesen werden, wenn Verletzungen der

Satzstruktur und die Verarbeitung von Elementen der geschlossenen Wortklasse untersucht wurden. Dementsprechend kann darauf geschlossen werden, dass die Informationen bezüglich der Wortkategorie ausgesprochen früh verarbeitet werden, während Aspekte wie die Kongruenz oder die Valenz erst später (s. P600) im Prozess stattfinden (vgl. Hahne/Friederici 1999: 195).

2.2.3 Sprachbezogene EKPs und ihre Bedeutung für Modelle der Sprachverarbeitung

Die aus EEG-Experimenten gewonnenen Daten zu sprachbezogenen EKPs erlauben eine Weiterentwicklung der zuvor nur auf Reaktionszeitexperimenten und Eye-Tracking-Daten basierenden Modelle zur Sprachverarbeitung. In diesem Bereich haben sich vor allem zwei Ansätze herausgebildet: Der interaktionale Ansatz beschreibt, wie der Name schon nahelegt, eine Interaktion der Informationen aus Semantik, Syntax, Morphologie und Phonologie zu jedem Zeitpunkt im Prozess der Sprachverarbeitung. Auf der anderen Seite steht der serielle Ansatz, demzufolge syntaktische Informationen vor den semantischen verarbeitet werden (vgl. Friederici et al. 1996: 1219). Wie aus der kurzen Darstellung beider Ansätze schon hervorgeht, scheinen sich die Forscher insofern einig zu sein, dass eine Interaktion der semantischen und syntaktischen Informationen im Sprachverarbeitungsprozess stattfindet. Jedoch gehen die Meinungen auseinander, wenn über den Zeitpunkt dieses Zusammenspiels diskutiert wird (vgl. Friederici 2001: 244). Grundsätzlich sprechen die zuvor vorgestellten Eigenschaften der N400 und P600, wie bereits erwähnt, für die Existenz verschiedener Verarbeitungsmechanismen für Semantik und Syntax (vgl. Hagoort et al. 1999: 295), die sich den Ergebnissen verschiedener Studien entsprechend nicht gegenseitig ausschließen (vgl. Ainsworth-Darnell et al. 1998: 126). Die zeitlich sehr genaue Auflösung der EKP-Daten ermöglicht es nun an dieser Stelle, Aussagen über den zeitlichen Ablauf der Informationsverarbeitung auf den verschiedenen Levels zu treffen. Zu diesem Zweck soll auf das neurokognitive Modell von Friederici zurückgegriffen werden, das den Prozess der Sprachverarbeitung in drei Phasen aufteilt.

In der ersten Phase, die bei etwa 100 - 300 ms angesiedelt ist, wird auf der Basis von Informationen über die Wortkategorie eine erste syntaktische Struktur aufgebaut. Daran schließt sich die zweite Phase (300 - 500 ms) an, in der semantische sowie morphosyntaktische Informationen integriert werden. In der dritten Phase (500 - 1000 ms) werden die Informationen aus den verschiedenen Bereichen miteinander kombiniert. Ebenfalls in dieser Phase wird bei einem eventuellen Mismatch ein Reanalyse-Prozess eingeleitet, um Unstimmigkeiten durch die Aufdeckung von möglichen Ambiguitäten zu klären und den gegebenen Satz mittels einer neuen Satzstruktur korrekt zu verarbeiten (vgl. Friederici

2002: 79). Im Folgenden soll dieses Modell, das in Abbildung 2 grafisch dargestellt ist, genauer betrachtet und mit elektrophysiologischen Daten belegt werden.

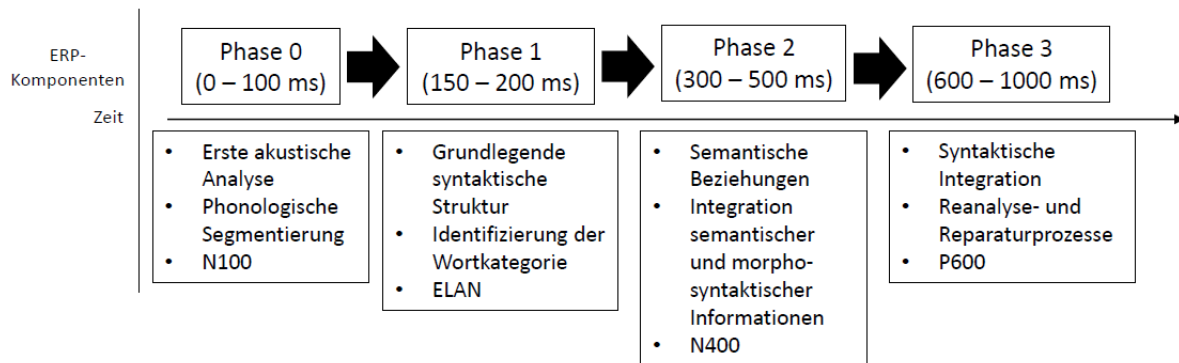


Abbildung 2: Neurokognitives Sprachverarbeitungsmodell nach Friederici.
Grafik angepasst aus Friederici 2002, Seite 79.

Wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, sind die ersten sprachbezogenen ereigniskorrelierten Potenziale in der Chronologie der Sprachverarbeitung die ELAN, die insbesondere bei Fehlern der Wortkategorie auftreten. Für das Modell der Sprachverarbeitung legt das die Vermutung nahe, dass bereits zu diesem frühen Zeitpunkt die Bildung einer potenziellen Satzstruktur auf Basis dieser morphosyntaktischen Informationen stattfindet. Das bedeutet, dass in dieser ersten Phase lediglich auf strukturelle, also syntaktische Informationen zurückgegriffen wird, was für den Syntax-first-Ansatz spricht (vgl. Hahne/Friederici 1999: 195). Im Anschluss daran werden offensichtlich die semantischen Informationen integriert, die im Falle einer Komplikation durch Inkongruenzen oder niederfrequentes Vorkommen eine Negativität mit einer Latenz von 400 ms hervorrufen (vgl. Friederici 2002: 81). In dieser Phase versucht der Parser den Satzbestandteilen mithilfe der semantischen Informationen thematische Rollen zuzuweisen. Dabei spielen einerseits die semantischen Informationen eine Rolle, andererseits aber auch morphosyntaktische, wie z. B. die Subkategorisierung. Schwierigkeiten bei der Integration letzterer Informationen werden im EEG in der sogenannten left anterior negativity (LAN) deutlich, die ebenfalls im Zeitfenster um die 400 ms nach Stimulus-Onset auftritt, sich jedoch hinsichtlich ihrer Topographie sowie durch ihre schwächer ausgeprägte Amplitude von der N400 unterscheidet (vgl. Friederici et al. 1993: 189). Diese vor allem an Elektroden über den vorderen Regionen der linken Hemisphäre messbare Negativität weist unterschiedlichen Studien zufolge u. a. auf Verletzungen der Satzstruktur, Verletzungen der Kongruenz sowie Schwierigkeiten bei der Verarbeitung von Wörtern der geschlossenen Klasse hin (vgl. Hahne/Friederici 1999: 195). Auch wenn noch nicht abschließend geklärt ist, worauf genau die LAN zurückzuführen ist, soll an dieser Stelle nicht weiter auf diese Frage eingegangen werden, da zumindest deutlich geworden sein sollte, inwiefern sie sich von der hier im Fokus stehenden N400 unterscheidet. Erst in der dritten Phase interagieren die syntaktischen Informationen mit den semantischen. Die P600 zeigt in diesem Stadium, das ganz im Zeichen des interaktionalen

Ansatzes zur Sprachverarbeitung steht, an, wenn es zu Unstimmigkeiten zwischen diesen Informationen kommt und der Satz möglicherweise mithilfe einer anderen Struktur interpretiert werden muss, als zunächst auf Basis der Informationen der Wortkategorie angenommen (vgl. Hahne/Friederici 1999: 195).

The ERP-effects discussed thus far cluster in three distinguishable time domains. In an initial phase (in the range from ~ 100 to 250 ms), the early syntactic negativity is observed. In an intermediate phase (300 - 500 ms), the semantic N400 component and a syntactic negativity ('LAN') are obtained. In the final phase (500 - 1000 ms), a syntactic positivity (P600) is found. It is important to note that the three components need not co-occur (Hahne/Jescheniak 2001: 201).

Anschließend an die Ergebnisse von Ainsworth-Darnell et al. untersuchte Friederici (2002) EKPs bei der Kombination von semantischen Inkongruenzen und Verletzungen der Wortkategorie im gleichen Wort. Während sie in den Konditionen, die nur eine der beiden Verletzungen betrachteten, die gewohnten Negativitäten nachweisen konnte, trat in der Kondition der Doppelverletzung nur die ELAN auf. Die Tatsache, dass in diesen Fällen keine N400 gemessen werden konnte, deutet darauf hin, dass Wörter nicht semantisch integriert werden, wenn sie nicht mit der syntaktischen Struktur in Einklang gebracht werden können. „This finding indicates that syntactic structure building precedes semantic processes“ (Friederici 2002: 82). Im Gegensatz dazu schließen morphosyntaktische Verletzungen, die in der Regel durch die zuvor erwähnte LAN angezeigt werden, die semantische Verarbeitung nicht aus, sodass die Vermutung nahelegt, dass LAN und N400 tatsächlich unabhängig voneinander sind (vgl. Friederici 2002: 82).

In einer Folgestudie wurde dieser Zusammenhang noch genauer untersucht, um herauszufinden, ob diese Verarbeitungsmechanismen kontrolliert oder automatisiert stattfinden. Zu diesem Zweck wurden den Probanden in zwei Experimenten jeweils insgesamt 500 Sätze auditiv präsentiert. Diese Sätze verteilten sich auf fünf Konditionen (korrekt, semantisch inkorrekt, syntaktisch inkorrekt, semantisch und syntaktisch inkorrekt, Filler). Der einzige Unterschied zwischen beiden Experimenten waren die Anweisungen, die die Probanden bekamen: Während sie in der ersten Version lediglich die Richtigkeit der Sätze beurteilen sollten, bekamen sie in der zweiten Version die Vorgabe, aufgrund ihrer semantischen Kohärenz zu bewerten (vgl. Hahne/Friederici 2002: 341). Das erste Experiment konnte die Ergebnisse von Friederici 2002 dahingehend replizieren, dass semantischen Unstimmigkeiten zum Trotz keine N400 auftrat, wenn im gleichen Satz bereits eine Verletzung der syntaktischen Struktur festgestellt werden konnte (vgl. Hahne/Friederici 2002: 347). Im Gegensatz dazu traten im zweiten Experiment, in dem Probanden vor allem die semantische Kohärenz der Sätze beurteilen sollten, in der syntaktischen sowie der kombinierten Kondition N400-Effekte auf. Da in beiden Experimenten die gleichen Stimulussätze verwendet wurden, lässt dieses Ergebnis darauf schließen, dass die explizite Aufmerksamkeitssteuerung der Probanden einen Einfluss auf die auftretenden Komponenten hat (vgl. Hahne/Friederici

2002: 352). Diese Ergebnisse stützen die Hypothese, dass „[...] the ELAN reflects a highly automatic process, whereas the N400 and the P600 are subject to strategic control” (Friederici 2001: 246). Diese Erkenntnisse zur Automatisierung bzw. bewussten Kontrolle der Verarbeitungsprozesse untermauern das neurokognitive Modell, da der Ablauf der drei Phasen grob den frühen (ELAN) bzw. den späten Komponenten (N400, LAN, P600) entspricht.

3 Interpretation der EKPs im Lichte neuer Erkenntnisse

Die ersten Forschungen zu ereigniskorrelierten Potenzialen in der Sprachverarbeitung liegen zum Verfassungszeitpunkt der hier vorliegenden Arbeit bereits 40 Jahre in der Vergangenheit. Vor allem in den vergangenen 10 bis 20 Jahren haben sich in der Forschung zu den zuvor vorgestellten Komponenten einige neue Erkenntnisse ergeben. Aufgrund der sich ständig weiterentwickelnden Paradigmen sowie der damit verbundenen Weiterentwicklung des Verständnisses von kognitiven Prozessen während der Sprachverarbeitung sollen an dieser Stelle die zuvor dargestellten Erkenntnisse zur N400 und P600 in einem neuen Licht betrachtet werden.

Wie aus den vorherigen Darstellungen hervorgegangen ist, wird die N400-Komponente häufig mit lexikalisch-semanticen Unstimmigkeiten in Verbindung gebracht, während angenommen wird, dass syntaktische Fehler einen P600-Effekt auslösen (vgl. Frenzel et al. 2011: 574). Diese Auffassung des N400-Effekts war bis in die frühen 2000er-Jahre fast unumstößlich. Weitere Forschungen dazu hatten das vorrangige Ziel, die bis dahin häufig genutzten Paradigmen um einige Aspekte zu erweitern und so ein tieferes Verständnis des Effekts zu gewinnen. So beleuchteten Frisch und Schlesewsky 2001 die Frage, ob die N400 nicht viel gravierendere Probleme bei der Interpretation von Sätzen anzeigt als die pure Kontextangemessenheit von Wörtern. Sie zielten dabei vor allem auf die Frage der thematischen Ordnung in Sätzen ab, die sie anhand der deutschen Sprache untersuchten, da das Deutsche im Gegensatz beispielsweise zum Englischen eine freie Wortstellung zulässt. Dadurch ist die Zuweisung thematischer Rollen abhängig von morphologischen Markern, wie der Kasusmarkierung (vgl. Frisch/Schlesewsky 2001: 3391). Darüber hinaus bezogen sie die Eigenschaft der Belebtheit in ihre Fragestellung mit ein, da in der Regel ein belebter Referent als Agens agiert, während unbelebte Referenten eher passive Rollen einnehmen. Im Rahmen ihrer Studie konnten Frisch und Schlesewsky schließlich nachweisen, dass Schwierigkeiten bei der thematischen Hierarchisierung tatsächlich Einfluss auf die N400-Komponente haben (vgl. 2001: 3394). Waren also beide im Satz vorkommenden Referenten als Subjekte markiert, traten klare N400-Effekte auf. Dieses Ergebnis spricht für die in Kapitel 2.2.3 bereits erwähnte Einordnung der Komponente in der zweiten Phase der Sprachverarbeitung, in der den Satzteilen thematische Rollen zugewiesen werden. Darüber hinaus spricht die Erkenntnis, dass ein P600-Effekt auftritt, wenn sowohl ein belebter als auch ein unbelebter Referent im

Nominativ markiert sind, dafür, dass in der dritten Phase Reanalyseprozesse stattfinden, die auf weitere Informationen (wie die Tendenz, dass belebte Referenten eher Agens sind) im Interpretationsprozess zurückgreifen (vgl. Frisch/Schlesewsky 2001: 3394).

Weiterhin lassen einige neuere Studien an den Erkenntnissen bezüglich des Einflusses der Satzposition auf den N400-Effekt zweifeln. So wird seit den 1990er-Jahren davon ausgegangen, dass semantische Inkongruenzen in Sätzen zusätzlich zu ihren Kongruenzeffekten in satzfinaler Position außerdem sogenannte „wrap-up“-Effekte hervorrufen (vgl. Hagoort 2003: 885). Das bedeutet, dass solche Integrationsschwierigkeiten nicht nur lokal, also bei dem Wort, das sie verursacht, sichtbar werden, sondern zusätzlich Konsequenzen für das Satzende haben. Befindet sich das semantisch inkongruente Wort nun selbst in satzfinaler Position, überlagern sich diese Effekte, wodurch eine differenzierte Analyse erschwert wird.

Im Laufe der Zeit wurden jedoch nicht nur die linguistischen Paradigmen erweitert, sondern auch insgesamt wurde die Forschung rund um die N400-Komponente ausgedehnt. So konnten N400-Effekte ebenfalls in nicht-linguistischen Fragestellungen nachgewiesen werden. Ähnliche Ausschläge in EEG-Daten traten dabei ebenfalls auf, als z. B. relativ komplexe Bilder oder Gesichter als Stimuli verwendet wurden, die in Anlehnung an die sprachbezogene N400-Komponente unerwartet oder neu waren (vgl. Steffensen et al. 2008: 918). Bezogen auf die Verarbeitung von Bildern konnten bereits in verschiedenen Studien negative Effekte, die 300 bzw. 400 Millisekunden nach Stimulus-Onset auftreten, nachgewiesen werden. Während die N300-Komponente in Studien mit verbalen Aufgaben nicht hervorgerufen werden konnte, ähnelt die zeitliche Ausprägung der bildbezogenen N400 derjenigen, die bei vergleichbaren verbalen Stimuli auftritt. Allerdings unterscheiden sie sich im Hinblick auf ihre Topographie. Die N400 bei der Verarbeitung von Bildern tritt vorrangig an frontalen Elektroden über der linken Hemisphäre auf, während die klassische, sprachbezogene N400 am stärksten in den zentral-parietalen Regionen der rechten Hirnhälfte vertreten ist (vgl. West/Holcomb 2002: 364). Mithilfe ihrer Untersuchung von EKPs bei der Verarbeitung von komplexen Bildern brachten West und Holcomb diese N300- und N400-Effekte mit der konzeptuellen Integration von Informationen auch auf Diskurslevel in Verbindung (vgl. West/Holcomb 2002: 371). Aufgrund dieser gesammelten Erkenntnisse lässt sich schlussfolgern, dass bei der Verarbeitung von Bildern und Wörtern zwar ähnliche Mechanismen zur Integration von Informationen verwendet werden, die jedoch vor allem in Bezug auf ihre neuronale Verteilung nicht vollkommen identisch sind (vgl. West/Holcomb 2002: 373).

Proverbio und Riva untersuchten in ihrer Studie sogar die Reaktionen ihrer Probanden auf kongruente oder inkongruente menschliche Handlungen, die ihnen anhand von Bildern präsentiert wurden (vgl. 2009: 145). Auch wenn die von ihnen identifizierte N420-Komponente eine anteriore Verteilung auf dem Schädel aufweist (s. Abbildung 3), die der zentral-parietalen

Verteilung der klassischen N400 nicht vollkommen entspricht, stellen die beiden Forscher die These auf, dass dieser handlungsbezogene Effekt auf eine Schwierigkeit bei der Integration der gesehenen Handlung in den Kontext des Weltwissens anzeigt und somit von einer „functional similarity with linguistic N400 response“ (Proverbio/Riva 2009: 145) ausgegangen werden kann.

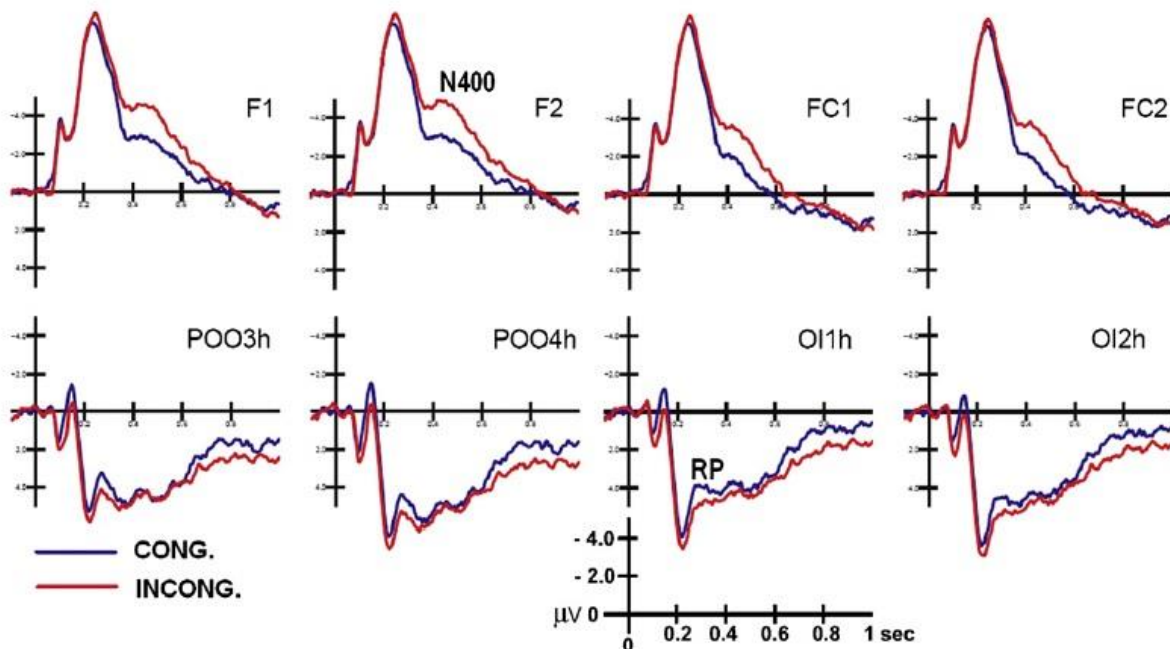


Abbildung 3: N400-Effekte als Reaktion auf kongruente bzw. inkongruente menschliche Handlungen sind besonders an frontalen Elektrodenpositionen sichtbar.
Entnommen aus Proverbio/Riva 2009, Seite 144.

Obwohl also die Reaktionen auf verschiedene Arten von bedeutungsvollen Stimuli (Wörter, Bilder, Gesichter, Gerüche, Geräusche etc.) viele Ähnlichkeiten in Bezug auf die Wellenform, Latenz und Funktionalität aufweisen, so dürfen die großen Unterschiede besonders bezogen auf die Topographie nicht vernachlässigt werden. Dennoch erlauben die Ergebnisse verschiedenster Studien die Feststellung, dass bei der Konstruktion und Integration von Bedeutung aus unterschiedlichen Quellen zumindest teilweise nicht-überlappende neuronale Mechanismen aktiv sind.

The weight of these studies pointed to a functional entity that varies systematically with relatedness within and across a wide range of sensory input types, but characterized by topographic differences that implicate an assortment of at least partially nonoverlapping neural areas in meaning construction. N400s thus are modality sensitive but not modality specific [...] (Kutas/Federmeier 2011: 628).

Auch wenn festgehalten werden soll, dass die N400 im Zusammenhang mit unterschiedlichen Modalitäten auftritt, soll für den Zweck der hier vorliegenden Arbeit nun erneut die sprachbezogene Komponente in den Fokus rücken.

Diesbezüglich hat sich neben der Ansicht, dass es sich bei der N400-Komponente um einen Marker für die Schwierigkeit der semantische Integration in einen gegebenen Kontext handelt,

alternativ die Auffassung herausgebildet, der Effekt zeige die Aktivierung des Langzeitgedächtnisses an, insbesondere solcher Einträge, die mit einem spezifischen lexikalischen Objekt assoziiert werden. Dieser Theorie entsprechend, entstehen die N400-Effekte nicht aufgrund der Inkongruenz an sich, sondern daher, dass unstimmgige oder unerwartete Wörter in einem gegebenen Kontext im Gedächtnis schwieriger zugänglich sind als kongruente Wörter. Dementsprechend spielen sowohl der Kontext als auch andere Eigenschaften eines Wortes, die den lexikalischen Zugang erleichtern (z. B. Frequenz, Wiederholungen etc.) eine Rolle bei der Voraktivierung der lexikalischen Einträge (vgl. Lau et al. 2008: 921).

Ausgehend von diesem Ansatz untersuchten Meyer et al. den Zusammenhang zwischen der N400-Komponente und dem frühen, sogenannten „old/new effect“ (2007: 1009), der sich etwa 300 ms nach Stimulus-Onset in Form von positiven Auslenkungen als Reaktion auf korrekt wiedererkannte, bereits eingeführte Objekte im Vergleich zu korrekt als neu identifizierten Objekten präsentiert. Im Rahmen ihrer Studie fanden sie eine Korrelation zwischen den beiden Effekten, die sie durch eine Ähnlichkeit der stattfindenden Prozesse zu erklären versuchen. Dabei gehen sie davon aus, dass „the N400 represents the access to semantic long-term memory and the extensive activation of a concept during semantic integration“ (Meyer et al. 2007: 1012), während der early old/new effect die auf einer vorherigen Begegnung basierenden Leichtigkeit des Zugangs zu konzeptuellen bzw. perzeptuellen Aspekten des Zielwortes angibt. Daher kann im Rahmen des Erinnerungsprozesses zwar zwischen ‚alten‘ und ‚neuen‘ Wörtern unterschieden werden, eine tiefergehende Unterscheidung auf Basis von aktivierten Konzepten ist in diesem Fall jedoch nicht möglich. Allerdings kommen sie zu dem Ergebnis, dass Schwierigkeiten bei der semantischen Integration von Wörtern bei der Sprachverarbeitung und die Wiedererkennung von bekannten Objekten offenbar zumindest teilweise auf den gleichen Prozessen basieren (vgl. Meyer et al. 2007: 1012).

Eine ähnliche Argumentation nutzen auch White und Kollegen, wenn sie ihre Ergebnisse aus der Untersuchung von Stereotypen mithilfe der N400-Komponente erklären. Sie stellten in Primingexperimenten fest, dass die Teilnehmer Wortpaare schneller beurteilten, wenn sie geschlechterbezogenen Klischees entsprachen (z. B. women – nurturing) als wenn sie es nicht taten (z. B. men – nurturing). Gleichzeitig erzeugten die kongruenten Wortpaare kleinere N400-Amplituden als die inkongruenten, weshalb die Vermutung naheliegt, dass die Stereotypen entsprechenden Primingeffekte das assoziative Gedächtnis aktivieren und somit den Zugang zum mentalen Lexikon erleichtern (vgl. White et al. 2009: 195). Zwar konnten andere, ähnlich gelagerte Studien keine solchen Effekte finden, jedoch erfährt diese Erkenntnis Unterstützung in Form von Befunden verschiedener Studien, die sich bildgebende Verfahren zunutze machen.

Die Bilder, die mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) gemacht wurden, wiesen in den typischen N400 elizitierenden Konditionen semantische Primingeffekte im mittleren Bereich des posterioren Temporallappens nach. Magnetoenzephalographie-Studien (MEG) stützen diese Erkenntnisse, indem sie solche Primingeffekte ebenfalls in ebendieser Region einordnen, in der aktuellen Modellen zufolge der erleichterte Lexikonzugriff stattfindet (vgl. Lau et al. 2008: 928). Bezieht man also auch Studien mit ein, die mit solchen bildgebenden Methoden arbeiten, erscheint eine Reduzierung der N400-Komponente einzig und allein auf die semantische Integration von Wörtern nicht adäquat. Stattdessen deuten die zusammengenommenen Ergebnisse darauf hin, dass dieser integrative Prozess und der Kontext den lexikalischen Zugriff beeinflussen, da aufgrund der auf diese Weise gelieferten Informationen Vorhersagen getroffen werden, d. h. entsprechende Konzepte kognitiv aktiviert werden. Obwohl diese Daten den Ansatz unterstützen, die N400 repräsentiere vor allem die Schwierigkeit bzw. Leichtigkeit der Abfrage von Einträgen im mentalen Lexikon, so wird dennoch nicht per se ausgeschlossen, dass der Input aus verschiedenen semantischen Quellen den Effekt je nach untersuchtem Paradigma beeinflussen könnte (vgl. Lau et al. 2008: 928 f.).

In ihrer Rekapitulation der mehr als 30-jährigen N400-Geschichte argumentieren Kutas und Federmeier in Anbetracht dieser konkurrierenden Ansichten wie folgt:

In the context of the typical stream of brain activity triggered by an incoming stimulus, the N400 can be characterized as a temporal interval in which unimodal sensory analysis gives way to multimodal associations in a manner that makes use of – and has consequences for – long-term memory (2011: 639).

Dieser Ansatz trägt den verschiedenen topographischen und zeitlichen Ausprägungen des Effekts in Abhängigkeit von der Modalität der präsentierten Stimuli Rechnung. Darüber hinaus könnte die Geschwindigkeit der Verarbeitung unter diesen Gesichtspunkten ebenfalls von der Komplexität der Stimuli sowie von dem Grad der Bekanntheit abhängen. All diese Faktoren beeinflussen wiederum die Zeit, die benötigt wird, um zu einem Endergebnis zu kommen, demzufolge ein Stimulus als etwas bereits Bekanntes (perzeptuell oder aufgrund von Priming) erkannt wird. Die Differenzen im Hinblick auf die modalitätsabhängige Latenz lassen daher vermuten, dass der durch die N400-Komponente angezeigte Zugriff auf das semantische Langzeitgedächtnis, abhängig von den Stimulus-Arten und den Untersuchungsbedingungen, zu verschiedenen Zeitpunkten zwischen dem Moment der Wahrnehmung und der Wiedererkennung stattfinden kann (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 639 f.). Das bedeutet, dass die N400-Komponente statt der Aktivierung der konkreten Bedeutung eines bestimmten Wortes, womöglich viel eher die Aktivität des semantischen Systems anzeigt, das in ein multimodales System eingebunden ist. Da dieses System, das sowohl durch interne Faktoren, wie das Langzeitgedächtnis, Erinnerungen sowie die aktuelle Situation und Stimmung des Probanden, als auch durch externe Einflüsse, wie Primingeffekte, bestimmt wird, ständig aktiv

ist, stellen zusätzliche Stimulusgaben lediglich einen weiteren Input für die neuronale Aktivität dar (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 640). Statt also den exakten Moment der Bedeutungszuweisung eines Stimulus anzuzeigen, beschreibt der N400-Effekt wohl eher einen wichtigen Teil des dynamischen Gesamtprozesses, der durch eine Vielzahl an neuronalen Operationen gesteuert wird (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 642).

Die hier im Vordergrund stehende N400-Komponente war und ist also schon für sich genommen noch immer Gegenstand für lebhaft Diskussionen. Ein weiterer Aspekt, dessen Betrachtung im Lichte neuer Erkenntnisse zu beachten ist, ist die Interaktion von Semantik und Syntax. Obwohl anhand der oben bereits diskutierten EKPs (ELAN, LAN, N400 und P600) weitgehend Einigkeit darüber herrscht, dass die Sprachverarbeitung hinsichtlich semantischen und syntaktischen Aspekten differenziert werden kann, ist noch immer unklar, wann und wie die Informationen aus diesen beiden Bereichen kombiniert werden (vgl. Hagoort 2003: 885). Wie Friederici (2002) schon nachgewiesen hat, treten in syntaktisch nicht korrekten Sätzen (also denjenigen, die aufgrund von Verletzungen der Wortkategorie ELAN hervorrufen) keine N400-Effekte auf. Dies deutet zunächst darauf hin, dass keine Integration des Inhalts stattfindet, wenn Wörter syntaktisch nicht einwandfrei verarbeitet werden können (vgl. Meyer et al. 2007: 1012).

In einer weiteren Studie zur Interaktion der N400- und P600-Komponente hingegen wurde bestätigt, dass eine Kombination aus semantischen und syntaktischen Verletzungen nicht durch eine pure Addition der beiden einzelnen Effekte repräsentiert werden kann (vgl. Hagoort 2003: 887). Obwohl dieser Umstand dafür spricht, dass die für semantische bzw. syntaktische Verarbeitung zuständigen neuronalen Konstrukte teilweise überlappen, d. h. eine Interaktion der beiden Systeme stattfindet, konnte Hagoort eine Asymmetrie zwischen der semantischen und syntaktischen Analyse feststellen.

Syntactic analysis is unaffected by semantic integration problems. Intuitively, this implies that assigning structure to a Jabberwocky sentence is as easy as assigning structure to a meaningful sentence. Semantic integration is, however, harder in the presence of a syntactic processing problem (Hagoort 2003: 895).

Das macht er daran fest, dass in den Fällen, in denen Stimuli eine Kombination aus semantischen und syntaktischen Verletzungen enthielten, größere N400-Amplituden gemessen werden konnten als in der einfachen semantischen Inkongruenz, während die P600 keine Veränderung zu der reinen syntaktischen Verletzungskondition aufwies. Dies spricht dafür, dass syntaktische Informationen schon verarbeitet werden, bevor der syntactic positive shift sichtbar wird. Dieser Umstand lässt wiederum an der Angemessenheit der Modelle zur Sprachverarbeitung zweifeln, da in diesen aufgrund des zeitlichen Auftretens der EKPs angenommen wird, dass semantische bzw. syntaktische Informationen entsprechend zu diesen Zeitpunkten neuronale Prozesse auslösen. Allerdings sollte bei der Beurteilung solcher Rückschlüsse immer beachtet werden, dass bis jetzt nicht endgültig geklärt ist, ob die

sprachbezogenen EKPs direkte Anzeichen für die sprachverarbeitenden Schritte sind oder vielmehr andere (kognitive, neuronale etc.) Prozesse dahinterstecken, durch die die Sprachverarbeitung indirekt beeinflusst wird (vgl. Hagoort 2003: 895).

4 Zwischenfazit

Die vorausgehenden Darstellungen zeigen, dass es sich bei der Elektroenzephalographie und insbesondere der ereigniskorrelierten Potenziale um eine sehr geeignete Methode handelt, mit deren Hilfe die Prozesse der Sprachverarbeitung auf nichtinvasive Weise mehr oder weniger unmittelbar nachverfolgt werden können. Dies beschränkt sich jedoch vor allem auf die zeitliche Auflösung der kognitiven Prozesse. Obwohl die EEG-Daten auch Auskunft darüber geben, an welchen Elektroden die Signale am stärksten gemessen werden können, sind diese Angaben kritisch zu betrachten. Durch das elektrische Feld, das bei der Aktivierung einer Gruppe Neuronen im Gehirn erzeugt wird, ist die erzeugte Spannung nicht an der unmittelbar darüber liegenden Stelle des Schädels messbar. Vielmehr breitet sich die Spannung feldartig aus, sodass es zu Überlappungen kommt und die gemessene elektrische Aktivität womöglich ursprünglich von einer anderen Quelle stammt als diejenige, die direkt unter der entsprechenden Elektrode liegt (vgl. Molfese et al. 2001: 180 f.). Auch wenn demnach keine Eins-zu-eins-Zuordnung der Gehirnaktivität mit einzelnen Elektroden möglich ist, geben die so gewonnenen Daten dennoch Aufschluss über die grobe räumliche Ausprägung der neuronalen Aktivitäten bei verschiedenen kognitiven Prozessen. Darüber hinaus dienen sie zur Differenzierung unterschiedlicher Potenziale, die sich neben der Latenz, Amplitude und Polarität eben auch durch die Topographie voneinander abgrenzen lassen (vgl. Drenhaus/beim Graben 2012: 74). So ist die Unterscheidung zwischen N400 und den LAN beispielsweise vor allem aufgrund ihres Vorkommens an verschiedenen Elektroden möglich. Während die LAN überwiegend an den Elektroden über den vorderen Regionen der linken Hemisphäre auftritt (vgl. Friederici et al. 1996: 1221), ist die N400 vor allem im Bereich der zentralen und parietalen Elektroden der rechten Gehirnhälfte messbar (vgl. Luck 2014: 102). Diese N400-Komponente, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit im Vordergrund stehen wird, erwies sich vor allem in frühen Studien als „sensitive indicator of the relationship between a word and its context“ (Kutas/Hillyard 1983: 547), wobei die Größe der Amplitude in linearer Abhängigkeit zur Erwartbarkeit des Zielwortes in einem gegebenen Kontext steht. Damit gibt die N400-Komponente Hinweise auf die Abläufe bei der semantischen Integration der Wörter, die offensichtlich nicht mit der syntaktischen Verarbeitung eines Satzes identisch ist. Aufgrund der Entdeckung der ELAN und der LAN lässt sich vermuten, dass es semantik- bzw. syntaxspezifische Verarbeitungsmechanismen im Gehirn gibt, die zunächst unabhängig voneinander arbeiten, in einem weiteren Schritt jedoch miteinander interagieren. Die anfangs von vielen Linguisten als Entsprechung der N400 im Bereich der Syntax gehandelte P600

scheint in einer dritten Phase des Prozesses der Sprachverarbeitung eine Art übergeordnete Kontrolle vorzunehmen und entsprechende Korrekturmaßnahmen einzuleiten, sollte es zu einer Unstimmigkeit zwischen den Informationen aus Syntax und Semantik gekommen sein. Aktuellere Erkenntnisse zu den einzelnen EKPs sowie zu der N400-P600-Unterscheidung werfen jedoch ein neues Licht auf diese Interpretation der kognitiven Prozesse. Das Auftreten N400-ähnlicher Effekte bei der Untersuchung anderer Modalitäten spricht stark für die Auffassung, dass es sich bei keinem EKP-Effekt um ein sprachspezifisches Phänomen handelt (vgl. Hagoort 2003: 895). Bezogen auf die N400-Komponente bedeutet das, dass sie vermutlich adäquater als ein Anzeichen für die Verarbeitung von Bedeutung allgemein angesehen werden kann (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 636). Da es sich bei Sprache jedoch eindeutig um ein bedeutungstragendes Medium handelt, erweist sich diese Komponente als besonders geeignet für die Untersuchung von Sprachverarbeitungsprozessen.

Was bedeuten diese EEG-Daten dann also für unser Verständnis von Sprachverarbeitung? Es konnte hinlänglich gezeigt werden, dass es offensichtlich verschiedene Mechanismen für die Verarbeitung von Informationen aus den Bereichen der Semantik und Syntax gibt. Jedoch ist es auch anhand der vorliegenden Daten nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage über die Interaktion dieser neuronalen Mechanismen zu treffen. In Kapitel 2.2.3 wurden verschiedene Modelle der Sprachverarbeitung vorgestellt, die sich vor allem aufgrund ihrer Annahmen zum Zeitpunkt der Integration von semantischen und syntaktischen Informationen unterscheiden. Die Tatsache, dass syntaktische Informationen aber womöglich schon verarbeitet werden, bevor sich der SPS in EEG-Daten zeigt, lässt jedoch daran zweifeln, dass die neuronalen Aktivitäten tatsächlich zum Zeitpunkt der gemessenen EKPs stattfinden. Stattdessen deuten vor allem die Daten zur Satzverarbeitung darauf hin, dass das Sprachverstehen ein Prozess ist, der alle verfügbaren Informationen so schnell wie möglich nach ihrem Auftauchen mit einbezieht (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 634). Dabei wird die Komplexität dieser Aktivität von verschiedenen Faktoren, wie der Modalität, der Frequenz etc., beeinflusst, was sich wiederum in unterschiedlich ausgeprägten Amplituden der Kurve niederschlägt (vgl. Hagoort 2003: 896).

Aus diesem Grund scheint auch eine Neuinterpretation der N400-Komponente angemessen. Statt also lediglich die semantische Integration von Wörtern in den Satzkontext anzuzeigen, sprechen die Ergebnisse aus den zuvor vorgestellten Studien dafür, die N400 als Hinweis auf einen Teil des Gesamtprozesses der Bedeutungskonstruktion anzusehen, in den beispielsweise auch der Zugriff auf das Langzeitgedächtnis sowie das assoziative Gedächtnis integriert ist (vgl. Guajardo/Wicha 2014: 271). Zu dem Zeitpunkt, wenn die N400-Komponente auftritt, kann die Bedeutungszuweisung demnach noch unabgeschlossen sein. Da es sich beim Sprachverstehen jedoch um einen dynamischen Prozess handelt, der sich mithilfe der ständig dazukommenden Informationen weiterentwickelt, ist eine Neuinterpretation zuvor

getroffener Annahmen durchaus denkbar (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 642). Tatsächlich könnte der P600-Effekt, der ja wie oben beschrieben, Reanalyseprozesse anstoßen kann, ein Anzeichen für die Notwendigkeit einer Überarbeitung der verwendeten Konzepte sein. In diesem Fall zeigt der Effekt also vermutlich tatsächlich das Endergebnis der Evaluation an und nicht die bei der Reanalyse ablaufenden Prozesse (vgl. Hagoort 2003: 896).

Primingexperimente sowie das Ergebnis, dass zumindest erwachsene, gesunde Menschen Kontextinformationen (interne wie externe) nutzen, um Wörter vorherzusehen (also Konzepte kognitiv zu aktivieren) unterstützen diese breiter gefächerte Interpretation der N400-Komponente (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 634). Tatsächlich scheint der Versuch, wahrgenommenen Zeichen Bedeutung zuzuweisen das ‚Standardvorgehen‘ zu sein, wenn Menschen keine zusätzliche Aufgabe für den Umgang mit Informationen haben (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 630). Aus diesem Grund ist vermutlich auch die Zuordnung der N400-Komponente in die kognitiver Kontrolle unterliegenden Kategorie, wie sie Friederici 2001 vorgenommen hat, nicht vollkommen angemessen. Jedoch scheint es sich, aufgrund der Ergebnisse ebendieser Studie, ebenso wenig um einen ausschließlich automatisierten Prozess zu handeln. Es kann also hinsichtlich dieser Eigenschaft der N400-Komponente festgehalten werden, dass eine eindeutige Zuordnung in die automatisierte bzw. kontrollierte Verarbeitung schwierig ist (vgl. Kutas/Federmeier 2011: 631).

Anhand der hier dargestellten Studien und ihrer Ergebnisse konnte nun ein ausführlicher Überblick über die Forschung zu ereigniskorrelierten Potenzialen in der Sprachverarbeitung gegeben werden. Auch wenn – oder vielleicht gerade weil – sich die Erkenntnisse verschiedener Studien häufig widersprechen, konnte ein grundlegendes Verständnis der neurokognitiven Prozesse, die zum Sprachverstehen beitragen, geschaffen werden. Dazu zählt auch, dass die EEG- und EKP-Daten zwar Anhaltspunkte für Rückschlüsse auf zugrunde liegende Prozesse liefern können, jedoch noch immer viel Interpretationsspielraum besteht und die Richtigkeit der hier wiedergegebenen Annahmen teilweise noch nicht zweifelsfrei festgestellt werden konnte. Die hier vorgenommene theoretische Betrachtung der sprachbezogenen ereigniskorrelierten Potenziale, insbesondere der N400-Komponente, soll mit einem Zitat schließen, das die Komplexität auf zahlreichen Ebenen der Sprachverarbeitung treffend veranschaulicht:

N400 data thus attest to the incredible power of the language system to rapidly access, integrate, and adapt to word, sentence, and discourse information, along with world knowledge and common ground (Kutas/Federmeier 2011: 632).

Auf Basis dieser Erkenntnisse soll es im folgenden Teil der vorliegenden Arbeit um die Entwicklung und Durchführung eines EEG-Experiments mit dem Ziel des Nachweises des N400-Effekts gehen.

5 Durchführung eines EEG-Experiments

Da die N400-Komponente, wie oben bereits erwähnt, schon seit den 1980er-Jahren erforscht wird, gibt es umfassende Erkenntnisse über ihren Ursprung und ihre Erscheinungsform. Dies machte sich unsere Projektgruppe zunutze, um ein erstes Experiment mit der EEG-Methode durchzuführen, die erst kürzlich in den Methodenkanon der *psycholinguistics laboratories* aufgenommen wurde. In den folgenden Unterkapiteln soll der Prozess dieses Experiments Schritt für Schritt dokumentiert werden.

5.1 Experimentdesign

Obwohl wir uns bei der Gestaltung des Experiments mehr oder weniger stark an den bereits vorliegenden Studien orientiert haben, sollte natürlich nicht lediglich ein existierendes Paradigma übernommen werden. Da die bisher schon häufig zitierten Studien teilweise weit in der Vergangenheit liegen, bot sich die Gelegenheit, einige Aspekte zu modifizieren. Darüber hinaus zeichnen sich die meisten der zitierten Studien dadurch aus, dass sie englischsprachige Probanden untersuchten. Ein Faktor, der bei der Gestaltung des hier beschriebenen Experiments beachtet wurde, war die Erstellung eines deutschen Stimulussets. Darauf soll später noch im Detail eingegangen werden. Zuvor sollen weitere Vorüberlegungen verschriftlicht werden. Darin sind vor allem die zugrunde liegenden Hypothesen enthalten sowie Überlegungen zur Kombination von EEG-Daten mit Eye-Tracking (ET).

5.1.1 Vorüberlegungen

Ganz zu Beginn stand die Recherche zum N400-Paradigma, in deren Zuge u. a. die in Kapitel 2 vorgestellten Informationen zusammengetragen wurden. Die umfangreiche Literatur ermöglichte es, eine grobe Vorstellung davon zu bekommen, wie ein Experiment designt werden muss, wenn die Elizitation des N400-Effekts erzielt werden soll. Dabei kristallisierten sich schnell die Hypothesen heraus, die den weiteren Verlauf der Arbeit leiten sollten.

- 1) Eine semantische Verletzung erzeugt einen N400-Effekt im EEG.
- 2) Die Stärke des N400-Effekts ist linear abhängig von der Schwere der semantischen Inkongruenz.

Diese Hypothesen gehen konform mit den Ergebnissen der zuvor durchgeführten EEG-Studien zur semantischen Inkongruenz und dienen in dem hier geschilderten Fall lediglich dazu, die Überlegungen zum Paradigma zu leiten und ausdrücklich nicht, um der aktuellen Datenlage neue Erkenntnisse hinzuzufügen. Darüber hinaus wurden auch die Erkenntnisse aus aktuelleren Studien, die in Kapitel 3 ausführlich betrachtet wurden, für die explorative Arbeit an dem N400-Paradigma nicht berücksichtigt. Auch wenn das geplante EEG-

Experiment vorrangig der Replizierung bereits gut belegter Effekte dienen sollte, so gibt es doch einen innovativen Aspekt: Neben dem EEG soll zusätzlich die Methode des Eye-Tracking zum Einsatz kommen.

5.1.2 Methoden – Kombination von EEG und ET

Ebenso wie das EEG ist auch das Eye-Tracking eine nichtinvasive Forschungsmethode, die seit den 1970er-Jahren besonders bei der Erforschung kognitiver Prozesse Anwendung findet (vgl. Rayner 1998: 372). Besonders verbreitet sind die Infrarot-Tracker, die entweder unter einem feststehenden Bildschirm angebracht sind oder auch in Form einer Brille aufgesetzt werden können und mit Infrarotsensoren die Augenbewegungen messen. Da der Fokus dieser Arbeit jedoch explizit auf der Methode der Elektroenzephalographie liegt, soll an dieser Stelle nicht weiter auf die Funktionsweise von verschiedenen Eye-Trackern eingegangen werden.

Durch zahlreiche Eye-Tracking-Studien konnte bereits hinreichend belegt werden, dass es einen Unterschied zwischen den sogenannten Sakkaden und den Fixationen gibt. Sakkaden sind ruckartige Augenbewegungen, die teilweise nur 80 ms dauern und eine Geschwindigkeit von um die 500 Grad/s erreichen können. Im Gegensatz dazu ruhen die Augen während der Fixationen auf dem fixierten Objekt (vgl. Zimmermann 2014). Nur während der Fixation kann das Auge neue Informationen aufnehmen. Durch die schnelle Bewegung bei der Sakkade erscheint alles verschwommen, sodass das Auge mehr oder weniger blind ist, was als sakkadische Suppression bezeichnet wird (vgl. Rayner 1998: 373). Ausgehend von diesen grundlegenden Augenbewegungen ergibt sich, dass die Messung von Fixationen Einblicke in die Aufmerksamkeitssteuerung geben kann. Eine typische Fixation dauert etwa 200 - 300 ms, wobei die Länge der Fixation unmittelbar damit zusammenhängt, wie intensiv ein fixiertes Objekt und somit eine fixierte Information verarbeitet wird. Dabei können neben der Untersuchung einer kompletten Umgebung auch spezifische *areas of interest* (AOIs) definiert werden, die die Aufmerksamkeitssteuerung innerhalb dieser spezifischen Elemente betrachten. Im Gegensatz dazu geht man davon aus, dass Sakkaden Informationen über assoziative Prozesse geben können und somit als Indizien für die Integration von Informationen interpretiert werden können (vgl. Bera et al. 2019: 5).

Auf Grundlage dieser Zusammenhänge soll die Eye-Tracking-Methode auch in unserem Experiment Verwendung finden. Neben den Gehirnwellen sollen zusätzlich die Augenbewegungen der Probanden aufgezeichnet werden, jedoch nicht um eine konkrete Hypothese bezüglich der zugrunde liegenden kognitiven Prozesse zu überprüfen. Stattdessen soll die Methode lediglich als Tool dienen, um sicherzugehen, dass die Probanden den Stimulussätzen, die im nächsten Unterkapitel genauer beschrieben werden, aufmerksam folgen. Auf diese Weise kann auf eine sekundäre Aufgabe (wie z. B. ein Tastendruck o. ä.) verzichtet werden, sodass tatsächlich die EEG-Daten, die Einblicke in neurokognitive

Prozesse geben sollen, im Vordergrund stehen und durch die Eye-Tracking-Daten validiert werden. Wie genau die Synchronisation beider Methoden in diesem konkreten Fall funktioniert, wird im späteren Verlauf der Arbeit genauer thematisiert, wenn es in der Auswertung des Experiments um die Integration der Informationen aus den beiden Datenquellen geht.

5.1.3 Stimuli

Die Erstellung der Stimuli erwies sich als besonders komplex. Eine bekannte Schwierigkeit bei der Forschung mit EKPs ist die Menge an Stimuli, die dafür produziert werden muss (vgl. Beres 2017: 253). In Anlehnung an die EEG-Studien, die als Orientierung hinzugezogen wurden (insbesondere Kutas/Hillyard 1980a, 1980b, 1983, 1984, van Petten/Kutas 1990, van Petten/Luka 2012, Münte et al. 1990), sollten ca. 300 - 360 Sätze untersucht werden, wobei zum Zwecke der Überprüfung von Hypothese 2 die Stärke der semantischen Verletzung variiert werden sollte. Daraus ergab sich, dass insgesamt 300 Sätze gebildet wurden, wovon 100 semantisch stark inkongruent waren, während 100 weitere eine moderate Verletzung aufwiesen und 100 Sätze semantisch absolut kongruent waren. Aus dieser Aufteilung geht hervor, dass auf Filler verzichtet wurde. Durch diese gleichmäßige Verteilung der Stimuli auf drei Konditionen wurde sich bewusst gegen eine ungleichmäßige Aufteilung der Sätze entschieden, wie sie von Kutas und Hillyard (1980b) verwendet wurde. Auf diese Weise soll der sogenannte Startle-Effekt vermieden werden.

Legt man die Definition von *Startle* zugrunde, die beispielsweise bei Rivera et al. (2014) zu finden ist, handelt es sich bei diesem Effekt um einen Reflex, der in der Regel von einer plötzlichen Konfrontation mit einer intensiven Stimulation ausgelöst wird und wiederum eine Kampf-oder-Flucht-Reaktion sowie eine starke emotionale Reaktion auslöst (vgl. Rivera et al. 2014: 1047). Diesen Schreck stellen die Autoren der *Überraschung* gegenüber, die sie als „cognitive-emotional response to something unexpected, which results from a mismatch between one's mental expectations and perceptions of one's environment“ (Rivera et al. 2014: 1048) definieren. Aufgrund dieser Definitionen scheint es wahrscheinlicher, dass eine ungleichmäßige Verteilung der Stimuli auf die drei Konditionen eher einen Überraschungseffekt als einen starken Startle-Effekt auslösen würde. Auch wenn man sich über die Terminologie streiten kann, so ist das Ziel der oben geschilderten Entscheidung für eine gleichmäßige Verteilung der Stimuli doch eindeutig: Auf diese Weise sollte vermieden werden, dass die Sätze einer bestimmten Kondition von dem Schema der anderen Stimuli abweichen und aus diesem Grund eine Überraschungsreaktion auslösen, die im schlimmsten Fall die kognitiven Prozesse, die im Experiment untersucht werden sollen, unterbrechen und die Aufmerksamkeit der Probanden mehr auf die plötzliche Veränderung lenken als auf die Existenz bzw. Stärke der semantischen Inkongruenz (vgl. Meyer et al. 1991: 296).

Um im EEG möglichst wenig Noise zu erzeugen, die die Auswertung der Daten erschwert, sollten ebenfalls die Stimuli an sich möglichst wenig Varianz enthalten (vgl. Beres 2017: 253). Aus diesem Grund wurde für eine identische Satzstruktur über alle 300 Sätze hinweg plädiert. Daher weisen die verwendeten Sätze alle die gleichen Eigenschaften auf: Es handelt sich dabei um aktive Sätze, die im Präsens formuliert sind, und der Struktur Subjekt – Prädikat – Objekt – Präpositionalphrase folgen, wobei sie mit einem Nomen, dessen semantische Kongruenz entsprechend der oben genannten Konditionen manipuliert wurde, enden. Alle Sätze bestehen aus genau acht Wörtern. Darüber hinaus wurde auf einen Punkt am Satzende sowie jede andere Form der Interpunktion verzichtet, um deren Einfluss auf die kognitive Verarbeitung der Sätze zu vermeiden.

Aufgrund dieser Vorgaben wurde die Forschungsgruppe um Goregliad Fjaellingsdal kontaktiert, die 2016 eine Studie zum N400-Effekt veröffentlicht hat, in der ein ähnlicher Versuchsaufbau verwendet wurde. Ziel ihrer Studie war die Untersuchung der N400 in konversationellen Kontexten, die dem Alltagsgebrauch von Sprache nachempfunden sind. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Studien, die den N400-Effekt häufig unter artifiziellen Laborbedingungen nachgewiesen haben, lag bei Goregliad Fjaellingsdal und ihren Kollegen der Fokus auf dem Element des Turn-Takings (vgl. 2016: 2). Mit diesem Hintergrund leisten sie einen Beitrag zur Weiterentwicklung der EEG-Forschung in der Psycholinguistik, indem sie sich den Herausforderungen der Methode stellen und versuchen, die Sprachverarbeitung in natürlich-sprachlichen Situationen zu verstehen. Diese dialogartigen Situationen wurden geschaffen, indem den Probanden zunächst Satzfragmente bestehend aus sieben Wörtern visuell präsentiert wurden. Entweder sollten diese Fragmente von den Probanden laut vorgelesen werden oder sie wurden zusätzlich zur visuellen Präsentation von einem zuvor aufgenommenen Sprecher vorgelesen. Das letzte kritische Wort wurde schließlich von einem anderen zuvor aufgezeichneten Sprecher geäußert. Dabei konnte es entweder semantisch kongruent oder inkongruent sein, wodurch sich insgesamt vier Konditionen ergeben: Hören kongruent, Hören inkongruent, Vorlesen kongruent, Vorlesen inkongruent. Auf diese Weise ist ein Sprecherwechsel in allen vier Konditionen gegeben, wobei sichergestellt ist, dass beim Auftreten des kritischen Wortes am Satzende keine Muskelbewegungen der Probanden die Messung der EEG-Daten beeinflussen, da das letzte Wort in jedem Fall von einem zuvor aufgezeichneten Sprecher präsentiert wird (vgl. Goregliad Fjaellingsdal et al. 2016: 3).

Das von ihnen verwendete Stimulusmaterial bestand aus 40 deutschen Acht-Wort-Sätzen, die jeweils dem Muster Subjekt – Prädikat – direktes Objekt – Ziel/Richtung folgen (z. B. *Der Lehrer bringt die Kinder in diese Schule.*) Ausgehend von diesen 40 Sätzen entwickelte die Forschungsgruppe weitere Sätze für die semantisch kongruente Bedingung, indem die Subjekte und direkten Objekte im Sinne der Wortfeldtheorie durch verwandte Wörter ersetzt wurden, sodass insgesamt 160 kongruente Sätze untersucht werden konnten (z. B. *Die Mutter*

bringt die Töchter zu dieser Schule). Die inkongruenten Sätze wurden entsprechend gebildet, indem das finale Wort durch eines aus einem anderen kongruenten Satz ersetzt wurde (vgl. Goregliad Fjaellingsdal et al. 2016: 3 f.).

Um Gewöhnungseffekte auszuschließen bzw. zu vermeiden, dass Probanden der Studie der *psycholinguistics laboratories* versuchen, das Satzende zu erraten und als Konsequenz daraus nicht mehr das kritische Wort am Satzende lesen, sollten sich sowohl die satzfinalen Wörter als auch die Satzkontexte möglichst nicht wiederholen. Aus diesem Grund konnte nur ein Teil des Stimulussets aus der Studie von Goregliad Fjaellingsdals et al. verwendet werden. Sie variierten die finalen Wörter von 40 beschriebenen Situationen. Daher dienten auch nur die 40 ursprünglich von ihnen formulierten Sätze als Ausgangspunkt für die Entwicklung weiterer Stimuli. Die restlichen 260 Sätze wurden daran anschließend selbstständig entwickelt. Durch die Vorgabe, dass die semantische Verletzung immer auf dem letzten Wort liegen sollte, weist unser Experiment starke Ähnlichkeiten zu denen von Kutas und Hillyard auf. Des Weiteren sprechen die Ergebnisse von van Petten und Kutas (1990) für die Wahl der satzfinalen Position, da auf diese Weise durch die zuvor präsentierten Wörter ein ausreichend definierter Kontext gegeben werden kann, um einen starken bzw. moderaten N400-Effekt zu erzielen oder im Fall von kongruenten Wörtern nicht nachzuweisen.

Der erste Ansatz zur Differenzierung zwischen starken und moderaten Inkongruenzen nahm Bezug auf die Wortfeldtheorie.

Jedes ausgesprochene Wort lässt seinen Gegensinn anklingen. Und noch mehr als dies. In der Gesamtheit der beim Aussprechen eines Wortes sich empordrängenden begrifflichen Beziehungen ist die des Gegensinns nur eine und gar nicht die wichtigste. Neben und über ihr taucht eine Fülle anderer Worte auf, die dem ausgesprochenen begrifflich enger oder ferner benachbart sind. Es sind seine Begriffsverwandten. Sie bilden unter sich und mit dem ausgesprochenen Wort ein gegliedertes Ganzes, ein Gefüge, das man Wortfeld oder sprachliches Zeichenfeld nennen kann (Trier 1973: 40).

Auf Basis dieser Annahme, wurde zunächst davon ausgegangen, dass Angehörige des gleichen Wortfeldes – auch wenn sie keine passende Vervollständigung eines gegebenen Kontexts sind – „weniger falsch“ erscheinen als solche, die einem gänzlich anderen Wortfeld entstammen. Verschiedene Validierungsversuche zeigten jedoch, dass dieser Ansatz zu kurz gegriffen war. Da es keine quantifizierbare Möglichkeit gibt, Wortfelder klar zu umgrenzen, basierte die vorgenommene Zuordnung der Stimuli auf einer sehr subjektiven Einschätzung. Die Idee, Wortfelder mithilfe von Kollokationen zu ermitteln, musste ebenfalls schnell wieder verworfen werden, da Kollokationen in der Regel Kombinationen verschiedener Wortarten (z. B. Subjekt – Verb, Adjektiv – Subjekt etc.) sind und daraus nicht ablesbar ist, welche Subjekte sich für den hier gegebenen Fall der Ersetzung eines Subjekts eignen, die eine moderate bzw. starke semantische Verletzung erzeugen.

Stattdessen fand die Differenzierung zwischen moderater und starker Inkongruenz schließlich auf Basis der physikalischen Möglichkeit der in den Sätzen beschriebenen Situation statt.

Während die satzfinalen Wörter in der stark inkongruenten Kondition den Kontext vervollständigen, indem sie eine Handlung oder Situation beschreiben, die in dieser Form gemessen an unserer Realität nicht möglich ist, bilden Sätze der moderat inkongruenten Kondition Sachverhalte ab, die zwar ungewöhnlich sind, rein physikalisch jedoch durchaus im Rahmen des Vorstellbaren liegen. Auf diese Weise wird eine gegebene ‚Denkbarkeit‘ des Szenarios als moderate Verletzung der Semantik angenommen, während eine starke Inkongruenz dadurch geschaffen wird, dass das kritische Wort keinerlei Beziehungen zum semantischen Sinn des Satzkontexts aufweist. Diese Zuordnung wurde durch Ratings unbeteiligter Personen überprüft. Zu diesem Zweck wurden die 300 Sätze in drei Listen aufgeteilt, deren 100 Sätze jeweils zu etwa einem Drittel Sätze jeder Kondition aufwiesen. Wurde ein Satz von allen Ratern unabhängig in dieselbe Kategorie – kongruent, moderat inkongruent, stark inkongruent – eingeordnet, so wurde er als akzeptabler Stimulussatz in das finale Stimulusset aufgenommen, das in Anhang 1 eingesehen werden kann. Diese Prozedur musste zweimal durchgeführt werden, um auch die nach dem ersten Durchgang überarbeiteten Stimuli erneut überprüfen zu lassen. Besonders die Entwicklung der Stimulussätze in der moderat inkongruenten Kondition erwies sich als schwierig, da die Bewertung Ausdruck eines sehr subjektiven Empfindens ist, das in diesem Fall besonders von der Fantasie der Befragten abhängt. Nach dem zweiten Durchgang wurden jedoch ausreichend hohe Übereinstimmungen erzielt, sodass eine erneute Überprüfung nicht mehr nötig war.

Darüber hinaus wurde die Frequenz der satzfinalen Wörter überprüft. Zu diesem Zweck wurde das Deutsche Referenzkorpus (DeReKo) des Instituts für Deutsche Sprache, das etwa 46,9 Milliarden Wörter aus u. a. belletristischen, wissenschaftlichen sowie populärwissenschaftlichen Texten und Zeitungstexten umfasst (vgl. Kupietz et al. 2018: 4354 f.) herangezogen. Gemessen gegenüber der Häufigkeit des in deutschsprachigen Korpora am häufigsten vorkommenden Wortes „der“ (vgl. IDS 2018) wurden den Zielwörtern in den Stimulussätzen jeweils sogenannte Häufigkeitsklassen (s. Anhang 2) zugewiesen.

Mit Häufigkeitsklassen werden alle Wörter des gesamten Vokabular nach ihrer Häufigkeit in Klassen aufgeteilt, wobei Wörter derselben Klasse ungefähr gleich häufig sind. In der Praxis werden hierfür bis zu 30 Häufigkeitsklassen unterschieden, und sie tragen die Nummern 0, 1, 2, 3, usw. Zu beachten ist hierbei: Je niedriger die Nummer der Häufigkeitsklasse, desto häufiger sind die darin befindlichen Wörter (Keibel 2008, 2009).

Auf diese Weise lässt sich eine quantifizierbare Aussage über deren Frequenz treffen. Wie in der theoretischen Einführung zum N400-Effekt bei der Betrachtung der Ergebnisse von van Petten und Kutas (1990) bereits dargelegt wurde (Kapitel 2.2.1), hat die Frequenz der open class-Wörter in satzfinaler Position kaum bis gar keinen Einfluss auf den Effekt selbst. Jedoch wurde in dem hier beschriebenen Experiment auch die Worthäufigkeit kontrolliert, um

sicherzustellen, dass keine Überraschungseffekte, ähnlich des Startle-Effekts, aufgrund der Präsentation niederfrequenter Wörter auftauchen. In der Stimulusübersicht in Anhang 1 sind ebenfalls die Häufigkeitsklassen der satzfinalen Wörter vermerkt. Wie daraus hervorgeht, wurden ausschließlich Wörter verwendet, die in den mittleren Klassen (7 bis 17) enthalten sind. Auf diese Weise sollten neben sehr selten verwendeten Wörtern ebenso sehr hochfrequente Wörter ausgeschlossen werden. Da Letztere in der Regel jedoch vor allem Wörter der geschlossenen Klasse sind (wie beispielsweise bestimmte Artikel und Konjunktionen), stand in dem hier vorliegenden Fall vor allem der Ausschluss niederfrequenter Wörter im Vordergrund (vgl. Keibel 2008, 2009). Bei der Verwendung des DeReKo zur Frequenzüberprüfung sollte an dieser Stelle jedoch betont werden, dass in dem Korpus lediglich Daten der geschriebenen Sprache enthalten sind. Da das hier vorgestellte Experiment jedoch ebenso die Stimuli visuell präsentiert, können die Korpusdaten für eben diese Modalität hinzugezogen werden.

Bezüglich der Darbietung der Stimuli wurde sich ebenfalls an dem Versuchsaufbau von Kutas und Hillyard (1980a, 1980b, 1981, 1984) orientiert. Dementsprechend sollten die Sätze Wort für Wort präsentiert werden, wobei jedes Wort für 100 ms eingeblendet wird (vgl. Kutas/Hillyard 1980b: 203). Dieses Intervall wurde zusätzlich gewählt, um sicherzustellen, dass alle Wörter eines Satzes fixiert werden, und somit davon ausgegangen werden kann, dass sie auch verarbeitet werden. Zur Überprüfung dieser Voraussetzung sollte außerdem der Einsatz der Eye-Tracking-Methode beitragen.

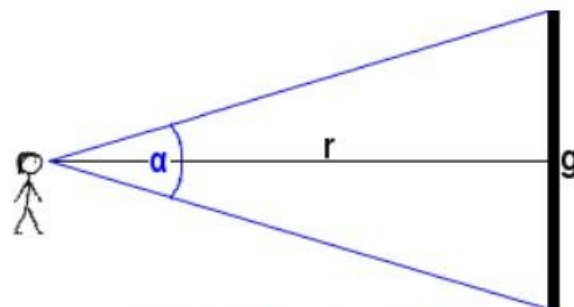
An dieser Stelle stellte sich während der Vorüberlegungen noch eine viel grundlegendere Frage bezüglich der Stimulus-Präsentation. Wie groß müssen die einzelnen Wörter angeboten werden, damit sie möglichst angenehm und ohne Mühe gelesen werden können? Um diese Frage beantworten zu können, wurde zunächst der Unterschied zwischen fovealem und peripherem Sehen betrachtet. Unter dem fovealen Wahrnehmungsbereich versteht man den Teil der Umgebung, der am schärfsten wahrgenommen werden kann. Dieser Bereich ist sehr klein, er deckt nur ca. 2° des horizontalen und ca. 1° des vertikalen Gesichtsfeldes ab. Dies hängt damit zusammen, dass die sogenannte Fovea Centralis auf der Netzhaut einen Durchmesser von nur maximal 1 mm hat (vgl. Goldstein 2008). Im Bereich der Fovea Centralis, die häufig auch als Sehgrube bezeichnet wird, befindet sich die größte Anzahl an Zapfen, die neben den Stäbchen dafür zuständig sind, die eintreffenden Lichtwellen in elektrische Signale umzuwandeln. Dementsprechend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass diese beiden Arten von Sinneszellen das Sehen überhaupt erst ermöglichen (vgl. Bayer 2003: 31 f.). Aus dem gebündelten Vorkommen der Zapfen in der Sehgrube ergibt sich, dass dort die Farbempfindlichkeit und Schärfe der Objekte am größten ist. Da die Anzahl der Zapfen nach außen hin kreisförmig abnimmt, reduziert sich auf diese Weise auch die Schärfe der Wahrnehmung. Während Objekte im parafovealen oder extrafovealen Wahrnehmungsbereich

noch mehr oder weniger scharf wahrgenommen werden können, ist die Identifikation von Objekten im peripheren Wahrnehmungsbereich fast schon unmöglich. Stattdessen liefert der periphere Bereich wertvolle Informationen, die für die Steuerung von Blickbewegungen benötigt werden (vgl. Goldstein 2008). Ausgehend von diesen Überlegungen sollte die maximale Größe der auf dem Bildschirm gezeigten Objekte berechnet werden. Zu diesem Zweck wurde das Online-Tool *rechneronline.de* verwendet.

In die Formel

$$g = |2r * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)|$$

wurden die Werte $\alpha = 5,7^\circ$ und $r = 65$ cm eingesetzt (s. Abbildung 4). Die Entfernung der Probanden zum Bildschirm ist durch den Einsatz des Eye-Trackers bedingt. Für die Angabe des Sehwinkels wurde sich an dem Versuchsaufbau von Münte und Kollegen orientiert, deren Stimulus-Wörter „zwischen zwei und zehn Buchstaben lang (entsprechend 1,0 – 5,7 Grad Sehwinkel)“ (Münte et al. 1990: 76) waren. Mithilfe dieser Daten ergibt sich eine maximale Länge des Textfeldes, in dem die einzelnen Wörter präsentiert werden, von 6,5 cm.



Grafik zur Veranschaulichung

g = tatsächliche Größe, r = Entfernung, α = Sehwinkel oder scheinbare Größe, Parallaxe

Abbildung 4: Sehwinkel bzw. scheinbare Größe entfernter Objekte berechnen.

Grafik von www.rechneronline.de/sehwinkel/

Zusätzlich fiel die Wahl auf eine Kombination von weißer Schrift auf schwarzem Hintergrund. Diese Entscheidung geht darauf zurück, dass es sich bei dem Bildschirm um einen Selbstleuchter handelt. Aufgrund dieser technischen Eigenschaft können für die Typographie nicht die gleichen Prinzipien gelten wie für den Druck auf Papier. Schwarze Schrift auf weißem Hintergrund wirkt im Druck häufig etwas dicker, während die Negativdarstellung in diesem Fall etwas dünner erscheint (vgl. Gillespie 2001).

For regular black text on a white background, this contrast is too much for the human eye to cope with. [...] For transmissive sources like cinema, television and computer screens, the opposite is true. The flare of the luminous source encroaches into surrounding dark areas making black on white text appear thinner and reversed-out text bolder (Gillespie 2001).

Dementsprechend ist die Darstellung von weißer Schrift auf schwarzem Hintergrund für das Lesen am Bildschirm geeigneter, auch wenn diese Kombination den Lesegewohnheiten auf den ersten Blick zu widersprechen scheint.

Darüber hinaus haben Studien die Lesbarkeit verschiedener Schriftarten auf dem Bildschirm untersucht. Und obwohl die Ergebnisse dafür sprechen, dass eine serifenlose Schrift besser lesbar ist, wurde der Font Georgia explizit für den Computer entwickelt. Aus diesem Grund fiel die Wahl für unsere Studie letztendlich ebenfalls auf diese Schriftart (vgl. Bayer 2003: 86; Gillespie 2001). Ausgehend von diesem Font und in Anbetracht der zuvor ermittelten Größe des Textfeldes, dessen Inhalt ohne Sakkaden lesbar ist, ergab sich für das hier beschriebene Experiment gemessen am längsten vorkommenden Wort eine Schriftgröße von 24 px für die Stimuli. Die Instruktionstexte sowie die Pausenbildschirme wurden absichtlich abweichend gestaltet, indem sie schwarzen Text auf weißem Hintergrund präsentierten, um dem Probanden zu verdeutlichen, dass er sich nicht im Experiment, sondern auf einer Metaebene befindet und ihm auf diese Weise in geringem Maße Ablenkung zu ermöglichen.

5.2 Durchführung

An dieser Stelle soll hands-on die Durchführung des Experiments beschrieben werden. Zu diesem Zweck wurde ein Experimentdurchgang mit einem Probanden durchgeführt, an dessen Beispiel der Umgang mit der Hardware und Software veranschaulicht werden soll. Dies beinhaltet u. a. die Vorstellung des verwendeten EEG recording systems, inklusive einer Schritt-für-Schritt-Anleitung zum Aufbau der Geräte sowie der Vorbereitung des Probanden, wobei zusätzlich auf die theoretischen und methodischen Grundlagen eingegangen wird, auf deren Basis die hier vorgestellte Durchführung begründet wird.

5.2.1 Probanden

Für den hier beschriebenen Durchlauf hat sich ein 24-jähriger Student zur Verfügung gestellt. Als Rechtshänder und deutscher Muttersprachler, der weitere Fremdsprachen erst nach Schuleintritt erlernt hat, erfüllte er alle zuvor festgelegten Voraussetzungen (Alter: 20-30; L1 Deutsch; Rechtshänder; Studierender oder Graduerter). Darüber hinaus lag keine Sehbeeinträchtigung vor und die Einnahme von Psychopharmaka oder anderer medizinischer Substanzen wurde ausgeschlossen (s. Fragebogen in Anhang 5).

5.2.2 Probandenvorbereitung und Aufbau des EEG-Aufnahmesystems

Nachdem der Proband über das Experiment aufgeklärt wurde und sein Einverständnis gegeben hatte (s. Anhang 3 und 4), wurde er zunächst auf dem für die Durchführung der Messungen vorgesehenen Stuhl platziert. Dieser Stuhl zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass er auf fixierten Beinen steht, sodass keine Rollen die Stabilität beeinflussen. Darüber

hinaus verfügt der Stuhl über eine stabile Rückenlehne, die kaum nachgibt und nicht über den Nacken hinausgeht, um die Kabel der EEG-Kappe nicht abzuknicken. Durch diese Eigenschaft wird auch der Anschluss der Probanden an das EEG-Gerät erleichtert. Zudem hat sich in zahlreichen EEG-Experimenten eine leicht nach hinten gelehnte Position der Probanden als gut geeignet erwiesen. Diese Position wird häufig durch eine Fußstütze erzielt. In dem hier beschriebenen Experiment wurde jedoch auf eine solche Stütze verzichtet, da vermutet wurde, dass eine nach hinten gelehnte Positionierung des Probanden eine parallele Verwendung des Eye-Trackers erschwert.

Als erster Schritt fand dann die Verkabelung des Probanden mit dem EEG-Gerät statt (s. Abbildung 5). Dabei wurde das NeurOne Tesla EEG-System von der BlindSight GmbH verwendet. Dieses System besteht aus den folgenden Komponenten:

- einer Main Unit
- einem Tesla-Verstärker
- einer JackBox
- einem Batterie-Pack
- EEG-Kappen der Art BrainCap Fast'nEasy in verschiedenen Größen.

Nach erfolgreicher Ermittlung der für die Kopfgröße des Probanden passenden EEG-Kappe, werden die 32 monopolaren Input-Stecker in der JackBox gebündelt. Diese wird wiederum durch einen KEL-Connector mit dem Verstärker verbunden. Bereits im Vorfeld wurde der Verstärker mit dem Batterie-Pack verbunden, um die Stromversorgung sicherzustellen. Im Anschluss daran erfolgt die Verbindung des Verstärkers mit der Main Unit via Glasfaserkabel. Darüber werden die gemessenen und verstärkten Daten übertragen. Über ein Ethernet-Kabel werden diese Daten schließlich an den Computer weitergeleitet. Im letzten Schritt wird die Main Unit an die Stromversorgung angeschlossen, bevor sie durch Drücken des Power-Buttons gestartet werden kann.



Abbildung 5: NeurOne-Setup.
Grafiken von meganeuro.

Für die Aufzeichnungen wurden EEG-Kappen verwendet, auf denen Ag/AgCl-Elektroden dem internationalen 10-20-System entsprechend angeordnet sind. Diese Anordnung geht auf den

kanadischen Psychologen Herbert Jasper zurück, der dieses System bereits 1949 entwickelte. Er tat dies, indem er die bis dahin unterschiedlichen Elektrodenanordnungen und deren Bezeichnungen bündelte, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten. 1958 wurde dieses System dann als internationaler Standard anerkannt, der heutzutage weit verbreitet ist (vgl. Milnik 2012: 324). Auf zwei Mittellinien, die einmal vom Nasion (tiefster Punkt an der Nasenwurzel) bis zum Inion (Knochenhöcker am Hinterkopf oberhalb der Nackenmuskulatur) sowie zwischen den beiden präaurikularen Punkten (Vertiefungen vor den Ohren) verlaufen, werden 10 %- und 20 %-Abschnitte abgetragen, woraus sich die Platzierung der Elektroden ergibt. Auf diese Weise entsteht ein netzförmiges, relatives Anordnungssystem (s. Abbildung 6 und Abbildung 11), wodurch die einzelnen Elektroden auch bei variierenden Kopfformen und -größen an den gleichen Referenzpunkten des Schädels sitzen (vgl. Milnik 2012: 327). Die Bezeichnung der einzelnen Elektroden setzt sich jeweils aus einem (oder zwei) Buchstaben und einer Zahl zusammen. Die Buchstaben geben den groben Bereich am Schädel an, während die Zahlen Aufschluss über die jeweilige Distanz der Elektrode zur Mittellinie geben.

Each electrode name begins with one or two letters to indicate the general region of the electrode (Fp = frontal pole; F = frontal; C = central; P = parietal; O = occipital; and T = temporal). Each electrode name ends with a number or letter indicating distance from the midline, with odd numbers in the left hemisphere and even numbers in the right hemisphere. Larger numbers indicate greater distance from the midline, with locations on the midline labeled with a "z" for zero (because the number 0 looks too much like the letter O) (Luck 2014: 168).

Die in unserem Fall verwendeten Kappen verfügen über 32 Elektroden, die entsprechend Signale von den folgenden 32 Kanälen aufnehmen (Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T7, T8, P7, P8, Fz, Cz, Pz, Iz, FC1, FC2, CP1, CP2, FC5, FC6, CP5, CP6, PO9, PO10, TP9, TP10). Ein solches 32-kanaliges Aufnahmesetting hat sich in der Vergangenheit als generell geeignet für die Untersuchung von N400-Effekten erwiesen (vgl. Duncan et al. 2009: 1898). Darüber hinaus befinden sich auf der EEG-Kappe zwei weitere Elektroden. Die eine fungiert als Referenzelektrode (FCz) während der Aufnahme, die andere ist für die Erdung der Probanden zuständig (vgl. Picton et al. 2000: 135). Neben dem Schutz der Probanden vor Stromeinwirkung, sorgt die Ground-Elektrode außerdem dafür, dass das elektrische Rauschen, das naturgemäß durch die Verbindung des Verstärkers mit dem Stromkreis und somit dem Erdungskreis (ground circuit) entsteht, aus dem verstärkten Signal der am Schädel platzierten Elektroden herausgefiltert wird.

With a differential amplifier, a *reference* electrode (R) is used along with the active (A) and ground (G) electrodes. The amplifier records the potential between A and G (which is equal to $A - G$) and the potential between R and G (which is equal to $R - G$). The output of the amplifier is the difference between these two voltages ($[A - G] - [R - G]$). This is equivalent to $A - R$ (because the Gs cancel out), so any noise in G will be removed because it is the same for $A - G$ and $R - G$ (Luck 2014: 151).

Daraus folgt, dass das mit einem EEG-Gerät gemessene Signal an den einzelnen Elektroden immer eine Spannungsdifferenz zwischen einer spezifischen Elektrode und der Referenzelektrode ist, die während der Aufnahme genau zu diesem Zweck genutzt wird. Dieses Anwendungsprinzip wird bei der genaueren Betrachtung der Auswertung der Daten eine große Rolle spielen.

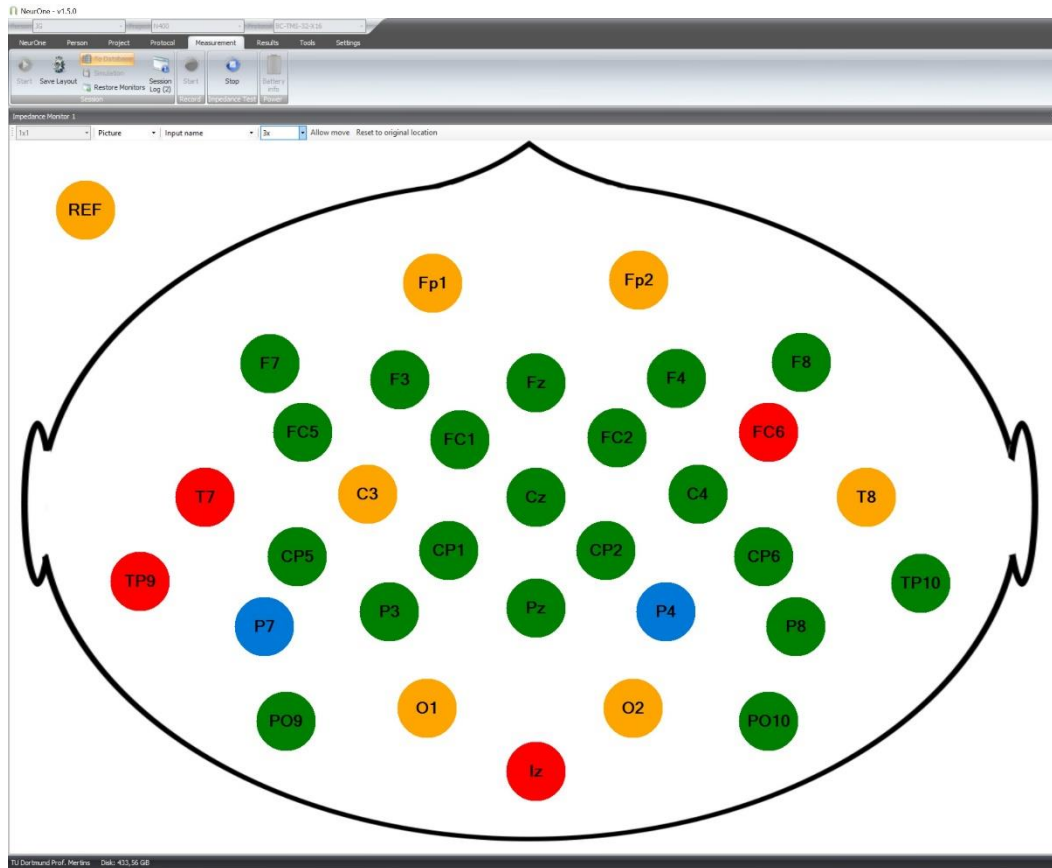


Abbildung 6: Impedanzmessung in NeurOne an den 32 Elektrodenpositionen.
 Eine grüne Färbung gibt einen Impedanzwert von $<5 \text{ k}\Omega$ an, eine gelbe Färbung weist auf einen Wert zwischen 5 und $10 \text{ k}\Omega$ hin, während eine rote Färbung eine Impedanz von $>10 \text{ k}\Omega$ angibt. Die blau gefärbten Elektroden sind diejenigen, an denen zum Zeitpunkt der Aufnahme des Screenshots eine Messung der Impedanz stattgefunden hat.

Nachdem die Geräte den vorausgehenden Ausführungen entsprechend aufgebaut wurden, wird dem Probanden die EEG-Kappe vorsichtig auf den Kopf gesetzt. Dabei stülpt man sie am besten von der Stirn aus, wo sie mit den Händen festgehalten wird, über den Kopf. Wenn die Kappe richtig sitzt, wird sie mit dem Band unter dem Kinn fixiert. Zu diesem Zeitpunkt sind die Elektroden der Kappe also bereits mit dem EEG-Verstärker verbunden. Allerdings können sie noch keine oder nur eine sehr schlechte Verbindung zur Kopfhaut herstellen. Daher wird ein Elektrolytgel verwendet (vgl. Luck 2014: 166). Bevor dieses Gel in die ringförmigen Elektroden gegeben wird, empfiehlt es sich, die Kopfhaut an diesen Stellen auf die Messung vorzubereiten. Ein erster Schritt ist die Entfernung abgestorbener Hautzellen sowie einer dünnen Ölschicht, die sich naturgemäß auf der Hautoberfläche befinden, jedoch keine guten Leiterqualitäten haben und somit die Messung elektrischer Spannungen auf der Kopfhaut erschweren (vgl. Luck 2014: 170 ff.). Aus diesem Grund wird die Kopfhaut an den

Elektrodenplatzierungen mit dem hölzernen Ende eines Wattestäbchens leicht angeraut. Erst dann wird die Elektrode mit dem Gel befüllt. In einem ersten Schritt wird dazu eine kleine Menge Gel in den Ring jeder einzelnen Elektrode gegeben. Erst im zweiten Durchgang wird das Gel in den Elektroden mit kreisenden (achtförmigen) Bewegungen der Spritzenkanüle verteilt. Nachdem jede Elektrode mit Gel versehen wurde, kann die Leitfähigkeit mithilfe einer Impedanzmessung überprüft werden. Die Impedanz beim Wechselstrom ist vergleichbar mit dem Widerstand beim Gleichstrom. Da es sich bei den EEG-Signalen um Wechselstrom handelt, wird der Widerstand, den das Signal zu überbrücken hat, demnach Impedanz genannt (vgl. Luck 2014: 169). Je besser die Verbindung zwischen Kopfhaut und Elektrode, d. h. je geringer die Impedanz, desto weniger Noise befindet sich auch am Ende in den EEG-Daten. Daher sollte bei der Impedanzmessung ein Wert unter 10 k Ω angestrebt werden (vgl. Picton et al. 2000: 133). Bei vergleichbaren EKP-Studien wurden die Impedanzen unter 5 k Ω gehalten. Auf Basis dieser beiden Angaben, wurden in dem hier beschriebenen Experiment im besten Fall Impedanzen von unter 5 k Ω (in Abbildung 6 grün) angestrebt, jedoch wurden auch dann Messungen durchgeführt, wenn einige wenige Elektroden einen Wert zwischen 5 und 10 k Ω (in Abbildung 6 gelb) aufwiesen.

Nach erfolgreicher Impedanzmessung wird zu Beginn einer Aufnahme nun noch der Eye-Tracker auf den Probanden eingestellt, kalibriert und validiert. Sobald dies geschehen ist, kann der Testlauf gestartet werden, an den sich dann die tatsächlichen Experimenttrials anschließen.

5.2.3 Ablauf

In dem hier als Beispiel dienenden Durchlauf wurde auf einen Testlauf verzichtet. Nach der Präsentation der Instruktionen bestanden von Seiten des Probanden keine Unklarheiten bezüglich des Ablaufs. Grundsätzlich sollte aber ein kurzer Probedurchgang durchgeführt werden, der dem später noch näher beschriebenen Hauptdurchlauf sehr ähnlich ist. Er dient dem Probanden einerseits dazu, Fragen zu klären, sowie dem Versuchsleiter andererseits,

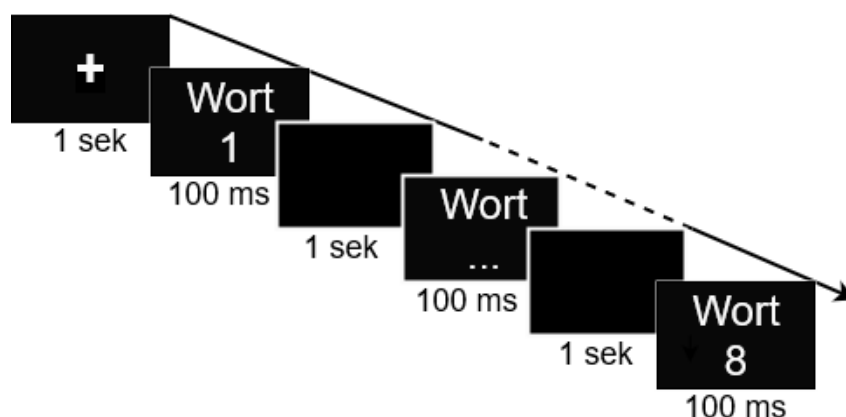


Abbildung 7: Zeitlicher Ablauf eines Trials.

während dieser kurzen Sequenz zu überprüfen, ob sowohl der Eye-Tracker als auch das EEG-Gerät die Daten wie geplant erfassen.

In einem einzigen Durchlauf wurden dem Probanden jeweils alle 300 Stimulussätze (vgl. Kapitel 4.1.3) in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Dabei erfolgte die Anzeige der Sätze, wie oben bereits erläutert, Wort für Wort, wobei jedes Wort 100 ms lang gezeigt wurde. Zwischen den einzelnen Wörtern war für eine Sekunde jeweils ein schwarzer Bildschirm zu sehen. Dieses in Abbildung 7 dargestellte Timing orientiert sich an dem Ablauf, den auch Kutas und Hillyard (1980b) gewählt hatten. Getrennt wurden die Sätze statt durch einen Punkt am Satzende durch ein eine Sekunde lang gezeigtes Fixationskreuz.

Um Monotonie, die sich aus der großen Anzahl an gezeigten Stimuli und der damit verbundenen Länge des Experiments zwangsweise ergibt (vgl. Beres 2017: 253), möglichst zu minimieren, wurden die insgesamt 300 Sätze in drei Blöcke aufgeteilt, in denen jeweils 100 Sätze präsentiert wurden. Zwischen den Blöcken hatte der Proband die Möglichkeit, kurze Pausen zu machen, um Ermüdungserscheinungen entgegenzuwirken und die Aufmerksamkeit sicherzustellen. Da der Proband an die EEG-Kappe angeschlossen war, sollte er sich jedoch möglichst nicht bewegen und in keinem Fall aufstehen. Aus diesem Grund sollte der Proband selbst entscheiden können, ob er eine Pause benötigt. In jedem Fall diente die kurze Absprache mit dem Versuchsleiter als kleine Ablenkung, bevor die nächsten Sätze präsentiert wurden.

Das zuvor beschriebene Timing des Experiments wird außerdem in den Instruktionen aufgegriffen, die dem Probanden am Anfang des Experiments gezeigt wurden und wie folgt aussehen:

Das folgende Experiment besteht aus drei Blöcken. Zwischen den Blöcken besteht jeweils die Möglichkeit, eine kurze Pause zu machen.

In den Blöcken werden dir Wort für Wort Sätze präsentiert. Achte bitte vor jedem Satz auf das Kreuz (+) in der Mitte des Bildschirms. Bitte lies die Sätze still für dich und verfolge ihre Inhalte aufmerksam.

Aus dieser Formulierung geht außerdem hervor, dass der Proband ausschließlich die Worte lesen soll, ohne eine zusätzliche Aufgabe erfüllen zu müssen. Damit verfolgt das hier entwickelte Experiment einen etwas anderen Ansatz als verschiedene der zuvor vorgestellten N400-Studien, in denen die Probanden beispielsweise durch einen Knopfdruck beurteilen sollten, ob der gelesene Satz korrekt war (Müntz et al. 1990) bzw. ob ein bestimmtes Wort in dem gelesenen Satz vorkam (Federmeier/Kutas 1999) oder im Anschluss an das Experiment inhaltliche Fragen zu den Sätzen beantworten sollten (Kutas/Hillyard 1980b, 1981). In unserem Fall wurde von solchen zusätzlichen Aufgaben abgesehen, um das Experiment zunächst so basal wie möglich zu halten und jegliche potenzielle Noise-Quellen auszuschließen, die die Auswertung der EEG-Daten verkomplizieren könnten. Dies ist auch der Grund, weshalb darauf verzichtet wurde, Filler unter die Stimuli zu mischen, da diese Sätze

5.3.1 Technische Aspekte

Grundsätzlich wurde bei der Durchführung des Experiments unterschiedliche Software eingesetzt. Für die Erstellung des Paradigmas sowie die Steuerung des Experiments während der Durchläufe wurde *E-Prime* verwendet. Auf dem gleichen Laptop, auf dem E-Prime lief, wurde auch die für die Aufnahme der Eye-Tracking-Daten benötigte Software *iView* genutzt. Wichtig bei der Nutzung der *iView*-Software ist, dass das Profil des 16:9-Monitors ausgewählt ist, für das das Experiment ausgelegt ist. Die parallel gemessenen EEG-Daten wurden jedoch auf einem zweiten Computer mit der Software *NeurOne* aufgezeichnet, die gemeinsam mit der EEG-Hardware geliefert wurde.

Für die hier beschriebenen Aufnahmen wurde eine Sampling Rate von 500 Hz gewählt. Damit ist die hier verwendete Abtastrate doppelt so hoch wie diejenige, die in vorherigen Studien verwendet wurde (vgl. Kutas/Hillyard 1983, van Petten/Kutas 1990). Die Sampling Rate gibt dabei „the number of physically recorded data points recorded per second“ (Weiergräber et al. 2016: 54) an. Entsprechend dem Nyquist-Shannon-Theorem, ist eine dem Originalsignal entsprechende Nachbildung nur dann möglich, wenn die Abtastrate mindestens doppelt so hoch ist wie die höchste im Originalsignal vorkommende Frequenz. Liegt die Abtastrate unter diesem Grenzwert, werden also zu wenig Datenpunkte aufgezeichnet, so resultiert das in einer Verfälschung der Kurven und damit in einer fehlerhaften Abbildung der Daten (vgl. Luck 2014: 178). Eine vergleichsweise niedrige Abtastrate (das verwendete System bietet bis zu 80 kHz an) ist in unserem Fall also ausreichend, da diese Rate in etwa der Geschwindigkeit der Sprachverarbeitung entspricht. Dementsprechend kann diese mit einer solchen Abtastrate angemessen aufgezeichnet werden, ohne einen Überfluss an Daten zu produzieren, der die Qualität des Ergebnisses kaum verbessern würde (vgl. Beres 2017: 252).

Nach der Aufnahme wurden die Eye-Tracking-Daten in *BeGaze* importiert, um die Augenbewegungen rekonstruieren zu können, während die EEG-Daten für die Analyse mit dem *BrainVision Analyzer 2.0* aufbereitet wurden.

Eine wesentliche Frage war, wie es bei der Auswertung möglich sein würde, den Datenstrom, der von der *NeurOne*-Software erzeugt wird, dahingehend zu segmentieren, dass die Signale den Stimuli zugeordnet werden können. Zu diesem Zweck wurde die Main Unit des EEG-Systems mit einer LPT-Verbindung an den Computer angeschlossen, der das Experiment über E-Prime steuert, um über diese Verbindung Trigger an die *NeurOne*-Software zu senden. Eine entsprechende Programmierung, die sowohl dem Fixationskreuz (99) als auch den Wörtern der Stimulussätze (1 - 7) sowie den kritischen satzfinalen Wörtern abhängig von ihrer Kondition (11 - 13) Trigger zuweist, wurde in E-Prime eingefügt.

Darüber hinaus stellte die Einbindung des Eye-Trackers eine Herausforderung dar. Auch bei der Analyse der Augenbewegungen sollte es möglich sein, den Datenstrom den Stimuli entsprechend zu segmentieren. Auf diese Weise sollten Stimulussätze, die von dem

Probanden nicht aufmerksam verfolgt wurden, von der weiteren Analyse der EEG-Daten ausgenommen werden können. Um eine solche Zuordnung machen zu können, musste für jeden der 300 Stimulussätze ein Bild erzeugt werden, das als Stimulus in BeGaze eingespeist werden konnte. Erst mit diesen zugeordneten Bildern ist auch in BeGaze eine reizbasierte Auswertung möglich.

5.3.2 Auswertung der Eye-Tracking-Daten in BeGaze

Die von iView erzeugte idf-Datei wird standardmäßig in dem Pfad C:\BENUTZER\VIEW\X\APPDATA\LOCAL\VIRTUALSTORE\PROGRAM FILES (X86)\SMI\VIEWRED gespeichert. Diese Datei muss zur Auswertung der Augenbewegungen in das Verzeichnis verschoben werden, in dem die oben erwähnten Stimulusbilder liegen (aktuell C:\DOKUMENTE\MY EXPERIMENTS\WSS-TESTRESULTS\N400). Sobald dies geschehen ist, lassen sich die ET-Daten in der Auswertesoftware BeGaze öffnen.

Für den hier beispielhaft betrachteten Probanden wurde die visuelle Inspektion als Analyseansatz gewählt. Für jeden einzelnen Stimulussatz wurde also der Scan Path betrachtet, um feststellen zu können, wo der Proband während der Präsentation hingeschaut hat. In BeGaze wird dafür zwischen Fixationen und Sakkaden unterschieden, sodass ebenfalls nachvollzogen werden kann, auf welche Stelle auf dem Bildschirm die meiste Aufmerksamkeit gelegt wurde. Aus den Beschreibungen des Experimentdesigns geht hervor, dass die Wörter der Stimulussätze in einem Feld mittig auf dem Bildschirm angezeigt wurden. Daher wurde bei der visuellen Inspektion der Daten überprüft, ob der Großteil der Fixationen im gleichen Bereich des Bildschirms stattgefunden hat. In den meisten Fällen kann im Sinne der Logik des Experimentdesigns dafür argumentiert werden, dass die Stimuli aufmerksam verfolgt wurden. In einigen Fällen hat der Eye-Tracker jedoch auch Sakkaden aufgezeichnet. Diese wurden etwas detaillierter betrachtet, um zu beurteilen, ob die Verarbeitung des Stimulussatzes durch die Augenbewegung beeinträchtigt gewesen sein könnte.

In insgesamt 35 Trials wurden solche Sakkaden festgestellt. In vielen Fällen fanden diese jedoch ganz am Ende (innerhalb der letzten zwei Sekunden des vom Eye-Tracker aufgezeichneten Scan Paths) statt. Diese Trials sind ebenfalls als vermutlich vollständig verarbeitete Stimuli zu betrachten, da die letzten zwei Sekunden dieser Sequenzen keine relevanten Inhalte mehr enthielten. An dieser Stelle wird ein Problem technischer Natur deutlich: Insgesamt dauert ein Trial in den ET-Daten 10,4 Sekunden. Aus dem geplanten zeitlichen Ablauf des Experiments (s. Abbildung 7) geht jedoch hervor, dass ein Stimulus eigentlich nur 9,8 Sekunden dauern sollte. Wofür die zusätzlichen 0,6 Sekunden benötigt werden, ist aktuell noch unklar und muss weiter untersucht werden. Darüber hinaus fiel bei genauerer Betrachtung der gesendeten Marker auf, dass die Aufzeichnung der ET-Daten mit dem ersten Wort eines Stimulussatzes begann und mit dem Fixationskreuz des

darauffolgenden Satzes endete. Das bedeutet, dass der tatsächliche Satz nur innerhalb der ersten 8,7 Sekunden der Scan-Path-Sequenz sichtbar ist, woran sich eine Pause von 100 ms sowie ein Fixationskreuz mit 1000 ms anschließen. Eine Sakkade innerhalb der letzten 1,7 Sekunden findet demnach nicht während der Präsentation von relevanten Inhalten statt, sondern während der Präsentation eines schwarzen Bildschirms oder eines Fixationskreuzes. Nachdem entsprechend solche Trials, die Sakkaden in den letzten 1,7 Sekunden der Aufzeichnung zeigten, wieder in die Analyse eingeschlossen wurden, mussten nur die verbliebenen 20 Trials von der daraufhin durchgeführten Analyse der EEG-Daten ausgeschlossen werden.

Sollte dieses Experiment zu einem gegebenen Zeitpunkt weitergeführt und mit mehreren Probanden durchgeführt werden, müsste an dieser Stelle eine zahlenbasierte Auswertung der Eye-Tracking-Daten durchgeführt werden. Diese könnte mithilfe von definierten AOIs oder aufgrund von statistischen Auswertungen der Augenbewegungen geschehen. Zum Verfassungszeitpunkt dieser Arbeit stand jedoch keine dieser Möglichkeiten zur Verfügung, da die nachträgliche Synchronisation von ET- und EEG-Datenstrom die Entwicklung einer solchen Methodik erschwert. Daher soll an dieser Stelle lediglich auf die Notwendigkeit einer Lösung für dieses Problem hingewiesen werden, ohne genauer auf solche denkbaren Verfahren einzugehen.

Stattdessen soll auf andere Probleme, die während der Betrachtung der ET-Daten auffielen, hingewiesen werden. Um zunächst bei den technischen Aspekten zu bleiben, seien die Erholungspausen zwischen den drei Blöcken erwähnt. Nach Trial 100 und 200 begannen die Pausen, in denen sich der Proband kurzzeitig erholen konnte. Da die Trials in den ET-Daten jedoch mit der Präsentation des Fixationskreuzes, das vor jedem neuen Satz gezeigt wird, enden, enthielten die Aufzeichnungen der beiden erwähnten Trials zusätzlich die Daten der Augenbewegungen, die während dieser längeren Pausen stattgefunden haben. Für die hier vorliegende Arbeit wurden in diesen Trials lediglich die ersten 10,4 bzw. 8,7 Sekunden betrachtet, jedoch sollte auch hier eine Lösung gefunden werden, um die Zeit, die dem Probanden zur Erholung zur Verfügung steht, gar nicht erst aufzuzeichnen.

Außerdem fiel in den Daten des Probanden auf, dass drei Stimulussätze überhaupt nicht gezeigt wurden. Hier liegt die Vermutung nahe, dass drei Stimuli in der Experimentsoftware E-Prime zufällig übersprungen wurden. Der Grund für diese Auslassungen muss jedoch ebenfalls noch ermittelt werden.

Schließlich sollten die Eye-Tracking-Daten noch hinsichtlich ihrer Aussagekraft hinterfragt werden. In einigen Trials wurden überdurchschnittlich lange Fixationen aufgezeichnet. Zwar wird in den Vorüberlegungen zur Methodenkombination davon ausgegangen, dass lange Fixationen für eine aufmerksame Beschäftigung mit einem Stimulus sprechen, jedoch liegt nach der Betrachtung der Daten auch die Vermutung nahe, dass solche außergewöhnlich

langen Fixationen eher darauf hindeuten, dass die Augen zwar auf dem Bildschirm geruht haben, der Blick jedoch ins ‚Leere‘ ging. Ob eine kognitive Verarbeitung der Inhalte stattgefunden hat, kann also möglicherweise nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

Da diese Interpretation jedoch auf Vermutungen beruht, soll für den weiteren Verlauf dieser Arbeit davon ausgegangen werden, dass Fixationen der Mitte des Bildschirms eine aufmerksame Auseinandersetzung mit den gezeigten Inhalten anzeigen. Basierend auf dieser Annahme, können nun also die EEG-Daten ausgewertet werden.

5.3.3 Analyse der EEG-Daten im BrainVision Analyzer

Die Ergebnisse von NeurOne werden über den Menüpunkt RESULTS → EXPORT → BRAIN PRODUCTS EXPORT für die Weiterverarbeitung im BrainVision Analyzer 2.0 exportiert. Im Analysetool wird dann ein neuer sogenannter *Workspace* eingerichtet, indem ein Speicherort für die Rohdateien, die History Files sowie die Export Files angegeben wird (aktuell: C:\PROGRAMMDATA\BRAINVISION\WORKSPACES). Nach der Erstellung dieses Ordners kann das zuvor von NeurOne exportierte Verzeichnis, das die EEG-Daten enthält, in den Workspace geladen werden. Sobald die Daten in der Analysesoftware geladen sind, können eine Reihe von Datenaufbereitungsprozessen durchgeführt werden. Welche konkreten Operationen angewendet werden und in welcher Reihenfolge deren Anwendung sinnvoll ist, ergibt sich aus dem gewählten Auswerteschema und der Fragestellung.

In dem hier beschriebenen Fall wurden die folgenden Analyseschritte durchgeführt:

1. Inspektion und Aufbereitung der Daten für die Analyse
2. Filtern der Daten
3. Eliminierung von Artefakten
4. Segmentierung der Stimuli entsprechend der Konditionen
5. Baseline Correction
6. Kalkulation von Durchschnittswerten

Im Folgenden sollen diese Schritte beschrieben und kommentiert werden. Für eine detailliertere Erläuterung der einzelnen Prozeduren sowie die erweiterten Einstellungsmöglichkeiten wird an dieser Stelle auf das Handbuch des BrainVision Analyzers 2.0 verwiesen.

1. Inspektion und Aufbereitung der Daten für die Analyse

In der hier durchgeführten Analyse liegt das vordergründige Interesse auf den satzfinalen Wörtern, die den drei Konditionen – kongruent, moderat inkongruent, stark inkongruent – zugeordnet werden können. Wie oben bereits erwähnt, wurden diesen kritischen Wörtern während der Aufnahme der Daten entsprechend die Marker S11, S12 und S13 zugewiesen. Um die Analyse etwas übersichtlicher zu gestalten, wurden diese Marker im ersten Schritt in der Analysesoftware umbenannt, sodass auf den ersten Blick ersichtlich war, welcher

Kondition ein bestimmter Stimulussatz zuzuordnen ist. Dieser Schritt dient jedoch lediglich dazu, die Auswertung besser nachvollziehen zu können und ist für das Analyseschema nicht zwingend erforderlich.

Ein zweiter Schritt, der die weitere Verarbeitung der Daten hingegen erheblich erleichtert, ist das Down Sampling. Da die hier gewählte Sampling Rate – im Vergleich zu anderen Studien mit dem gleichen Ziel – relativ hoch war (500 Hz), wurde sie zu Beginn der Analyse auf 256 Hz reduziert. Damit nähert sie sich den für N400-Studien empfohlenen 250 Hz an (vgl. Duncan et al. 2009: 1897) und erscheint immer noch ausreichend hoch zu sein, um die hier im Fokus der Analyse stehenden Daten auszuwerten. Diese Transformation ist unter dem Menüpunkt TRANSFORMATIONS → DATASET PREPROCESSING → CHANGE SAMPLING RATE zu finden. In der sich daraufhin öffnenden Maske wählt man zusätzlich den Punkt USE SPLINE INTERPOLATION und bestätigt die Operation mit OK.

Nachdem die Datenmenge auf diese Weise reduziert wurde, wodurch wiederum die folgenden Analyseprozesse mit einer erhöhten Geschwindigkeit durchgeführt werden können, sollten die Rohdaten hinsichtlich Artefakte inspiziert werden. Dies geschieht in unserem Fall als semiautomatischer Prozess, der unter TRANSFORMATIONS → ARTIFACT REJECTION/ARTIFACT REDUCTION → RAW DATA INSPECTION durchgeführt werden kann. Da zudem alle Kanäle betrachtet werden sollen, werden im zweiten Tab der Operation entsprechend alle verfügbaren Kanäle ausgewählt. Dies ist wichtig, da Artefakte an verschiedenen Elektroden unterschiedlich stark auftreten können. So verzeichnen beispielsweise die Elektroden nahe der Augen Blinzler sehr eindeutig. An Elektroden, die am Hinterkopf angebracht sind, sind diese Augenlidbewegungen jedoch nicht so offensichtlich, obwohl sie das gemessene EEG-Signal auch an diesen Positionen doch erheblich verzerren können (vgl. Luck 2014: 188). Im letzten Tab der Raw Data Inspection-Transformation können nun die Kriterien für die Überprüfung der

```
Check Gradient:
Maximal allowed voltage step: 100 µV/ms
Mark as Bad:      Before Event: 200 ms    After Event: 200 ms
Check Difference (Max-Min):
Maximal allowed difference of values in intervals: 200 µV
Interval Length: 200 ms
Mark as Bad:      Before Event: 200 ms    After Event: 200 ms
Check Low Activity:
Lowest allowed activity in intervals: 0.5 µV
Interval Length: 100 ms
Mark as Bad:      Before Event: 200 ms    After Event: 200 ms
*** Data node specific information ***
```

Abbildung 9: Parameter der Raw Data Inspection.

Artefakte festgelegt werden. Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, wurden für den hier beschriebenen Fall das Gradient-Kriterium, das Min-Max-Kriterium sowie das Low Activity-Kriterium ausgewählt. Ersteres überprüft die Daten hinsichtlich großer Spannungsdifferenzen

zwischen zwei nebeneinanderliegenden Abtastpunkten. Solche außergewöhnlich großen Sprünge sind in der Regel unerwünscht und stören das für die Forschungsfrage interessante EEG-Signal. Um solche großen Spannungsdifferenzen ausmachen zu können, wurde für unsere Daten der Grenzwert von $100 \mu\text{V}/\text{ms}$ festgelegt. Darüber hinaus schlagen sich Artefakte auch in unüblich großen Amplituden nieder. Daher wurde für unsere Daten festgelegt, dass die maximale Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert innerhalb eines Intervalls von 200 ms Länge $200 \mu\text{V}$ nicht überschreiten sollte. Schließlich sollten auch solche Intervalle als Artefakte markiert werden, deren gemessene Aktivität innerhalb von 100 ms $0,5 \mu\text{V}$ unterschreitet. Auf diese Weise werden solche Datenportionen gekennzeichnet, in denen aus verschiedenen denkbaren Gründen keine Gehirnaktivität gemessen wurde. Mit diesen Einstellungen prüft nun also die Analysesoftware, ob sie solche Artefakte in den Daten findet. Ist das der Fall, werden diese Stellen in dem kontinuierlichen Signal jeweils 200 ms vor und nach dem entsprechenden Ereignis markiert (s. Abbildung 10). Zu Illustrationszwecken wurde für das hier abgebildete Beispiel ein Teil des EEG-Signals ausgewählt, das während einer Pause im Experiment aufgezeichnet wurde. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Proband die Möglichkeit, sich zu erholen und in geringem Maße die Muskeln zu lockern. Daher weist dieser Teil der Daten entsprechend eine erhöhte Anzahl an Artefakten auf.

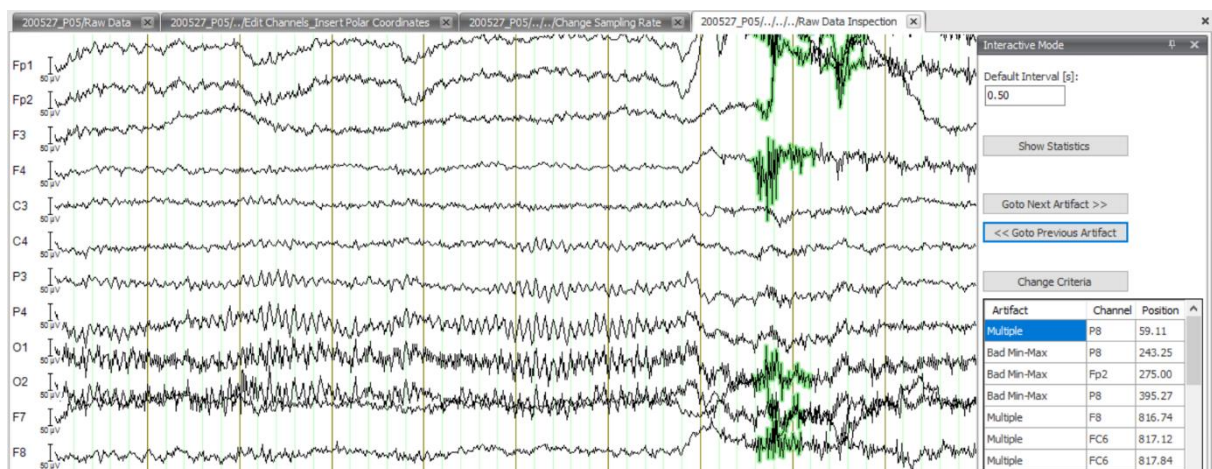


Abbildung 10: Raw Data Inspection.

Die Stellen im EEG-Signal, die der Algorithmus als Artefakte identifiziert hat, werden farblich markiert.
In der visuellen Inspektion kann diese Zuordnung überprüft werden.

Anschließend besteht während der visuellen Inspektion dieser computerbasiert ermittelten Artefakte noch die Möglichkeit, diese Detektion zu überprüfen und fälschlicherweise als Artefakt gekennzeichnete Teile als korrekt zu bestimmen bzw. auch möglicherweise von der Software übersehene Artefakte nachträglich als solche zu markieren (vgl. Luck 2014: 192). Ist die Raw Data Inspection abgeschlossen, werden die so bestimmten Artefakte in den Daten nicht automatisch gelöscht. Stattdessen werden sie im kontinuierlichen Signal rot hinterlegt hervorgehoben. Auf diese Weise entstehen an den Stellen, an denen Artefakte vorliegen,

keine Sprünge in den Daten. Wird im späteren Verlauf jedoch ein Durchschnittswert für das Signal gebildet, so werden diese artefaktbehafteten Teile der Daten von diesem Prozess ausgenommen (vgl. Luck 2014: 188).

Wie aus den Ausführungen zur Referenz- und Ground-Elektrode in Kapitel 5.2.2 bereits hervorgegangen ist, stellen die aufgezeichneten EEG-Daten immer Differenzen zwischen zwei Elektroden dar. Die sogenannte *online reference* ist häufig – so auch in dem hier beschriebenen Fall – die FCz-Elektrode. Die an ihr gemessene Spannung wird also im Verstärker während der Messung von dem Signal jeder anderen Elektrode subtrahiert. Aus diesem Grund taucht diese FCz auch nicht in den Daten auf, sobald sie mithilfe der NeurOne-Software oder dem BrainVision Analyzer sichtbar werden. Sie würde lediglich als Nulllinie dargestellt werden können, worauf verzichtet wird (vgl. Leuchs 2019: 1). Für die Analyse ist es jedoch empfehlenswert, die Referenz nach der Aufnahme – *offline* – anzupassen, da die Wahl der Referenz die Qualität der Daten erheblich beeinflussen kann. Vor allem die Amplitude des EEG-Signals ist von der gewählten Referenz abhängig. Wird FCz als Referenz verwendet, muss davon ausgegangen werden,

dass ein Großteil der an ihr gemessenen Spannung ebenfalls an den umliegenden Elektroden (Cz, Fz, FC1, FC2) auftritt und im Zuge der Subtraktion von ebendiesen Elektroden abgezogen wird. Daraus folgt, dass das Signal an diesen Elektroden nicht so stark vorhanden sein wird. Möglicherweise wird dadurch zusätzlich die Polarität des Signals an diesen Kanälen verfälscht (vgl. Leuchs 2019: 2). Liegt das Interesse der Forschungsfrage also in den von diesen Elektroden abgedeckten zentral-parietalen Regionen (so wie es bei dem N400-Effekt der Fall ist), sollten die Daten offline einem *Re-referencing* unterzogen werden. Als neue Referenz bietet sich in diesem Fall beispielsweise der Mittelwert der Mastoid-Elektroden (TP9 und TP10) an. Diese befinden sich hinter den Ohren (s. Abbildung 11) und werden oft in EEG-Experimenten als Offline-Referenz gewählt. Da nun zwei Elektroden als Referenz ausgewählt werden, muss zunächst der Mittelwert

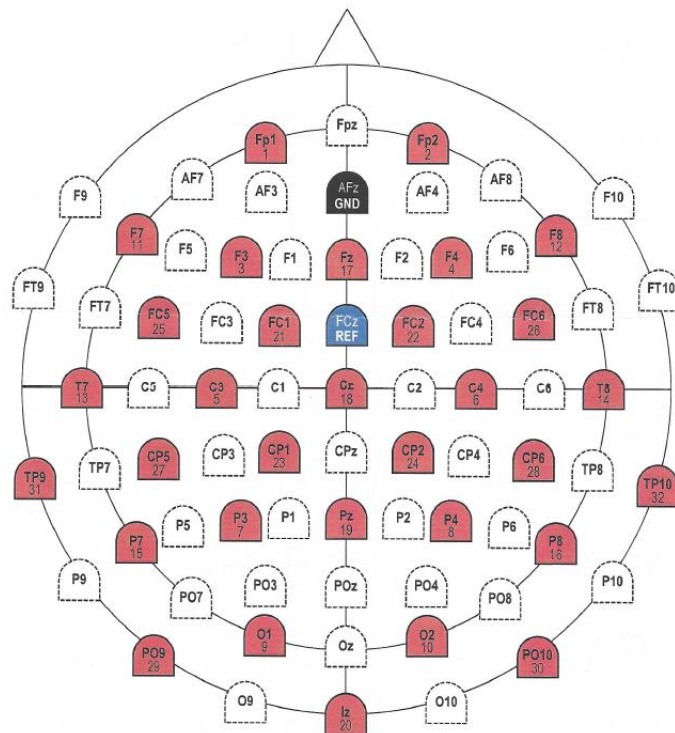


Abbildung 11: Elektrodenpositionen und Kanalbelegung.
In dem hier beschriebenen Experiment kamen die roten Elektroden zum Einsatz (zzgl. FCz und AFz).
Abbildung von der EasyCap GmbH.

Re-referencing unterzogen werden. Als neue Referenz bietet sich in diesem Fall beispielsweise der Mittelwert der Mastoid-Elektroden (TP9 und TP10) an. Diese befinden sich hinter den Ohren (s. Abbildung 11) und werden oft in EEG-Experimenten als Offline-Referenz gewählt. Da nun zwei Elektroden als Referenz ausgewählt werden, muss zunächst der Mittelwert

gebildet werden, der anschließend von allen anderen Elektroden subtrahiert werden kann (vgl. Luck 2014: 155). Auf diese Weise entsteht eine symmetrische Referenz, die keine der beiden Hemisphären bevorzugt betrachtet (vgl. Leuchs 2019: 3).

Die Bestimmung der neuen Referenz kann im BrainVision Analyzer unter dem Punkt TRANSFORMATIONS → DATASET PREPROCESSING → CHANNEL PREPROCESSING → NEW REFERENCE gefunden werden. In diesem Operationsmenü wählt man im ersten Schritt die beiden Kanäle aus, die die neue Referenz bilden sollen. Im zweiten Schritt wird angegeben, auf welche Kanäle die neue Referenz angewendet werden soll. Daher müssen hier alle Kanäle, mit Ausnahme der beiden zuvor als neue Referenz bestimmten Kanäle, ausgewählt werden. Abschließend wird der vorherige Referenzkanal FCz als neuer informationstragender Kanal hinzugefügt, sodass er nun auch als Kurve in den Daten auftaucht.

Nach dieser ersten grundlegenden Aufbereitung der erhobenen Daten, können nun Filter angewendet werden, um störendes Rauschen aus den Signalen herauszurechnen.

2. Filtern der Daten

In den meisten Fällen bezieht sich das Filtern von EEG-Daten auf die Verminderung bestimmter Frequenzbänder, was letztendlich dazu führen soll, dass Noise in den Daten reduziert wird (vgl. Luck 2014: 226). Im BrainVision Analyzer sind die Filter unter dem Reiter TRANSFORMATIONS → ARTIFACT REJECTION/REDUCTION → DATA FILTERING → IIR FILTER zu finden. Grundsätzlich werden vor allem drei Arten von Filtern auf EEG-Daten angewendet. Die sogenannten *low-pass Filter* mindern hohe Frequenzen, während diese von den sogenannten *high-pass Filtern* ignoriert werden. High-pass Filter reduzieren stattdessen die niedrigen Frequenzen. Zusätzlich schwächt der *Notch-Filter* ganz bestimmte Frequenzen ab, die im

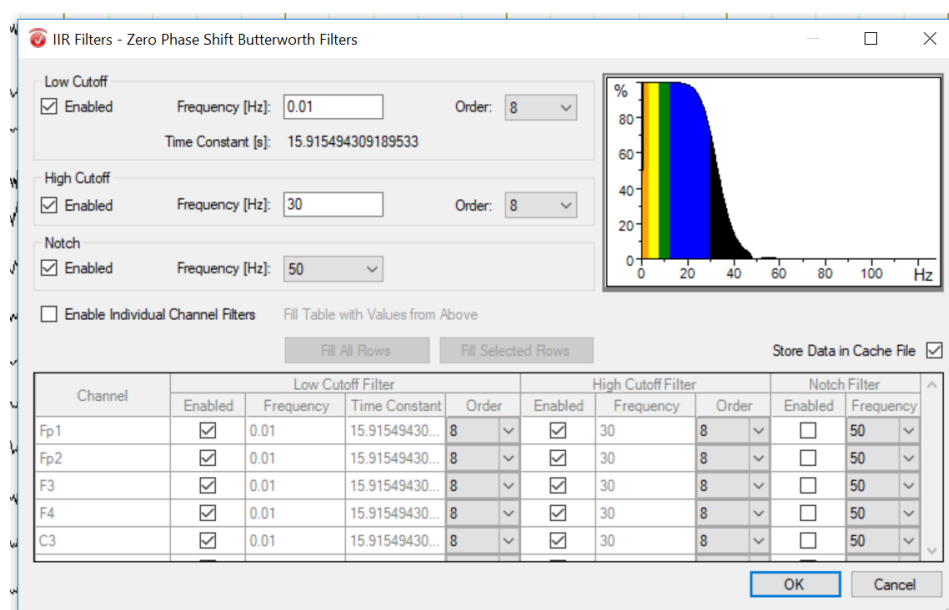


Abbildung 12: Parameter der angewendeten Low Cutoff-, High Cutoff- und Notch-Filter.

Vorhinein festgelegt wurden (vgl. Luck 2014: 227 f.). Die Analysesoftware reduziert dann das Eingangssignal ab einer entsprechend vorgegebenen Grenzfrequenz um ca. 70 % (vgl. BrainVision Analyzer: 152).

Ebendiese drei Filter fanden auch in unserem Experiment Anwendung (s. Abbildung 12). Im BrainVision Analyzer laufen die Filter jedoch unter etwas anderen Bezeichnungen, sodass mit einem *Low cutoff-Filter* alle Frequenzen unterhalb von 0,01 Hz verringert wurden. Entsprechend dämpfte der *High cutoff-Filter* alle Frequenzen oberhalb von 30 Hz (vgl. Duncan et al. 2009: 1898). Der *Notch-Filter* wurde auf 50 Hz gesetzt, um das Grundrauschen des europäischen Stromnetzes ausblenden zu können (vgl. BrainVision Analyzer: 152). Auf diese Weise werden die Daten von solchen Signalen, die von externen Quellen stammen und nicht mit den relevanten Gehirnströmen in Verbindung stehen (Stromnetz, Haut, Kopf- und Körperbewegungen), bereinigt (vgl. Luck 2014: 227). Das Ergebnis dieses Filterprozesses macht sich auch unmittelbar in der Darstellung der Daten bemerkbar, da die schwarzen Linien, die das Signal nach der Anwendung der Filter anzeigen, begradigter sind als die roten, die das Signal vor der Filterung widerspiegeln (s. Abbildung 13).

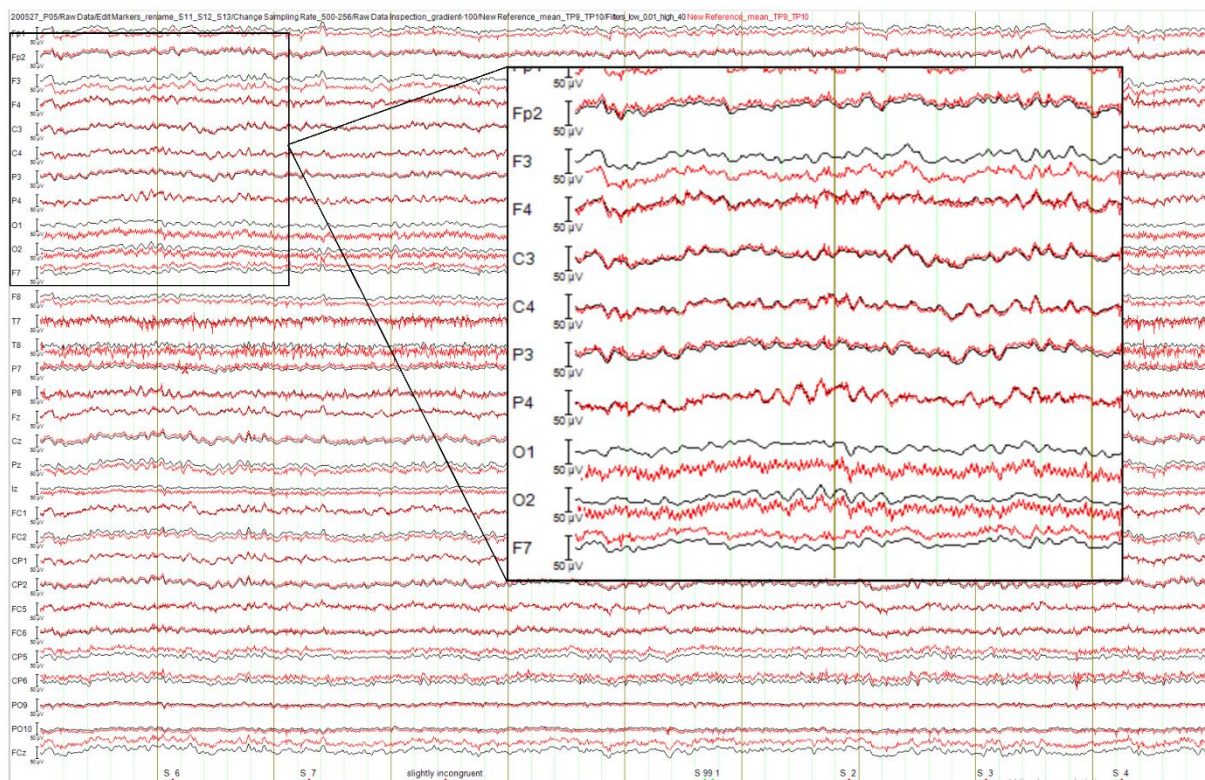
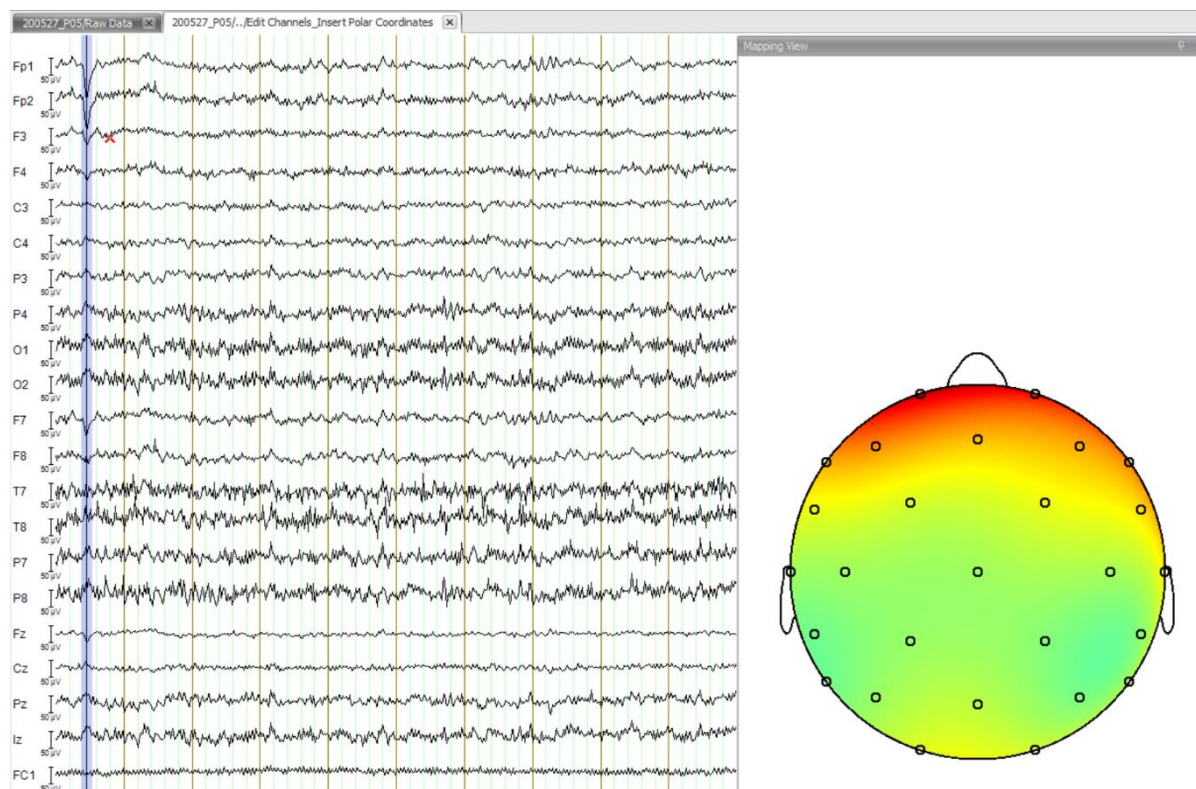


Abbildung 13: Overlay der Daten vor (rot) und nach (schwarz) Anwendung der Filter.
Im Ausschnitt ist die linke obere Ecke zu Illustrationszwecken vergrößert dargestellt.

3. Eliminierung von Artefakten (insbesondere Augenbewegungen)

Wurden die Artefakte während der Raw Data Inspection identifiziert, so folgt nun nach der Bereinigung ihre Korrektur. Die wahrscheinlich häufigsten und am einfachsten zu erkennenden Artefakte stellen die Blinzler der Probanden dar. Die Muskelaktivität hat eine starke Spannungsänderung zur Folge, die wiederum das Signal vor allem an den Elektroden in der Nähe der Augen beeinflusst (s. Abbildung 14). Wie jedoch bereits bei der Beschreibung der Raw Data Inspection erwähnt, beeinflussen diese Spannungsänderungen ebenfalls die Signale an anderen Elektroden, also auch solchen, die die Gehirnwellen an parietalen oder okzipitalen Positionen messen. Diese Blinzler können in den EEG-Daten jedoch mithilfe einer sogenannten Independent Component Analysis (ICA) korrigiert werden, indem der Effekt, den sie auf die Signale haben, von den Daten abgezogen wird (vgl. McWeeny/Norton 2020: 7).



*Abbildung 14: Blinzler sind besonders in der Nähe der Augen auffällig.
In den EEG-Kurven tauchen sie als Peaks auf (blau hinterlegt),
in der Mapping View zeigen sie sich in der rötlichen Färbung der Stirnregion.*

Eine solche ICA lässt sich im BrainVision Analyzer unter dem Menüpunkt TRANSFORMATIONS → ARTIFACT REJECTION/REDUCTION → OCULAR CORRECTION ICA durchführen. Zu beachten ist dabei, dass eine ICA das Rauschen in den Daten verstärken kann, weshalb eine solche Korrektur nur auf gefilterte Daten angewendet werden sollte (vgl. BrainVision Analyzer: 172). Die Independent Component Analysis erfolgt nach dem folgenden Grundprinzip: Basierend auf statistischen Eigenschaften werden voneinander unabhängige Komponenten identifiziert, die jeweils eine andere topographische Verteilung aufweisen. Anschließend werden diese

Komponenten genutzt, um die Spannungen, die mit diesen Artefakten zusammenhängen, von den Daten zu subtrahieren (vgl. Luck 2014: 213).

Hier wurde wieder eine semiautomatische ICA durchgeführt, die die Detektion von Blinzlern mithilfe eines Algorithmus vornimmt. Das bedeutet, dass vor allem die tatsächlichen Blinzler identifiziert werden, während horizontale Augenbewegungen weitestgehend ignoriert werden. Da in dem hier verwendeten Experimentsetup keine expliziten Augenelektroden (VEOG und HEOG) verwendet wurden, wurde die Fp1-Elektrode zu Referenzzwecken ausgewählt. Im nächsten Schritt wird bestimmt, auf welche Kanäle die Korrektur angewendet werden soll. Hier wurden alle Kanäle außer den Mastoids angewählt. Des Weiteren kann die ICA noch angepasst werden, wobei in dem hier vorliegenden Fall die Standardeinstellungen beibehalten wurden. Die Prozedur wird anschließend auf die gesamten Daten angewendet. Im Rahmen einer visuellen Inspektion kann die Identifikation der Blinzler durch den Algorithmus manuell überprüft und angepasst werden. Schließlich wurden die Komponenten F00 sowie F01 und F02 als spezifisch mit Augenbewegungen korrelierende Komponenten identifiziert und mit einem Klick auf FINISH aus den Daten entfernt.

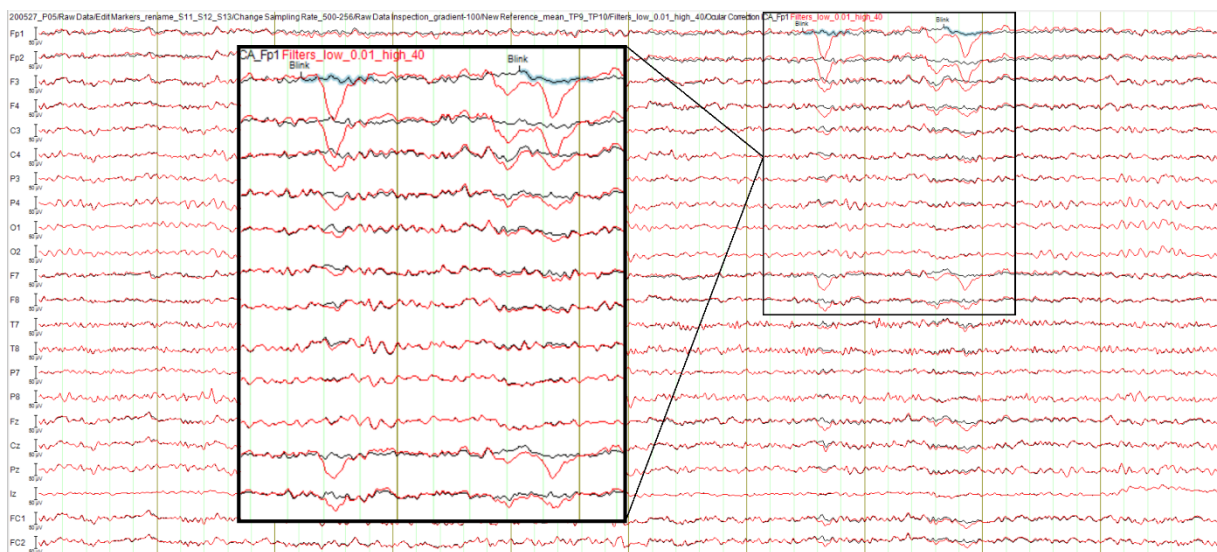


Abbildung 15: Overlay vor (rot) und nach (schwarz) der Anwendung der Independent Component Analysis (ICA).
Die Blinks wurden aus allen Kanälen herausgerechnet.

Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, wurden die Ausschläge, die als Blinzler erkannt wurden, aus den Daten entfernt. Dabei ist der Effekt besonders stark an den frontalen Elektroden Fp1 und Fp2 zu sehen, jedoch haben auch die anderen, teilweise weiter hinten liegenden Kanäle mehr oder weniger starke Korrekturen erfahren.

Mit dieser Ausfilterung von Augenbewegungen ist die vorbereitende Verarbeitung der EEG-Daten größtenteils abgeschlossen. In den folgenden Schritten liegt der Fokus auf der Auswertung der Daten im Hinblick auf den hier untersuchten N400-Effekt.

4. Segmentierung der Stimuli entsprechend der Konditionen

Bis zu diesem Zeitpunkt in der Analyse wird noch immer ein kontinuierliches EEG-Signal betrachtet. Nun liegt das Forschungsinteresse jedoch auf einem konkreten Effekt, von dem bekannt ist, dass er etwa 400 ms nach Stimulus-Onset seine größte Amplitude erreicht. Es wird also nach einem spezifischen, sogenannten time-locked, Effekt gesucht. An dieser Stelle wird daher die Konversion des kontinuierlichen EEGs in ein ereigniskorreliertes Potenzial (EKP) vollzogen. Aus dem EEG werden einzelne Segmente herausgezogen, aus denen in einem späteren Schritt der Durchschnittswert gebildet werden kann. In der Regel bestehen diese Segmente aus einem kleinen Zeitabschnitt vor dem Stimulus sowie einer bestimmten Zeit nach Stimulusgabe, innerhalb der der untersuchte Effekt auftreten sollte (vgl. Luck 2014: 249 f.). Hier sind also die in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Marker von großer Bedeutung. Sie kennzeichnen die Stellen innerhalb des EEG-Signals, an denen die einzelnen Wörter jedes einzelnen Stimulussatzes für den Probanden sichtbar waren. Die satzfinalen kritischen Wörter können nun für die Definition der Segmente verwendet werden.

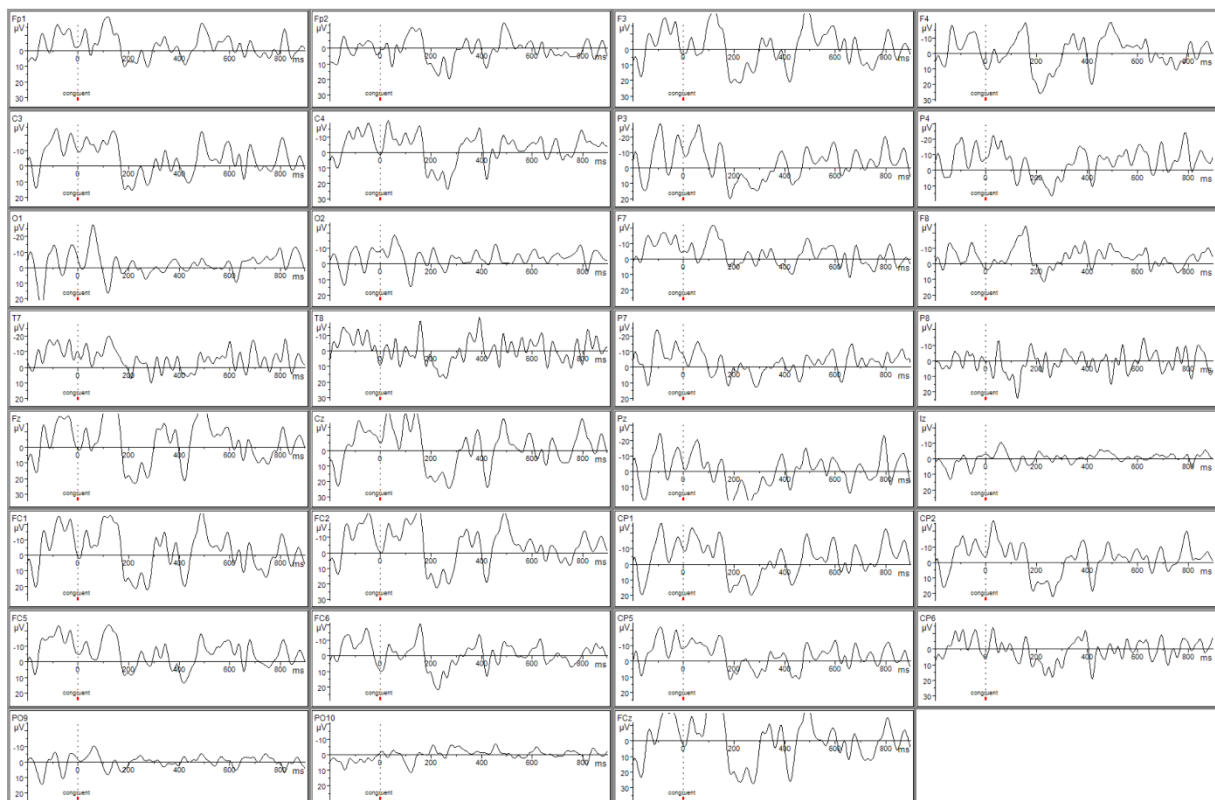


Abbildung 16: Grid View der kongruenten Segmente.

Jedes Kästchen stellt einen Kanal (Bezeichnung siehe linke obere Ecke) dar. Der Stimulus ist mit einem roten Quadrat gekennzeichnet. Die einzelnen Segmente sind insgesamt 1100 ms lang (200 ms pre-stimulus und 900 ms danach).

Die Transformation ist unter dem Punkt TRANSFORMATIONS → RESULT EVALUATION → SEGMENTATION zu finden. Die neuen Segmente sollen entsprechend auf Basis von Markern gebildet werden, wobei hier direkt zwischen den drei Konditionen – kongruent, moderat

inkongruent, stark inkongruent – unterschieden werden sollte. Daher wurde zunächst nur einer dieser Marker – S11 bzw. kongruent – ausgewählt. Entsprechend der Empfehlungen von Duncan et al. wurde das Zeitintervall auf -200 ms und 900 ms festgelegt (vgl. 2009: 1897). Darüber hinaus sollten bei der Segmentierung solche Teile der Daten ignoriert werden, die im Rahmen der Raw Data Inspection als *bad intervals* gekennzeichnet wurden. Aktiviert man dann die Grid-View (RECHTSKlick → CHANGE VIEW → GRID VIEW), so erscheint die Ansicht, wie sie in Abbildung 16 zu sehen ist.

Die gleiche Prozedur wurde anschließend in gleicher Form für die beiden anderen Konditionen durchgeführt. Dazu wurden neue Segmente basierend auf den Markern für S12 bzw. moderat inkongruent sowie S13 bzw. stark inkongruent gebildet. Alle anderen Einstellungen wurden übernommen.

5. Baseline Correction

Um verlässliche Aussagen über die Amplitude der Signale tätigen zu können, muss im nächsten Schritt eine Baseline Correction durchgeführt werden. Dadurch sollen vertikale Verschiebungen der Kurven, die aufgrund von Hautfeuchtigkeit oder statischen Aufladungen der Elektroden auftreten können, ausgeglichen werden (vgl. Luck 2014: 251).

Zu finden ist diese Operation unter dem Tab TRANSFORMATIONS → RESULT EVALUATION → BASELINE CORRECTION. Der sich öffnende Dialog ist sehr übersichtlich gestaltet. Es wird lediglich nach einem Start- und einem Endpunkt für die Korrektur gefragt. Dieses Intervall umfasst die 200 ms, die während der Segmentierung vor dem Stimulus angesetzt wurden. Daher wurden die Werte -200 und 0 in die Maske eingetragen. Die in diesem 200 ms langen Intervall befindlichen Werte werden gemittelt, wodurch sich schließlich der neue Nullpunkt der im Segment enthaltenen Werte ergibt (vgl. BrainVision Analyzer 267).

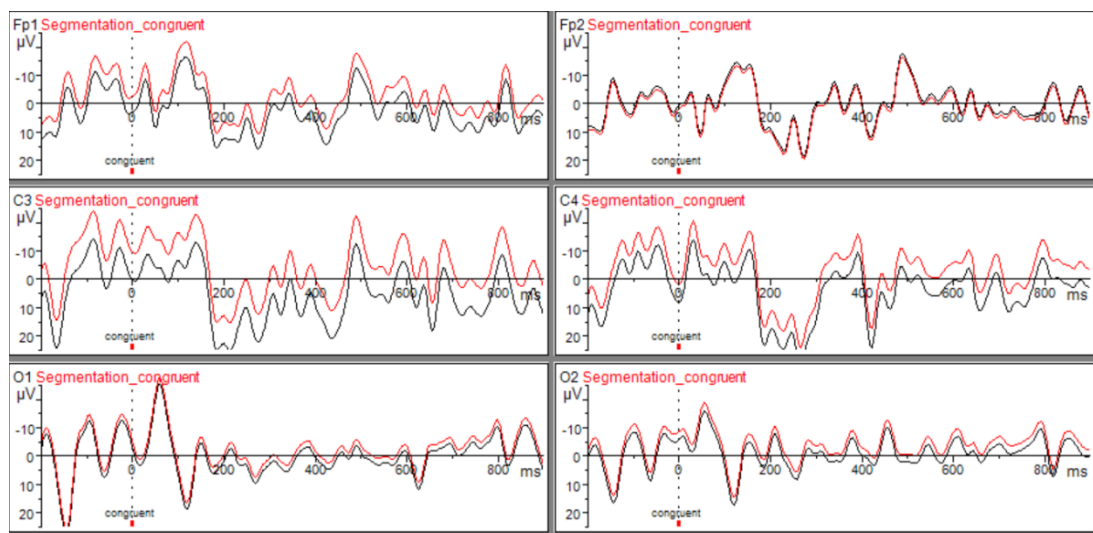


Abbildung 17: Overlay vor (rot) und nach (schwarz) der Baseline Correction von ausgewählten Kanälen. Nach der Neuausrichtung der Grundlinie wurde die Kurve in vertikaler Richtung nach unten korrigiert.

Abbildung 17 stellt das Ergebnis der Operation für die kongruenten Segmente dar. Ebenso wie die Segmentierung wurde die Baseline Correction entsprechend auch für die moderat inkongruenten und stark inkongruenten Stimuli durchgeführt.

6. Kalkulation von Durchschnittswerten

Im letzten Schritt der Analyse werden schließlich alle Segmente einer Kondition zusammengerechnet, sodass Durchschnittswerte entstehen. Hintergrund für dieses Vorgehen ist die Annahme, dass die ereigniskorrelierte Gehirnaktivität auf diese Weise besser von der Grundaktivität bzw. anderen gleichzeitig ablaufenden kognitiven Aktivitäten unterschieden werden kann.

The ERP is assumed to be largely identical on each trial, whereas the other activity is assumed to be completely random with respect to the time-locking event. That is, the noise at a given time point is positive-going on some trials and negative-going on other trials, and the positives and negatives will cancel each other out when the values are averaged together across trials, leaving just the consistent ERP activity (Luck 2014: 259).

Daher wird unter dem Menüpunkt TRANSFORMATIONS → RESULT EVALUATION → AVERAGE auch die *full range*, also alle verfügbaren Segmente, ausgewählt. Wie bereits erwähnt, werden bei diesem Schritt die zuvor als *bad interval* markierten Segmente von der Berechnung der Durchschnittswerte ausgenommen.

Wie auch bei der Segmentierung erfolgt das Averaging konditionsspezifisch. Die gleiche Operation muss also auch für die anderen beiden Konditionen – moderat inkongruent und stark inkongruent – durchgeführt werden.

5.3.4 Ergebnisse

Nachdem die im vorhergehenden Unterkapitel beschriebenen Analyseschritte durchgeführt wurden, können die Durchschnittswerte der drei Konditionen im BrainVision Analyzer übereinandergelegt werden (s. Abbildung 18).

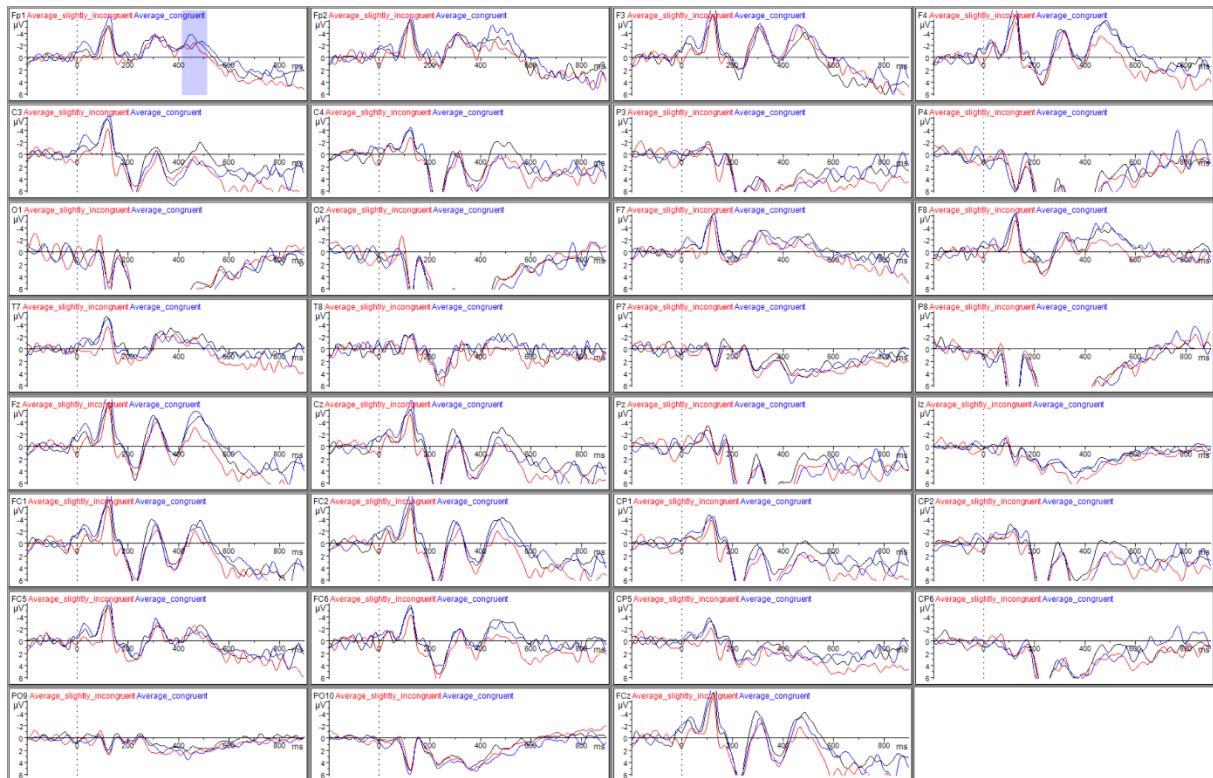
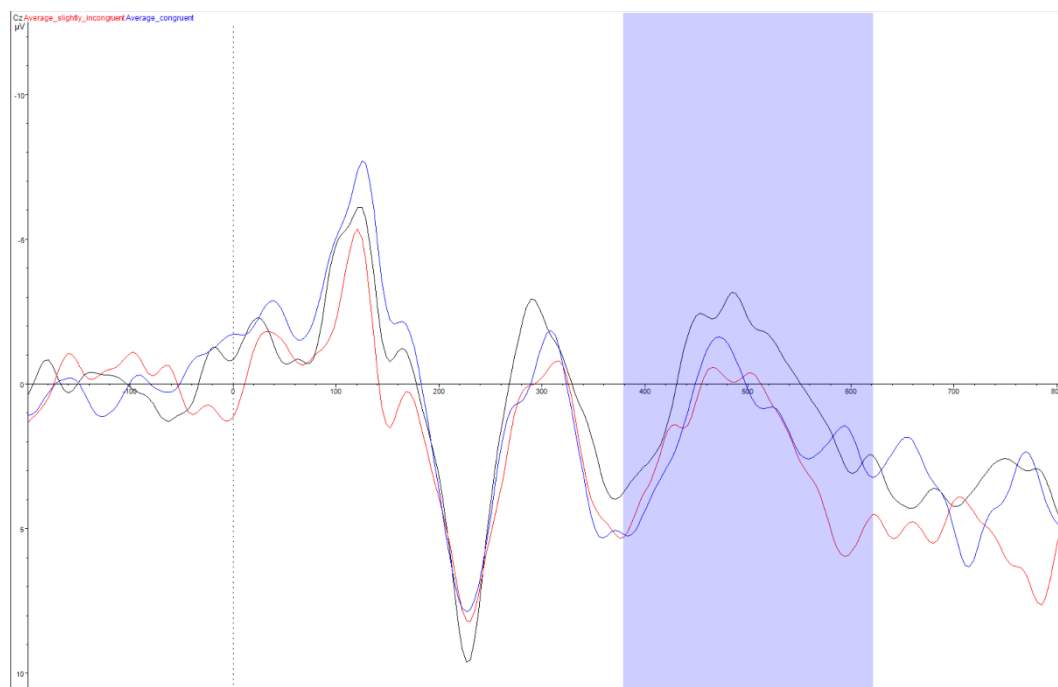


Abbildung 18: Overlay all averages.
Schwarz ist stark inkongruent, rot moderat inkongruent und blau kongruent.

In dem Grid View sind nun alle Durchschnittswerte an allen Kanälen zu einem Gesamtbild zusammengefasst. Wie aus der detaillierten Besprechung des erwarteten N400-Effekts im theoretischen Teil dieser Arbeit hervorgegangen ist, tritt dieser Effekt vor allem an zentralen und parietalen Elektroden auf. Abbildung 19 zeigt daher die Werte an der Cz-Elektrode. Zunächst fällt auf, dass alle drei Kurven im Zeitraum von ca. 400 - 600 ms nach Stimulus-Onset eine negative Auslenkung aufweisen. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Amplitude der stark inkongruenten Sätze größer ausfällt als die der anderen beiden Konditionen. Die zweitgrößte Auslenkung erfährt jedoch die Kurve, die die kongruenten Sätze repräsentiert. Die rote Kurve, die die Gehirnaktivität des Probanden bei der Rezeption von moderat inkongruenten Sätzen widerspiegelt, schlägt zwar auch nach oben aus, jedoch ist ihre Auslenkung relativ gering.

Ein ähnliches Bild zeichnet auch die Peak Detection, die im Anschluss an das Averaging durchgeführt wurde. Unter dem Punkt TRANSFORMATIONS → SEGMENT ANALYSIS FUNCTIONS → RESULT EVALUATION → PEAK DETECTION werden computergestützt in jedem Kanal die Peaks gesucht und markiert, wobei hier vor allem das globale Maximum, also die größte negative Auslenkung, innerhalb des zuvor definierten Intervalls (300 - 600 ms) interessant ist. Diese Operation erleichtert die Identifizierung des Effekts in unterschiedlichen Kanälen, in denen der N400-Effekt sowohl zu unterschiedlichen Zeitpunkten als auch unterschiedlich stark ausgeprägt auftreten kann (vgl. Duncan et al. 2009: 1898).



*Abbildung 19: Overlay all averages an der Cz-Elektrode.
Schwarz ist stark inkongruent, rot moderat inkongruent und blau kongruent.
Der Bereich ca. 400 - 600 ms nach Stimulus-Onset ist blau eingefärbt.*

Aufgrund der in Abbildung 19 dargestellten Ergebnisse kann also in Bezug auf die zu Beginn dieses Projekts aufgestellten Hypothesen geschlussfolgert werden, dass in der Tat ein N400-ähnlicher Effekt erzielt werden konnte. Dieser ist vor allem für Sätze, die mit einem semantisch stark inkongruenten Wort enden, präsent. Sätze, die eine moderate Inkongruenz aufweisen, erzeugten jedoch nur einen sehr geringen Ausschlag. Im Vergleich dazu weist die Kurve der kongruenten Kondition eine stärkere Auslenkung auf. Die zweite Hypothese konnte daher nicht bestätigt werden.

6 Reflexion des Projekts

Im vorstehenden Kapitel 5 wurde ein EEG-Experiment zur Elizitation des semantischen N400-Effekts beschrieben. An dieser Stelle soll jedoch erneut deutlich gemacht werden, dass es sich vor allem bei den Ausführungen zur Durchführung sowie zur Auswertung der Daten um den Bericht einer modellhaften Vorgehensweise handelt. Die Auswertung wurde also explizit nicht ergebnisorientiert durchgeführt. Vielmehr stand die explorative Bekanntmachung mit der Methode und den zur Verfügung stehenden Auswertemöglichkeiten im Vordergrund des Projekts. Aus diesem Grund liegt die offensichtlichste Schwachstelle des hier beschriebenen Experiments auch in der geringen Probandenzahl, die u. a. auch auf die Corona-Pandemie zurückzuführen ist. Nach einigen wenigen Probeaufnahmen an Teammitgliedern wurde lediglich ein einziger Ernstlauf mit einem externen Probanden durchgeführt. Daraus ergeben sich wiederum verschiedene Probleme.

Zum einen war die geringe angestrebte Probandenzahl der Grund für die hohe Anzahl an Stimuli, die innerhalb eines Durchlaufs gezeigt wurde. Da der N400-Effekt relativ klein ist ($<5 \mu V$), werden viele Trials benötigt, um ihn mithilfe des Averagings sichtbar zu machen. Statt aber vielen Probanden eine geringe Anzahl an Stimuli zu präsentieren, bestand ein gesamter Durchlauf für einen Probanden aus 300 Sätzen. Dadurch betrug die Dauer des Durchlaufs ca. eine Stunde, wobei die Zeit für die Vorbereitung des Probanden zusätzlich beachtet werden muss. Obwohl bereits in der Gestaltung der Stimuli sowie in den Überlegungen zum Experimentdesign berücksichtigt wurde, dass das Experiment sehr monoton ist, konnten auch die eingerichteten Pausen eine Ermüdung des Probanden nicht verhindern. Tatsächlich sprechen die eigenen Erfahrungen sowie die Rückmeldungen der Teammitglieder und Probanden dafür, dass sie die Aufgabe als sehr anstrengend empfunden haben. Daher kann auch nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass alle Stimuli aufmerksam gelesen und rezipiert wurden. Die Tatsache, dass die meisten Trials, die im Anschluss an die Auswertung der Eye-Tracking-Daten von der Analyse der EEG-Daten ausgeschlossen werden mussten, am Ende des zweiten Blocks bzw. im dritten Block auftraten, unterstützt die Schlussfolgerung, dass zunehmende Erschöpfung und abnehmende Konzentration zu einer schlechteren Verarbeitung der Stimuli führt.

Bezogen auf den Ausschluss einzelner Trials, in denen die vom Eye-Tracker gemessenen Fixationen und Sakkaden nicht für eine aufmerksame Verfolgung der Stimuli sprechen, sollte an dieser Stelle außerdem erwähnt werden, dass während der Auswertung der EEG-Daten keine Lösung gefunden wurde, um spezifische Trials auf einfache Weise von den folgenden Analyseschritten auszunehmen. Da mögliche Workarounds (z. B. durch Abzählen der Trials und manuelles Markieren während der Raw Data Inspection) aufgrund einer hohen Fehleranfälligkeit ausgeschlossen wurden, müsste auch hier in Zukunft in Erfahrung gebracht

werden, wie ganze Trials, die möglicherweise keine Artefakte aufweisen, von der weiteren Analyse ausgenommen werden können.

Zwar war in unserem Versuchsaufbau die zusätzliche Verwendung des Eye-Trackings dafür vorgesehen, die kognitive Verarbeitung der Stimuli zu überprüfen, jedoch ergeben sich aufgrund des Feedbacks der Testpersonen einige Zweifel an der Sinnhaftigkeit dieser Kombination von Methoden. Wie in Kapitel 5.1.2 kurz dargestellt, misst der Eye-Tracker die Augenbewegungen, wobei zwischen Fixationen und Sakkaden unterschieden wird. Das Experimentdesign der hier dargestellten Studie basiert auf der Annahme, dass Fixationen über die Aufmerksamkeitszuteilung Aufschluss geben, d. h. je länger die Fixation, desto aufmerksamer wurde das Präsenzierte verarbeitet. Die aufgezeichneten ET-Daten deuten darauf hin, dass der hier beispielhaft analysierte Proband größtenteils auf die Mitte des Bildschirms, also sozusagen auf die Area of Interest geschaut hat, in der die Stimuli dargestellt wurden. Auf der anderen Seite gab er im Gespräch nach der Aufnahme an, durchaus mit den Gedanken abgeschweift zu sein, also die präsentierten Inhalte nicht aufmerksam verfolgt zu haben. Demzufolge könnten die in Kapitel 5.3.2 erwähnten, außergewöhnlich langen Fixationen in der Tat so gedeutet werden, dass der Proband lediglich mit ‚leerem Blick‘ auf den Bildschirm gestarrt hat. Man kann also die Logik der zuvor angestellten Überlegung, das Eye-Tracking als Überprüfung der Aufmerksamkeit während der Verarbeitung der Stimuli zu nutzen, in Frage stellen.

Daraus ergibt sich die Frage, ob die gemessenen Daten überhaupt Auskunft über die kognitiven Prozesse während der Sprachverarbeitung geben können. Wenn die Wörter und Sätze nicht vollständig und aufmerksam gelesen werden, kann dann eine kognitive Verarbeitung stattfinden? Kann ohne eine solche Verarbeitung überhaupt ein N400-Effekt auftreten?

Nun soll einmal angenommen werden, dass der Proband die Stimuli größtenteils aufmerksam verfolgt hat, weshalb die zuvor modellhaft analysierten EEG-Daten Gehirnaktivitäten anzeigen, die mit der kognitiven Sprachverarbeitung assoziiert werden können.

Tatsächlich könnten die Daten, wie sie in Abbildung 19 zu sehen sind – zumindest in der stark inkongruenten Kondition – tatsächlich als N400-ähnlicher Effekt interpretiert werden. Dennoch bleiben einige Zweifel an der Richtigkeit des hier gewählten Auswerteschemas. Zwar basiert der Analyseprozess auf Empfehlungen aus der Literatur, jedoch war die hier durchgeführte und beschriebene Analyse der EEG-Daten mithilfe des BrainVision Analyzers die erste Erfahrung mit dieser Art von Daten. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei der Anwendung der verschiedenen Analyseschritte Fehler gemacht wurden, die die Daten möglicherweise verzerren. Um verlässlichere Aussagen über das Ergebnis von dem hier thematisierten Experiment treffen zu können, müsste die Auswertung einmal von Experten

überprüft werden, um mögliche Fehlerquellen zu identifizieren und zu lernen, wie mit den erhobenen Daten korrekt umzugehen ist.

Ebenso könnte die Qualität der erhobenen Daten in Frage gestellt werden. Einerseits liegen wenige Daten vor, was auf die geringe Anzahl an Probanden zurückzuführen ist. Möglicherweise ist der N400-Effekt daher nicht so deutlich zu sehen. Andererseits sollte ebenfalls beachtet werden, dass auch die Durchführung der Aufnahmen ohne Betreuung durch einen Experten stattgefunden hat. Auch wenn zuvor die Präparation der Probanden in diversen Workshops behandelt wurden, kann nicht mit hundertprozentiger Sicherheit ausgeschlossen werden, dass die EEG-Kappe nicht richtig platziert wurde oder die aufgezeichneten Daten aus anderen Gründen – z. B. zu geringe Leitfähigkeit der Elektroden – verunreinigt wurden. Auch hier wäre eine Absicherung durch einen Experten wünschenswert, um Fehlerquellen ausschließen zu können.

Quintessenz der Reflexion des Projekts ist also, dass durchaus noch Verbesserungsbedarf besteht. Neben den eben erwähnten Unsicherheiten in Bezug auf die Qualität der Daten und die korrekte Anwendung der Analysesoftware, sind im Laufe des Projekts auch Schwachstellen beim Experimentdesign aufgefallen. So wurden bei den Vorüberlegungen zu den Stimuli beispielsweise die in Kapitel 3 thematisierten wrap-up-Effekte am Satzende nicht beachtet. Auch wenn in den klassischen N400-Experimenten das kritische Wort am Satzende auftaucht, sollte das Design unter Berücksichtigung der neueren Erkenntnisse eventuell überarbeitet werden. Mit einer semantischen Verletzung in der Mitte des Satzes lässt sich möglicherweise der intendierte N400-Effekt einfacher von diesen wrap-up-Effekten unterscheiden, sodass die Identifikation leichter fällt. Darüber hinaus wäre die Verlängerung der Stimuluspräsentation eine Möglichkeit, um klarere Ergebnisse zu erzielen. Während bei den ursprünglichen N400-Paradigmen noch Wortlängen von 100 ms gewählt wurden, empfehlen Duncan et al., die Wörter doppelt so lange zu präsentieren (vgl. Duncan et al. 2009: 1897). Auch diesbezüglich wäre eine Modifikation des Designs denkbar, um eventuelle Unterschiede feststellen zu können.

Schlussendlich haben sich auch aus dem Feedback der Testpersonen Denkanstöße zur Verbesserung ergeben. Hier steht vor allem die Erfahrung des Probanden im Vordergrund. Zwar waren die Rückmeldungen während der Präparation nicht negativ, jedoch könnte die Situation für die Probanden angenehmer gestaltet werden, indem sie beispielsweise stärker in den Vorbereitungsprozess mit eingebunden werden. So könnte z. B. die grafische Veranschaulichung der Impedanzmessung (dargestellt in Abbildung 6) auf dem Probandenbildschirm gezeigt werden, sodass sie den Sinn und Zweck der Prozedur besser nachvollziehen können. Auf diese Weise könnte möglicherweise auch die Akzeptanz für die Methode und die Anwendung des Elektrolytgels erhöht werden. Alternativ könnte während der Vorbereitung auf dem Probandenbildschirm visuell ansprechendes Material in Form von Fotos

oder Videos gezeigt werden, sodass der Proband mit einer entspannten Haltung in den Experimentdurchlauf startet. Außerdem sollte weiterhin über Möglichkeiten der Reduktion der Experimentdauer nachgedacht werden. Diese wirkt sich zumindest indirekt auf die Qualität der Daten aus, da mit steigender Anstrengung und eventuell auftretender Frustration auch die Konzentration sowie die bewusste Verarbeitung der Stimuli nachlässt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit lässt sich auf verschiedenen Ebenen zusammenfassen. Im theoretischen Teil wurden ereigniskorrelierte Potenziale besprochen, die offensichtlich in unterschiedlichen Stadien während der Sprachverarbeitung gemessen werden können. In diesem Zuge wurde ein kurzer Überblick über die EEG- und EKP-Methodik gegeben, an den sich eine ausführliche Besprechung der hier im Fokus stehenden N400-Komponente angeschlossen hat. Um die Eigenschaften dieses Effekts besser nachvollziehen zu können, wurde diese in der Vergangenheit häufig als Marker für semantische Inkongruenz geltende Komponente mit einer anderen sprachbezogenen Komponente verglichen – der P600. Obwohl die anfänglichen Studien zu diesem Effekt von der Hypothese geleitet wurden, dass es sich dabei um ein Anzeichen für syntaktische Fehler in einem Satz handelt, konnte dies bis heute nicht abschließend verifiziert werden. Vielmehr scheint die P600 aufzutreten, wenn die zuvor angenommene Interpretation eines Satzes (oder anderer Modalitäten) mit dem stetig hinzukommenden Input nicht zu vereinbaren ist, sodass sie überarbeitet werden muss. Diese beiden prominenten Komponenten, gemeinsam mit den ebenfalls kurz erwähnten ELAN und LAN, bieten die Möglichkeit, Modelle für den Prozess der Sprachverarbeitung zu entwickeln. Verschiedene Ansätze wurden dazu in Kapitel 2.2.3 diskutiert.

Ergänzend wurden aktuellere Erkenntnisse zur N400-Komponente vorgestellt. Daraus ging hervor, dass es sich möglicherweise doch nicht bloß um einen Hinweis auf semantische Unstimmigkeiten in verbalen Kontexten handelt. Die Tatsache, dass auch andere Stimulusarten (Bilder, Gesichter, Gerüche etc.) einen ähnlichen Effekt auslösen, spricht dafür, dass die N400 nicht sprachspezifisch ist, was lange Zeit angenommen wurde. Darüber hinaus verfolgten viele Studien den Ansatz, dass die N400-Komponente gar nicht die semantische Inkongruenz anzeigt, sondern eher auf Schwierigkeiten beim Zugriff auf Informationen aus dem Langzeitgedächtnis hindeutet. Alle Studienergebnisse zusammengekommen könnte man also zu dem Schluss kommen, dass die N400, statt spezifisch auf Problemen bei der semantischen Integration von verbalem Material hinzuweisen, vielmehr einen Teil des gesamten kognitiven Prozesses der Bedeutungskonstruktion markiert, an dem viele verschiedene neuronale Operationen beteiligt sind. Aus diesem Grund belegt die hier wiedergegebene Diskussion um ‚sprachbezogene‘ EKPs generell sowie die N400 im Speziellen vor allem die Komplexität der neurokognitiven Prozesse.

Die zweite Ebene, auf der diese Arbeit zusammenfassend betrachtet werden kann, ist die des eigenen Projekts. Hier kann zunächst grundlegend festgehalten werden, dass alle Beteiligten im Laufe dieses Prozesses viel gelernt haben – von der Herangehensweise zur Erstellung eines eigenen Experiments, über die Präparation von Probanden für eine EEG-Messung, bis hin zu der Handhabung der Analysesoftware BrainVision Analyzer 2.0. Besonders zeit- und arbeitsintensiv war vor allem die Vorbereitung des Experiments, wobei die Gestaltung der Stimuli einen Großteil der Zeit eingenommen hat. Mit dem zum aktuellen Zeitpunkt vorhandenen Wissen muss allerdings bereits an dieser Stelle erwähnt werden, dass die verwendeten Stimuli, auch wenn mehrere Wochen Arbeit in ihre Erstellung eingeflossen sind, nicht optimal für die Untersuchung der N400 sind. Möglicherweise sollten sie dahingehend angepasst werden, dass das kritische Wort nicht am Satzende steht und dass die Präsentation der Stimuli verlängert wird. Bei dieser Gelegenheit könnte überprüft werden, ob tatsächlich die sogenannten wrap-up-Effekte am Satzende auftreten.

Bezogen auf die Durchführung des EEG-Experiments war vor allem die Handhabung der Geräte und Utensilien spannend. Hier fiel bereits nach kurzer Zeit auf, dass das alte Sprichwort „Übung macht den Meister“ durchaus auch in diesem Kontext zutrifft. Während die ersten Testaufnahmen noch von mitunter sehr schlechten Impedanzen geprägt waren, konnten diese bis zur beschriebenen Aufnahme des externen Probanden auf den typischerweise angegebenen Grenzwert von unter 5 k Ω gesenkt werden. Dies hing einerseits mit der zunehmenden Übung zusammen, aber auch mit steigendem Mut, die Kopfhaut des Probanden mit dem Holzstäbchen und der Kanülenspitze zu berühren und tatsächlich – rücksichtsvoll, aber dennoch bestimmt – zu bearbeiten.

Die Auswertung der Daten ist sicherlich der Punkt, an dem noch am meisten gelernt werden kann und muss. Zwar wurde sich mit der Software und den gegebenen Möglichkeiten der Datenaufbereitung und -auswertung bekannt gemacht, jedoch bestehen noch einige Zweifel daran, ob sie korrekt ausgeführt wurden. Nun sind solche Begriffe wie Ocular Correction, High pass- und Low pass-Filter, Independent Component Analysis und Baseline Correction keine Fremdworte mehr, allerdings herrscht noch immer Unsicherheit, ob die in unseren Daten sichtbare Amplitude als N400-Effekt interpretiert werden kann. Wie bereits in der Reflexion des Projekts erwähnt, wäre hier die Rücksprache mit Experten hilfreich, um unser gewähltes Vorgehen bestätigt zu wissen und/oder aus unseren Fehlern zu lernen. Möglicherweise sind diese nun gesammelten Erfahrungen eine gute Voraussetzung, um die Analysesoftware und ihre Möglichkeiten zur Datenauswertung in einem Workshop ausführlich thematisieren zu können. Mit dem nun vorhandenen Wissen können die Zusammenhänge, die während einer solchen Veranstaltung vermittelt werden, sicherlich besser nachvollzogen und für spätere Arbeiten an eigenen Projekten nutzbar gemacht werden.

Auch wenn noch viel Verbesserungspotenzial vorhanden ist – inklusive der Vorschläge, die im vorherigen Kapitel bereits thematisiert wurden – so kann doch grundsätzlich der große Nutzen der EEG-Methode für die weitere psycholinguistische Forschung generell sowie speziell in den *psycholinguistics laboratories* der TU Dortmund festgehalten werden. Grundsätzlich sollte den Beteiligten bewusst sein, dass die Aufnahme von EEG-Daten zwar nichtinvasiv erfolgt, die Aufnahmesituation für die Probanden jedoch durchaus belastend, zumindest aber anstrengend sein kann, weshalb die Verhältnismäßigkeit des Einsatzes der Methode in Forschungen mit besonderen Personengruppen (z. B. Kindern, Alzheimer-Demenz-Erkrankten etc.) abzuwägen wäre. Darüber hinaus müsste ein angemessener Stuhl für die EEG-Aufnahmen angeschafft werden, der permanent in den Laboren zur Verfügung steht. Inwiefern die Kombination mit anderen Methoden (Eye-Tracking, Virtual Reality, Reaktionszeitexperimenten etc.) fruchtbar ist, müsste in weiteren Experimenten überprüft werden, wenn möglicherweise vor allem die technischen Probleme, die in dem hier beschriebenen Fall aufgetreten sind, gelöst wurden. Ist die problemlose Methodenintegration gegeben, d. h., wenn die Synchronisation der verschiedenen Datenströme einwandfrei funktioniert und die zugrunde liegende Logik des Experimentdesigns klar und schlüssig ist, so scheint das EEG eine sinnvolle Ergänzung des Methodenkanons der Labore zu sein. Um jedoch auch belastbare Ergebnisse erzielen zu können, müssen die an den Experimenten Beteiligten die Möglichkeit haben, sich mit der Methode, den Geräten und der Handhabung vertraut zu machen.

III. Literaturverzeichnis

- Ainsworth-Darnell, Kim/Shulmann, Harney G./Boland, Julie E. (1998) Dissociating Brain Responses to Syntactic and Semantic Anomalies: Evidence from Event-Related Potentials. In: *Journal of Memory and Language* 38. 112 - 130.
- Bayer, Sonja K. (2003) Bildschirmtypografie – Technische und psychologische Determinanten der Gestaltung von Online-Medien. Ursula Rautenberg und Volker Titel (Hrsg.) *Alles Buch – Studien der Erlanger Buchwissenschaft*. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Bera, Palash/Soffer, Pnina/Parsons, Jeffrey (2019) Using Eye Tracking to Expose Cognitive Processes in Understanding Conceptual Models. In: *MIS Quarterly*, 43, 4. 1-22.
- Beres, Anna M. (2017) Time is of the Essence: A Review of Electroencephalography (EEG) and Event-Related Brain Potentials (ERPs) in Language Research. In: *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 42. 247-255.
- Drenhaus, Heiner/Beim Graben, Peter (2012) Ereigniskorrelierte Potenziale. In: *Zeitschrift für Germanistische Linguistik* 40, 1. 68-96.
- Duncan, Connie C./Barry, Robert J./Connolly, John F./Fischer, Catherine/Michie, Patricia T./Näätänen, Risto/Polich, John/Reinvang, Ivar/van Petten, Cyma (2009) Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. In: *Clinical Neurophysiology* 120. 1883 - 1908.
- Federmeier, Kara D./Kutas, Marta (1999) A Rose by Any Other Name – Long-Term Memory Structure and Sentence Processing. In: *Journal of Memory and Language* 41, 4. 469 - 495.
- Frenzel, Sabine/Schlesewsky, Matthias/Bornkessel-Schlesewsky, Ina (2011) Conflicts in language processing: A new perspective on the N400-P600 distinction. In: *Neuropsychologia*, 49. 574 - 579.
- 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. 183 - 192.
- Friederici, Angela D./Hahne, Anja/Mecklinger, Axel (1996) Temporal Structure of Syntactic Parsing: Early and Late Event-Related Brain Potential Effects. In: *Journal of Experimental Psychology* 22, 5. 1219 - 1248.

- Friederici, Angela D. (2001) Syntactic, Prosodic, and Semantic Processes in the Brain: Evidence from Event-Related Neuroimaging. In: Journal of Psycholinguistic Research 30, 3. 237 - 250.
- Friederici, Angela D. (2002) Towards neural basis of auditory sentence processing. In: TRENDS in Cognitive Sciences 6, 2. 78 - 84.
- Frisch, Stefan/Schlesewsky, Matthias (2001) The N400 reflects problems of thematic hierarchizing. In: NeuroReport 12, 15. 3391 - 3394.
- Gillespie, Joe (2001) Alien Typography. In: Digital Web Magazine. http://www.digital-web.com/articles/alien_typography/ [27.01.2020]
- Goldstein, Sebastian (2008) Das Sehen. Wissensdatenbank. <http://old.useye.de/wissensdatenbank/das-sehen/> [24.01.2020]
- Goregliad Fjaellingsdal, Tatiana/Ruigendijk, Esther/Scherbaum, Stefan/Bleichner, Martin G. (2016) The N400 effect during speaker-switch – Towards a conversational approach of measuring neural correlates of language. In: Frontiers in Psychology 7, 1854.
- Guajardo, Lourdes F./Wicha, Nicole Y. Y. (2014) Morphosyntax can modulate the N400 component: Event related potentials to gender-marked post-nominal adjectives. In: NeuroImage 91. 262 - 272.
- Hagoort, Peter/Brown, Colin/Groothusen, Jolanda (1993) The syntactic positive shift (sps) as an erp measure of syntactic processing. In: Language and Cognitive Processes 8, 4. 439 - 486.
- Hagoort, Peter/Brown, Colin M./Osterhout, Lee (1999) The neurocognition of syntactic processing. In: Brown, C.M. und P. Hagoort (Hrsg.) Neurocognition of Language. Oxford: University Press. 273 - 316.
- Hagoort, Peter (2003) Interplay between Syntax and Semantics during Sentence Comprehension: ERP Effects of Combining Syntactic and Semantic Violations. In: Journal of Cognitive Neuroscience 15, 6. 883 - 899.
- Hahne, Anja/Friederici, Angela D. (1999) Electrophysiological Evidence for Two Steps in Syntactic Analysis: Early Automatic and Late Controlled Processes. In: Journal of Cognitive Neuroscience 11, 2. 194 - 205.
- Hahne, Anja/Friederici, Angela D. (2002) Differential task effects on semantic and syntactic processes as revealed by ERPs. In: Cognitive Brain Research 13. 339 - 356.

- Hahne, Anja/Jescheniak, Jörg D. (2001) What's left if the Jabberwock gets the semantics? An ERP investigation into semantic and syntactic processes during auditory sentence comprehension. In: Cognitive Brain Research 11, 199 - 212.
- Holcomb, Phillip J./Neville, Helen J. (1991) Natural speech processing: An analysis using event-related brain potentials. In: Psychobiology 19, 4. 286 - 300.
- IDS – Leibniz-Institut für Deutsche Sprache (2018) Häufigkeitsmaße: die Häufigkeitsklassen. <http://www.ids-mannheim.de/cosmas2/server/themen/haeufigkeitsmasse/klassen.html> [12.02.2020]
- Keibel, Holger (2008, 2009): *Mathematische Häufigkeitsmaße in der Korpuslinguistik: Eigenschaften und Verwendung*. Mannheim: Institut für Deutsche Sprache. <http://www.ids-mannheim.de/kl/dokumente/freqMeasures.html> [12.02.2020]
- Kupietz, Marc/Lüngen, Harald/Kamocki, Paweł/Witt, Andreas (2018): The German Reference Corpus DeReKo: New Developments – New Opportunities. In: Calzolari, Nicoletta/Choukri, Khalid/Cieri, Christopher/Declerck, Thierry/Goggi, Sara/Hasida, Koiti/Isahara, Hitoshi/Maegaard, Bente/Mariani, Joseph/Mazo, Hélène/Moreno, Asuncion/Odijk, Jan/Piperidis, Stelios/Tokunaga, Takenobu (Hrsg.): Proceedings of the Eleventh International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2018). Miyazaki: European Language Resources Association (ELRA), 2018. 4353 - 4360.
- Kutas, Marta/Federmeier, Kara D. (2011) Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential (ERP). In: Annual Review of Psychology 62. 621 - 647.
- Kutas, Marta/Hillyard. Steven A. (1980a) Event-Related Brain Potentials to Semantically Inappropriate and Surprisingly Large Words. In: Biological Psychology 11, 2. 99 - 116.
- Kutas, Marta/Hillyard. Steven A. (1980b) Reading Senseless Sentences: Brain Potentials Reflect Semantic Incongruity. In: Science 207, 4427. 203 - 205.
- Kutas, Marta/Hillyard. Steven A. (1983) Event-Related Brain Potentials to Grammatical Errors and Semantic Anomalies. In: Memory & Cognition 11, 5. 539 - 550.
- Kutas, Marta/Hillyard. Steven A. (1984) Brain Potentials during Reading Reflect Word Expectancy and Semantic Association. In: Nature 307, 5947. 161 - 163.
- Lau, Ellen F./Phillips, Colin/Poehppel, David (2008) A cortical network for semantics: (de)constructing the N400. In: Nature 9. 920 - 933.

- Leuchs, Laura (2019) Choosing your reference – and why it matters. In: Brain Products Press Release. <https://pressrelease.brainproducts.com/referencing/> [24.06.2020]
- Luck, Steven J. (2014) An Introduction to the Event-Related Potential Technique. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- McWeeny, Sean/Norton, Elizabeth (2020) Understanding event-related potentials (ERPs) in clinical and basic language and communication disorders research: a tutorial. In: International Journal of Language & Communication Disorders. 1 - 13.
- meganeuro (2014) NeurOne User Manual. https://www.meditech.nu/files/2017-02/1486987230_neurone.pdf [21.03.2020]
- Meyer, Patric/Mecklinger, Axel/Friederici, Angela D. (2007) Bridging the gap between the semantic N400 and the early old/new memory effect. In: NeuroReport 18, 10. 1009 - 1013.
- Meyer, Wulf-Uwe/Niepel, Michael/Rudolph, Udo/Schützwohl, Achim (1991) An experimental analysis of surprise. In: Cognition and Emotion 5, 4. 295 - 311.
- Milnik, Volker (2012) Elektrophysiologie in der Praxis – Neurographie, Evozierte Potenziale und EEG. München: Urban & Fischer.
- Molfese, Dennis L./Molfese, Victoria J./Kelly, Spencer (2001) The Use of Brain Electrophysiology Techniques to Study Language: A Basic Guide for the Beginning Consumer of Electrophysiology Information. In: Learning Disability Quarterly 24, 3. 177 - 188.
- Münte, Thomas F./Heinze, H.-J./Prevedel, H. (1990) Ereigniskorrelierte Hirnpotentiale reflektieren semantische und syntaktische Fehler bei der Sprachverarbeitung. In: Klinische Neurophysiologie 21, 2. 75 - 81.
- Osterhout, Lee/Holcomb, Phillip J. (1992) Event-Related Potentials Elicited by Syntactic Anomaly. In: Journal of Memory and Language 31. 785 - 806.
- Osterhout, Lee (1997) On the Brain Response to Syntactic Anomalies: Manipulations of Word Position and Word Class Reveal Individual Differences. In: Brain and Language 59. 494 - 522.
- Pannekamp, Ann/Toepel, Ulrike/Alter, Kai/Hahne, Anja/Friederici, Angela D. (2005) Prosody-driven Sentence Processing: An Event-related Brain Potential Study. In: Journal of Cognitive Neuroscience 17, 3. 407 - 421.

- Patel, Aniruddh D./Gibson, Edward/Ratner, Jennifer/Besson, Mireille/Holcomb, Phillip J. (1998) Processing Syntactic Relations in Language and Music: An Event-Related Potential Study. In: Journal of Cognitive Neuroscience 10, 6. 717 - 733.
- Picton T. W./Bentin S./Berg P./Donchin, E./Hillyard, S. A./Johnson Jr., J./Miller, G. A./Ritter, W./Ruchkin, D. S./Rugg, M. D./Taylor, M. J. (2000) Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria. In: Psychophysiology 37, 2. 127 - 152.
- Proverbio, Alice Mado/Riva, Federica (2009) RP and N400 ERP components reflect semantic violations in visual processing of human actions. In: Neuroscience Letters, 459. 142 - 146.
- Rayner, Keith (1998) Eye Movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research. In: Psychological Bulletin 124, 3. 372 - 422.
- Rechner Online. <https://rechneronline.de/sehwinkel/> [07.07.2020]
- Rivera, Javier/Talone, Andrew B./Boesser, Claas Tido/ Jentsch Florian/Yeh, Michelle (2014) Startle and Surprise on the Flight Deck: Similarities, Differences, and Prevalence. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 58, 1. 1047 - 51.
- Steffensen, Scott C./Ohran, Allison J./Shipp, Daniel N./Hales, Kimberley/Stobbs, Sarah H./Fleming, Donovan E. (2008) Gender-selective effects of the P300 and N400 components of the visual evoked potential. In: Vision Research 48, 7. 917 - 925.
- Steinhauer, Karsten/Alter, Kai/Friederici, Angela D. (1999) Brain potentials indicate immediate use of prosodic cues in natural speech processing. In: nature neuroscience 2, 2. 191 - 196.
- Steinhauer, Karsten/Friederici, Angela D. (2001) Prosodic Boundaries, Comma Rules, and Brain Responses: The Closure Positive Shift in ERPs as a Universal Marker for Prosodic Phrasing in Listeners and Readers. In: Journal of Psycholinguistic Research 30, 3. 267 - 295.
- Trier, Jost (1973) Über Wort- und Begriffsfelder. In: Antony van der Lee, Oskar Reichmann (Eds.) Aufsätze und Vorträge zur Wortfeldtheorie. Berlin, Boston: De Gruyter. 40 - 65.
- Van Petten, Cyma/Kutas, Marta (1990) Interactions between sentence context and word frequency in event-related brain potentials. In: Memory & Cognition 18, 4. 380 - 393.

- Van Petten, Cyma/Luka, Barbara J. (2012) Prediction during Language Comprehension: Benefits, Costs, and ERP Components. In: International Journal of Psychophysiology 83, 2. 176 - 190.
- Weiergräber, Marco/Papazoglou, Anna/Broich, Karl/Müller, Ralf (2016) Sampling rate, signal bandwidth and related pitfalls in EEG analysis. In: Journal of Neuroscience Methods 268. 53 - 55.
- West, W. Caroline/Holcomb, Phillip J. (2002) Event-related potentials during discourse-level semantic integration of complex pictures. In: Cognitive Brain Research 13. 363 - 375.
- White, Katherine R./Crites Jr. Stephen L./Taylor, Jennifer H./Corral, Guadalupe (2009) Wait, what? Assessing stereotype incongruities using the N400 ERP component. In: Scan 4. 191 - 198.
- Zimmermann, Urs (2014) Definition: Sakkaden. In: Eye Tracking Lexikon. Eye Tracking Kompetenzzentrum. <https://eyetracking.ch/glossar-sakkade/> [23.01.2020]

IV. Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Stimulus-Set final	xii
Anhang 2: Häufigkeitsklassen	xxi
Anhang 3: Vorlage der Aufklärung für die Teilnehmer an der Studie CC-001	xxii
Anhang 4: Vorlage der Einverständniserklärung zur Studienteilnahme	xxv
Anhang 5: Vorlage des Fragebogens für Studienteilnehmer	xxviii

Anhang 1: Stimulus-Set final

Kondition A: Kongruenz

	HK
1 Die Freunde schreiben den Termin in ihre Kalender.	12
2 Der Chef schickt den kranken Mitarbeiter nach Hause.	8
3 Der Hirtenhund treibt die Schafe auf die Wiese.	11
4 Die hungrigen Badegäste essen leckere Pommes im Freibad.	12
5 Die Kinder basteln sich Masken für den Karneval.	12
6 Die Sekretärin bringt die Dokumente zurück zum Regal.	13
7 Der Vater baut einen großen Teich im Garten.	9
8 Die Hexe schiebt die Geschwister in den Ofen.	12
9 Die Freunde fahren Tretboot auf dem großen See.	9
10 Der Mann beschenkt seine Ehefrau mit einem Blumenstrauß.	14
11 Der Tourist schickt die Postkarte zur falschen Adresse.	10
12 Der Rechtsmediziner schickt die Proben in das Labor.	12
13 Der Polizist untersucht den Tatort auf frische Fingerabdrücke.	14
14 Der Pizzabäcker legt die Pizza in einen Pappkarton.	16
15 Der Arzt trägt einen weißen Kittel im Krankenhaus.	9
16 Der Audi baut einen Unfall auf der Autobahn.	10
17 Der Vogel trägt den Zweig zu seinem Nest.	13
18 Der Friseur hängt seine Urkunde an die Wand.	10
19 Das junge Mädchen sucht schöne Muscheln am Strand.	11
20 Der Junge baut eine Sandburg mit seiner Schaufel.	14
21 Der Student sucht interessante Bücher in der Bibliothek.	11
22 Der Vater bestellt einen Eisbecher in der Eisdiele.	15
23 Der Franzose schmiert sich Käse auf das Baguette.	16
24 Die Rakete bringt den Roboter in den Weltraum.	13
25 Der Osterhase bemalt die Eier mit einem Pinsel.	13
26 Der Bürgermeister hält seine aktuelle Rede im Rathaus.	9
27 Der Gärtner pflanzt bunte Blumen in das Beet.	15
28 Der Junge isst Pommes mit Ketschup und Mayo.	15
29 Der Polizist befragt den Verdächtigen auf dem Revier.	12
30 Der Hund bringt die Zeitung zu seinem Herrchen.	14
31 Das Kind trifft seine Freunde auf dem Spielplatz.	11
32 Der Reiter führt das Pferd in seine Box.	12
33 Die Frau schneidet das Brot in schmale Scheiben.	12
34 Der Mann schreibt einen Brief an seine Mutter.	8

35	Das Mädchen spannt ein Blatt in die Schreibmaschine.	14
36	Die Krankenschwester verteilt die Medikamente an die Patienten.	9
37	Der Richter verurteilt den Angeklagten zu einer Haftstrafe.	12
38	Die Mutter bringt ihre Tochter in die Kita.	11
39	Die Schriftstellerin signiert morgen Bücher in der Buchhandlung.	12
40	Der Großvater legt das Kissen auf seinen Sessel.	13
41	Die talentierte Musikerin spielt Klavier auf der Bühne.	8
42	Der Schauspieler spielt seine Rolle vor der Kamera.	10
43	Der Maler taucht den Pinsel in die Farbe.	10
44	Der Junge hat Streit mit seinem großen Bruder.	9
45	Sie putzt sich die Nase mit einem Taschentuch.	15
46	Die Frau erwartet den Zug auf dem Bahnsteig.	13
47	Die Familie macht Urlaub in den großen Ferien.	10
48	Die Studenten erhalten das Ergebnis von ihrer Prüfung.	10
49	Der Junge wirft den Ball in das Tor.	8
50	Die Küchenhilfe schrubbt den Herd in der Küche.	10
51	Die Wissenschaftlerin sucht Teilnehmer für ihre neue Studie.	9
52	Der Journalist befragt den Vorstand auf der Pressekonferenz.	11
53	Die Schüler spielen ein Kartenspiel auf dem Pausenhof.	15
54	Das Kamel trägt schwere Waren durch die Wüste.	11
55	Mein Bruder legt das Manuskript in die Schublade.	13
56	Die Kinder bemalen die Straße mit bunter Kreide.	14
57	Das Management verkündet die Schließung von der Fabrik.	11
58	Sie taucht den dreckigen Lappen in einen Eimer.	13
59	Die Kunden erledigen ihre Einkäufe in dem Supermarkt.	12
60	Der Patient erzählt seinem Therapeuten von seinen Problemen.	10
61	Die Kühe fressen das Gras von der Weide.	13
62	Die Jugendlichen rufen den Notruf mit ihrem Handy.	10
63	Das Mädchen packt ihren Koffer für die Reise.	9
64	Die meisten Studenten nehmen die Bahn zur Universität.	8
65	Der Verkäufer legt das Geld in die Kasse.	10
66	Der Gast hängt seine Jacke an die Garderobe.	13
67	Der Pilot landet das Flugzeug auf dem Flughafen.	9
68	Die Tennisspielerin schlägt den Ball über das Netz.	9
69	Die Floristin nimmt den Blumenstrauß aus der Vase.	15
70	Die Großeltern spielen oft Brettspiele mit ihren Enkeln.	14
71	Die Gastgeberin füllt das Wasser in das Glas.	10

72	Die Arzthelferin bittet den Patienten in das Wartezimmer.	15
73	Das Ehepaar sieht den neuen Film im Kino.	10
74	Die Mutter füllt kochendes Wasser in die Teekanne.	17
75	Der Schüler führt die Oma über die Straße.	7
76	Der Kunde bezahlt das Essen mit einem Gutschein.	13
77	Der Zauberer zieht ein Kaninchen aus dem Hut.	11
78	Der Boxer schlägt seine Faust gegen den Sandsack.	17
79	Der Vater nimmt seinen Sohn mit zur Arbeit.	7
80	Der Landwirt erntet viel Getreide auf dem Feld.	9
81	Der Ritter rettet die Prinzessin vor dem Drachen.	13
82	Der Wanderer erklimmt den Gipfel auf dem Berg.	9
83	Die Piraten suchen den Schatz auf der Insel.	9
84	Der Sekretär befüllt den Drucker mit weißem Papier.	10
85	Der Designer trägt einen Schal um den Hals.	11
86	Die Bauarbeiter renovieren die Mensa auf dem Campus.	12
87	Die Nachbarn verstecken ihren Schlüssel unter dem Blumentopf.	15
88	Die Handwerker machen ihre Mittagspause auf der Baustelle.	11
89	Die Schulkasse besucht die Ausstellung in dem Museum.	9
90	Der Nachbar holt die Briefe aus dem Postkasten.	17
91	Der Verkäufer räumt das Spielzeug in die Verpackung.	13
92	Die Menschen sehen Romeo und Julia im Opernhaus.	13
93	Die Freunde feiern den Geburtstag in einem Imbiss.	13
94	Der Chef behandelt seine Angestellten mit viel Respekt	10
95	Sie trinkt ihren grünen Smoothie aus einem Becher.	13
96	Die Schüler spielen Blinde Kuh auf dem Schulhof.	13
97	Mein Vater tankt immer Benzin an der Tankstelle.	12
98	Sie kauft Obst und Gemüse auf dem Markt.	8
99	Der spanische König hat eine Audienz beim Papst.	10
100	Der Engländer trinkt Tee mit Milch und Zucker.	11

Kondition B: Moderate Inkongruenz

		HK
1	Die Eltern legen die Geschenke unter den Adventskranz.	16
2	Er steckt ihr den Ring an den Zeh.	14
3	Sie hängt die neuen Gardinen vor die Tür.	9
4	Der Wolf steckt die Nase in die Zeitung.	8
5	Der Arzt trägt das Stethoskop um seinen Arm.	10
6	Sie hängt die goldene Kugel an den Ahorn.	15
7	Die Schüler stecken ihre Bücher in ihre Koffer.	12
8	Die Mutter stellt die Bücher zurück ins Badezimmer.	13
9	Der Koch streut etwas Salz auf das Tier.	10
10	Die Frau wäscht das Baby in der Toilette.	12
11	Die Mutter stellt den Braten auf den Schreibtisch.	12
12	Der lustige Clown bringt das Publikum zum Weinen.	12
13	Das Mädchen kämmt ihre Haare mit einer Gabel.	14
14	Der Weihnachtsmann bringt die Geschenke durch den Keller.	9
15	Der Sanitäter legt die Bandage auf die Tasse.	13
16	Die alte Frau strickt einen Schal im Tresor.	13
17	Der Großvater steckt die Postkarte in den Lastwagen.	11
18	Der Mann steckt den Schlüssel in das Baugerüst.	16
19	Die Kellnerin gießt den Wein in diese Beete.	15
20	Die Familie schläft im Urlaub in einem Müllcontainer.	15
21	Der Gärtner gießt die Blumen mit dem Stiefel.	13
22	Der Mann isst seinen Salat mit einem Löffel.	14
23	Der berühmte Regisseur besucht seine Kinder im Zoo.	11
24	Die Rentiere ziehen den Schlitten durch das Wasser.	8
25	Der Opa nimmt seine Arznei aus dem Pantoffel.	18
26	Der Chirurg wäscht seine Hände in der Pfütze.	15
27	Der Reisende sammelt essbare Pilze auf der Deponie.	13
28	Die Frau trinkt ihr Wasser aus einem Schuh.	12
29	Die Oma trägt die Brille auf ihrem Mund.	10
30	Sie räumt die sauberen Kleider in den Kühlschrank.	12
31	Die intelligente Studentin verstaut ihre Hausarbeit im Kamin.	13
32	Die Räuber überfallen die Bank mit einer Wasserpistole.	18
33	Der Künstler malt ein Bild auf dem Fahrrad.	11
34	Der Handwerker verlegt graue Fliesen an der Decke.	11
35	Er putzt sich die Zähne mit der Schuhcreme.	18

36	Das Postamt verschickt den Brief mit einer Eule.	14
37	Balu der Bär erzieht Mogli in der Antarktis.	13
38	Der Polizist sperrt den Verbrecher in die Badewanne.	13
39	Der Trainer motiviert die Spieler mit einer Pizza.	13
40	Der Prinz weckt die Prinzessin mit einem Knall.	13
41	Der Postbote hinterlegt das Paket auf dem Dach.	10
42	Die Frau schält die Kartoffeln mit einem Brotmesser.	18
43	Der Regisseur zeigt seinen neuen Film im Stadion.	10
44	Der Mann zeichnet einen Baum auf die Tischdecke.	17
45	Der Junge besucht seine Tante in der Arktis.	14
46	Die Frau lädt den Einkauf in den Müllsack.	16
47	Der Präsident empfängt die Minister in seiner Garage.	12
48	Das Mädchen klaut die Schminke von der Königin.	11
49	Die Kinder hängen die Dekoration an die Möbel.	11
50	Die Feuerwehr löscht den Brand mit einem Gartenschlauch.	17
51	Der Pilot landet das Flugzeug auf dem Platz.	7
52	Der Meteorit hinterlässt einen Krater auf dem Bürgersteig.	14
53	Der Zimmermann hämmert den Nagel in den Reifen.	11
54	Der Chemiker mischt die Säuren in einem Bierglas.	16
55	Der Architekt besucht die Baustelle mit seinen Hamstern.	17/16
56	Der Polizist verhaftet den Dieb mit einem Kabelbinder.	18
57	Die berühmten Forscher untersuchen den Ursprung der Bahn.	9
58	Obelix der Gallier jagt Wildschweine im tiefen Dschungel.	13
59	Die Diebe stehlen das Geld aus dem Gefrierschrank.	17
60	Der Polizist regelt den Verkehr mit einer Trompete.	13
61	Der Vogel baut sein Nest in der Höhle.	13
62	Die Mutter trinkt kalte Milch aus ihrem Napf.	17
63	Die Hebamme legt das Baby in die Dusche.	13
64	Der Junge schießt den Ball in das Radio.	10
65	Der Läufer läuft den Marathon mit neuen Haaren.	12
66	Die Prinzessin nimmt den Apfel von der Verkäuferin.	13
67	Hermes der Götterbote hat Federn an seinen Schultern.	11
68	Knecht Ruprecht verteilt Kohle an alle bösen Tiere.	9
69	Die Großeltern machen einen Spaziergang um den Baum.	10
70	Der Fuchs stiehlt die Gans aus dem Baumarkt.	14
71	Der Papst predigt Frieden vor den gläubigen Muslimen.	13
72	Der Händler verpackt das zerbrechliche Porzellan in Geschenkpapier.	17

73	Der Arzt untersucht den Patienten in seinem Wohnmobil.	14
74	Der Fischer fängt frische Fische mit seinen Händen.	10
75	Der Mann legt ein Steak auf den Boden.	8
76	Der Bodybuilder trainiert seine Muskeln in der Sauna.	13
77	Das Huhn legt ein Ei in das Paket.	12
78	Der Mann trocknet seine Hände mit einem T-Shirt.	12
79	Der Personaler beurteilt die Bewerber nach ihrer Haarfarbe.	16
80	Die Bürger feiern die Unabhängigkeit mit einer Orgie.	16
81	Die Frau verlässt das Haus mit einem Wecker.	13
82	Der Mann trägt eine Schwimmweste in der Savanne.	16
83	Der Kunde bezahlt das Smartphone mit einer Niere.	14
84	Die Oma gießt den Kaffee in den Beton.	12
85	Der Konditor streut die Nüsse auf den Staub.	11
86	Der Student schüttet das Müsli in die Folie.	13
87	Die Frau pflanzt duftende Kräuter in das Teelicht.	18
88	Der Mann parkt sein Auto in einem Fluss.	11
89	Der Rodler lenkt seinen Schlitten über die Landstraße.	12
90	Der Techniker repariert den Fernseher mit einem Pflaster.	13
91	Der Schauspieler feiert seinen Durchbruch mit einer Limonade.	15
92	Gretel schiebt die böse Hexe in die Spülmaschine.	16
93	Der Mechaniker repariert das Auto in seiner Abstellkammer.	17
94	Der Bauarbeiter baut ein stabiles Haus aus Lebkuchen.	14
95	Der Turner macht einen Spagat auf dem Mond.	11
96	Die Königin führt eine Diskussion mit dem Toaster.	16
97	Der Polsterer bezieht das Sofa mit neuen Tischdecken.	16
98	Der alte Druide schneidet Disteln mit seiner Kettensäge.	15
99	Der Journalist fotografiert das Ehepaar nach der Scheidung.	12
100	Der Mechaniker repariert das Auto mit den Füßen.	11

Kondition C: Starke Inkongruenz

		HK
1	Der Schüler schreibt den Satz auf den Dachboden.	14
2	Der Tourist packt die Unterwäsche in den Hafen.	10
3	Der Reiseleiter führt die Wanderer auf die Ordner.	13
4	Der Freund schleppt die Kisten in den Umschlag.	14
5	Ich trinke meinen Kaffee mit Milch und Hund.	10
6	Die Frau liest das spannende Buch am Mädchen.	8
7	Das Kind wirft den roten Ball zur Wahrheit.	9
8	Der Junge führt seinen Freund durch seine Sahne.	13
9	Die Hausfrau hängt die Wäsche auf die Sonne.	9
10	Die Gärtnerin gießt die Blumen in ihrem Esel.	13
11	Der Bruder bringt die Schwester zu ihrem Buchstaben.	12
12	Die Bahn fährt die Passagiere in die Mütze.	13
13	Der Vater reitet spät durch Nacht und Pommes.	13
14	Der Junge führt das Pferd in den Teppich.	12
15	Der Fensterputzer wirft den Lappen in den Ball.	9
16	Die Musikerin spielt Gitarre auf einer großen Herde.	13
17	Die Mutter bringt die Töchter in die Wunde.	13
18	Die Bauersfrau pflanzt die Gurken in die Bäume.	10
19	Der Detektiv lockt den Dieb in die Spüle.	16
20	Der Klempner schüttet das Schmutzwasser in den Zettel.	12
21	Der Chefkoch tut die Nudeln in die Klippen.	14
22	Die Lehrerin schreibt die Formel an die Katze.	11
23	Der Fußballer schießt das Tor in letzter Pfanne.	13
24	Der Manager verschickt eine Mail an seine Flasche.	11
25	Die Familie macht viele günstige Schnäppchen im Friedhof.	10
26	De Frau schminkt ihre Lippen mit einem Hai.	14
27	Der Schüler steckt den Kuli in das Messer.	11
28	Der Student stapelt seine Ordner auf den Urlaub.	10
29	Das Mädchen versteckt das Geschenk in dem Lehrer.	9
30	Der Weihnachtsmann legt die Geschenke unter den Parkplatz.	10
31	Der Bierbrauer füllt das Bier in diese Schule.	8
32	Der Busfahrer lenkt den Bus in die Schale.	13
33	Der Jagdhund führt die Jäger in den Tisch.	9
34	Der Aufseher sperrt die Verurteilten in die Schüssel.	11
35	Der Enkel räumt das Besteck in die Ader.	14

36	Der Gastgeber bittet die Gäste auf die Brötchen.	12
37	Der Bauer treibt die Kühe in den Schrank.	13
38	Der Mann bestreicht das warme Brot mit Socken.	13
39	Der Motorradfahrer stellt das Motorrad in den Abfluss.	15
40	Der Fahrer parkt das Auto auf dem Käse.	12
41	Die Schülerin macht ihre Hausaufgaben mit ihrer Wohnung.	9
42	Die Großmutter verziert den Kuchen mit geschlagener Bluse.	14
43	Der Taxifahrer stellt das Auto in die Mappe.	15
44	Die Putzfrau verlegt das Besteck in die Birne.	15
45	Der Elektriker schraubt die Steckdose an die Versammlung.	10
46	Die Erzieherin wirft die Windel in den Stift.	12
47	Der Richter verurteilt den Verbrecher zu einer Mikrowelle.	15
48	Der Schwimmer springt vom Sprungturm in das Bein.	11
49	Die Fahrgäste besteigen den Zug an der Bushaltestelle.	13
50	Der Bäcker schiebt die Brötchen in den Wasserkocher.	17
51	Die Kinder lesen den Text mit dem Taschenrechner.	15
52	Rudolph leitet den Schlitten mit seiner roten Stirn.	12
53	Der Praktikant kocht frischen Kaffee in einem Blech.	13
54	Der Kassierer überweist den Betrag auf die Banane.	14
55	Der Barista kocht guten Kaffee mit einer Schuhsohle.	18
56	Der Jäger erschießt das Wild mit seinem Degen.	13
57	Der Henker köpft den Verurteilten mit einer Feder.	12
58	Der Schachspieler setzt den Turm auf das Rad.	11
59	Die Bibliothekarin verstaut das wertvolle Buch im Kabel.	12
60	Der Arbeiter lädt die Waren auf den Lichtschalter.	16
61	Der Autor schreibt ein Buch an seinem Rücken.	9
62	Der Cowboy betritt den Saloon durch die Maus.	12
63	Der Tiger jagt die Affen durch den Haken.	14
64	Der Maler streicht die Wand mit bunter Wolle.	8
65	Die Ärzte legen die Kranken auf die Geschäfte.	10
66	Der Barkeeper füllt den Cocktail in das Heft.	11
67	Die Kellnerin serviert den Tee in einer Pfote.	17
68	Die Dolmetscherin übersetzt die Rede in der Zigarette.	12
69	Der Bauer holt frische Milch von der Lasagne.	16
70	Der Fischer hat einen großen Fang am Spiel.	7
71	Der Notarzt verbindet die Wunde mit einer Tube.	15
72	Der Obdachlose legt seine Matratze auf die Wolke.	13

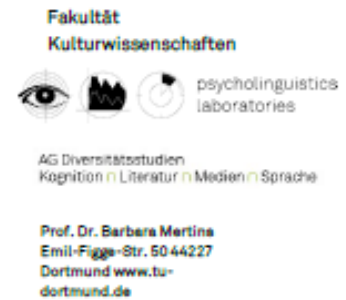
73	Der Mann backt leckere Kekse aus gemahlenen Felsen.	12
74	Das Mädchen bastelt ein Geschenk für ihre Seife.	14
75	Die Mutter holt einen Kuchen aus dem Zaun.	12
76	Der Diener hängt das Kleid in den Rauchmelder.	15
77	Die Tochter klebt die Fotos in das Raubtier.	15
78	Der Wärter sperrt die Löwen in das Netzwerk.	11
79	Der Pförtner führt die Besucher in das Hemd.	12
80	Der Kellner serviert den Nachtisch nach dem Sommer.	7
81	Die Mutter bringt die Kinder morgens zur Sehnsucht.	11
82	Der Handwerker schlägt den Nagel in die Erkältung.	14
83	Der Krankenpfleger spritzt den Impfstoff in die Schraube.	14
84	Der Kunde packt die Einkäufe in den Fingernagel.	17
85	Der Beamte heftet die Unterlagen in die Krankheit.	10
86	Die Putzkraft fegt die Krümel in die Körner.	13
87	Der Mann öffnet die Sektflasche mit einem Tropfen.	12
88	Der Nachbar schiebt den Korb in den Pfosten.	12
89	Die Reporterin speichert den Artikel auf ihrem Gewürz.	16
90	Der Schüler liest den Text in dem Zahn.	12
91	Der Babysitter wirft den Müll in den Clown.	13
92	Der Maler hängt das Bild an die Polizei.	7
93	Der Sohn schmiert die Marmelade auf das Virus.	12
94	Der Mann formt eine Vase mit der Leine.	13
95	Der Dieb nimmt den Schmuck aus der Welle.	11
96	Der Sportler bekommt den Pokal von einem Viereck.	14
97	Die Frau trinkt ihr Wasser aus einem Scharnier.	16
98	Der Astronaut untersucht die Steine aus der Hölle.	12
99	Die Näherin flickt das Loch in der Leiter.	8
100	Der Pinguin verspeist den Fisch auf der Krone.	11

Anhang 2: Häufigkeitsklassen

Deutscher Referenzkorpus der geschriebenen Sprache,
Institut für Deutsche Sprache, Mannheim

Häufigkeitsklasse	Min.	Max
0	230.188.366	325.535.509
1	115.094.183	230.188.365
2	57.547.092	115.094.182
3	28.773.546	57.547.091
4	14.386.773	28.773.545
5	7.193.387	14.386.772
6	3.596.694	7.193.386
7	1.798.347	3.596.693
8	899.174	1.798.346
9	449.587	899.173
10	224.794	449.586
11	112.397	224.793
12	56.199	112.396
13	28.100	56.198
14	14.050	28.099
15	7.025	14.049
16	3.513	7.024
17	1.757	3.512
18	879	1.756
19	440	878
20	220	439
21	110	219
22	55	109
23	28	54
24	14	27
25	7	13
26	4	6
27	2	3
28	1	1

Anhang 3: Vorlage der Aufklärung für die Teilnehmer an der Studie CC-001



Aufklärung für die Teilnahme an der Studie CC-001

Liebe Versuchsteilnehmerin¹,

vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben, an unserer Studie teilzunehmen. In Ergänzung zu der Ihnen vorliegenden Einverständniserklärung haben wir nachfolgend einige Hinweise zu unserem Forschungshaben für Sie aufgeführt:

Allgemein

Diese Studie der Technischen Universität (TU) Dortmund verfolgt rein wissenschaftliche Zwecke. Sie ist an der Fakultät für Kulturwissenschaften angesiedelt und wird von Prof. Dr. Barbara Mertins geleitet, die am Institut für deutsche Sprache und Literatur den Lehrstuhl „Empirische und experimentelle Linguistik des Deutschen: Psycholinguistik“ innehat. Sie leitet auch die *psycholinguistics laboratories* der TU Dortmund.

Bei Fragen zur Studie wenden Sie sich unter Angabe des Titels der Studie (s.o.) an: etlabor@post.tu-dortmund.de

Technik

In dieser Studie geht es um die Aufnahme Ihrer Gehirnaktivität beim Lesen von Sätzen. Diese Gehirnaktivität wird mithilfe eines EEG-Geräts aufgezeichnet. Zu diesem Zweck wird Ihnen eine Kappe mit Elektroden auf dem Kopf platziert. Die von diesen Elektroden empfangenen, minimalen Spannungen werden über einen Verstärker an den Computer geschickt, wo das Signal schließlich in Form von Kurven sichtbar wird.

¹ Die ausschließliche Verwendung der weiblichen Form dient der besseren Lesbarkeit und steht innerhalb des gesamten Textes stellvertretend für beide Geschlechter.

Zusätzlich werden Ihre Augenbewegungen während des Lesens aufgezeichnet. Die Aufzeichnung findet mithilfe eines Eye-Trackers statt. Dieser arbeitet mit Infrarot-Sensoren, die unterhalb des Bildschirms angebracht sind. Sowohl beim Eye-Tracking als auch beim EEG handelt es sich um nichtinvasive Forschungsmethoden. Es bestehen dementsprechend keine gesundheitlichen Risiken für Sie.

Ablauf

Eine Mitarbeiterin des Labors wird Sie bei der Studie begleiten und durchgängig mit Ihnen im Laborraum anwesend sein. Sie wird Ihnen den Ablauf des Experiments erklären, das Experiment durchführen und mögliche Fragen beantworten. Bei Problemen ist sie Ihre Ansprechpartnerin. Wenn Sie an der Studie teilnehmen, werden Ihnen einige Fragen zu Ihrer Person gestellt. Vor der Aufnahme wird Ihnen eine EEG-Kappe auf den Kopf gesetzt. An dieser Kappe sind ringförmige Elektroden befestigt, die zu Beginn mit einem Elektrolytgel gefüllt werden. Dies dient der besseren Leitfähigkeit der Elektroden. Eventuell ist es zur Verbesserung der Datenqualität notwendig, Ihre Kopfhaut an einigen Stellen leicht anzurauen. Dies geschieht jedoch äußerst vorsichtig und in ständiger Rücksprache mit Ihnen. Bleiben Sie während der Aufzeichnung mit Ihrer Aufmerksamkeit auf dem Bildschirm. Insgesamt wird die Studie etwa 60 Minuten dauern. Abschließend bitten wir Sie, gemeinsam mit der Aufnahmeleiterin noch einen Fragebogen auszufüllen.

Wenn Sie sich unwohl fühlen oder die Aufnahme für Sie in irgendeiner Weise belastend sein sollte, kann die Studie jederzeit abgebrochen werden. In diesem Fall geben Sie bitte der anwesenden Aufnahmeleiterin Bescheid.

Inhalt

Ihnen wird eine Reihe von Sätzen gezeigt. Die Wörter werden dabei einzeln, also Wort für Wort präsentiert. Ihre Aufgabe wird darin bestehen, diese lediglich still für sich zu lesen.

(weiter auf der Rückseite)

Datenschutz

Die Datenspeicherung erfolgt nach den gesetzlichen Vorgaben und den Ordnungen und Richtlinien des IT & Medien Centrums (ITMC) der TU Dortmund.

Die dauerhafte Speicherung von Daten, die eine Zuordnung von Personen, zugehöriger ID-Nummern oder personalisierten Aufnahmedaten erlauben, erfolgt auf einem Server mit hohem Sicherheitsstandard. Auf diese Daten hat nur ein genau definierter, eingeschränkter Personenkreis Zugriff.

Aus technischen Gründen müssen die Aufnahmedaten zuerst auf lokalen Festplatten oder anderen Speichermedien gespeichert werden. Sie sind dabei nur einem kontrollierten Kreis von Befugten zugänglich, werden vertraulich behandelt und schnellstmöglich auf einen Server mit hohem Sicherheitsstandard übertragen. Anschließend werden die Daten dauerhaft von den lokalen Festplatten bzw. den anderen Speichermedien gelöscht. Mit Ausnahme der in der Einverständniserklärung getroffenen Regelungen zur Datenverwendung durch Dritte sind die Daten nur den an der Studie beteiligten autorisierten Forscherinnen und Technikerinnen zugänglich.

Anhang 4: Vorlage der Einverständniserklärung zur Studienteilnahme

Einverständniserklärung

Datenerhebung und Datennutzung innerhalb der wissenschaftlichen Studie CC-001

Die Richtlinien der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sehen eine Einverständniserklärung von Teilnehmerinnen¹ empirischer Studien vor, in welcher sie sich nachvollziehbar einverstanden erklären, dass Sie freiwillig an der Forschung teilnehmen. Aus diesem Grund bitten wir Sie, der vorliegenden Einverständniserklärung vor Ihrer Studienteilnahme zuzustimmen.

Die schriftliche ‚Aufklärung der Studienteilnehmenden‘ zur genannten Studie habe ich gelesen und verstanden. Eine Kopie der ‚Aufklärung der Studienteilnehmenden‘ und dieser Einverständniserklärung wurden mir ausgehändigt. Außerdem hatte ich ausreichend Gelegenheit, Fragen (z. B. zu Inhalt, Ziel, Verlauf und Risiken) zu stellen. Alle meine Fragen sind zu meiner Zufriedenheit beantwortet worden.

Ich erkläre mich mit der ‚Aufklärung der Studienteilnehmenden‘ einverstanden und fühle mich körperlich in der Lage, an der Studie teilzunehmen. Meine Teilnahme erfolgt freiwillig.

Meine Daten dürfen in verschlüsselter Form (pseudonymisiert = Zuordnung zu meiner Person nur über weitere Hilfsmittel möglich, z.B. Referenzliste) oder anonymisiert für folgende Zwecke verwendet werden:

- Analysen für wissenschaftliche Forschung
- Illustrationen für wissenschaftliche Forschungszwecke sowie wissenschaftliche Konferenzen, Vorlesungen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen
- Illustrationen der wissenschaftlichen Forschungsprojekte der TU-Dortmund
- Arbeitsgrundlage für Projekte mit dem Ziel der wissenschaftlichen Qualifikation (z.B. Bachelor- oder Master-Arbeiten, Promotionen, Habilitationen)
- Arbeitsgrundlage für wissenschaftliche Studien mit allen wissenschaftlich in Betracht kommenden Fragestellungen

¹ Die ausschließliche Verwendung der weiblichen Form dient der besseren Lesbarkeit und steht innerhalb des gesamten Textes stellvertretend für beide Geschlechter.

(weiter auf der Rückseite)

Weitergabe an Dritte

Ich bin mit der Weitergabe meiner Weitergabe an andere wissenschaftlich forschende Institutionen einverstanden.

Die Weitergabe erfolgt ausschliesslich in anonymisierter Form.

Die oben genannten Grenzen meiner Zustimmung gelten auch hier.

Risiken

Durch die Teilnahme an dieser Studie entsteht kein Risiko, das über die Risiken des alltäglichen Lebens hinausgeht.

Information über Studienergebnisse

Ich bin damit einverstanden, dass ich keine individuellen Rückinformationen über die Ergebnisse der Studie erhalte.

Unentgeltlichkeit

Ich bin mir bewusst, keinerlei Ansprüche auf Vergütung, Tantieme oder sonstige Beteiligung an finanziellen Vorteilen und Gewinnen zu haben, die möglicherweise auf der Basis der Forschung mit meinen Daten erlangt werden.

Widerruf der Zustimmung zur Datenverwendung

Ich weiß, dass die Teilnahme jederzeit von beiden Seiten ohne Angabe von Gründen abgebrochen und widerrufen werden kann, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Ich bin mir bewusst, dass im Falle einer anonymisierten Speicherung meiner Daten deren Löschung nicht möglich ist. Schon publizierte Daten können nicht gelöscht werden.

Einwilligungserklärung

Ich erkläre, dass ich mit der im Rahmen der Studie erfolgenden Aufzeichnung, Speicherung und Verarbeitung meiner Daten unter der Verantwortung der oben genannten Institution und unter Einhaltung der oben genannten Bestimmungen einverstanden bin.

Name, Vorname:	Geburtsdatum (TT.MM.JJJJ):
Ort, Datum:	Unterschrift:

Wird von der Versuchsleiterin ausgefüllt:

Mitarbeiterin der Institution

Ich bestätige, die Probandin über Wesen, Bedeutung, Reichweite und Risiken der Studie mündlich aufgeklärt zu haben, sowie die Probandenaufklärung und eine unterzeichnete Kopie der Einwilligungserklärung ausgehändigt zu haben.

Name, Vorname:	Unterschrift:	Ort, Datum:
Studie:	Probandinnen-Nr.:	Uhrzeit:

Anhang 5: Vorlage des Fragebogens für Studienteilnehmer

Wird vom Versuchsleiter ausgefüllt:

Versuchsleiter/-in:

Subject Code:

Datum:

FRAGEBOGEN

Danke, dass Sie sich bereit erklärt haben, an unserer Studie teilzunehmen.

Bitte beantworten Sie alle Fragen in diesem Fragebogen möglichst vollständig und ehrlich.

Ihre Antworten werden streng vertraulich behandelt.

Falls der Platz für die Beantwortung von Fragen nicht reicht:

Bitte Hinweis einfügen u. auf der Blattrückseite unter Angabe der Fragennummer ergänzen.

1. Anfangsbuchstaben Vor- u. Nachname: _____ Alter: _____
Geburtsort: _____ Staatsangehörigkeit: _____
Geschlecht: ☐ weiblich ☐ männlich
Händigkeit: ☐ rechts ☐ links
2. Sind Sie in Ihrem Sehvermögen eingeschränkt?
☐ nein ☐ ja
Wenn ja, wie (Dioptrienzahl, Hornhautverkrümmung, Brillenpass, Angaben Brillenglas)?

3. Tragen Sie heute ☐ Brille ☐ Kontaktlinsen?
4. Wurde Ihr Sehvermögen operativ korrigiert oder ist es in anderer Form eingeschränkt?
☐ nein ☐ ja
Wenn ja, wie (Laser-OP, Kunstlinse, Netzhaut-OP, Sehnerv, Farbschwäche, o.ä.)?

5. Wo sind Sie zur Schule gegangen (alle Schulformen)? Bitte nennen Sie alle Orte.
Schulform: _____ Stadt: _____ Bundesland / Land: _____
Schulform: _____ Stadt: _____ Bundesland / Land: _____
Schulform: _____ Stadt: _____ Bundesland / Land: _____

6. Welchen Grad der Ausbildung haben Sie bisher erreicht?
- Schule
☐ Mittlere Reife ☐ Abitur
- Berufliche Ausbildung
☐ Geselle ☐ Meister _____
- Studium
☐ Bachelor ☐ Master Fachliche Ausrichtung: _____
- Semesterzahl bis zum erreichten Abschluss: _____
7. In welchem Semester studieren Sie gerade? _____
- ☐ Bachelor ☐ Master Fachliche Ausrichtung: _____
- Semesterzahl bis zum voraussichtlichen Abschluss: _____
8. Waren Sie jemals länger als 6 Monate im Ausland? ☐ ja ☐ nein
- Wann? _____ Wie lange? _____ Wo? _____
- Wann? _____ Wie lange? _____ Wo? _____
9. Sprechen Sie andere Sprachen als Deutsch mit folgenden Personen?
- ☐ ja mit meiner Mutter spreche ich _____
- meinem Vater spreche ich _____
- meinem/-er Partner/-in spreche ich _____
- meinen Kindern spreche ich _____
- Freunden spreche ich _____
- Arbeitskollegen spreche ich _____
- ☐ nein
10. Kannten Sie einen oder mehrere der gezeigten Orte (genau diesen Ort)?
- ☐ nein ☐ ja Welche? _____
11. Sind/waren Sie in Ihrem Leben in bestimmten Bereichen besonderen visuellen Reizen ausgesetzt und/oder haben Sie Erfahrungen auf folgenden Gebieten?
- ☐ Architektur
- ☐ Kunst
- ☐ Computerspiele / Gaming
- ☐ 3D-Modeling
- ☐ Sonstige: Welche? _____
- Beschreiben Sie kurz die einschlägigen Tätigkeiten (Zeitraum, Qualität, Quantität):
- _____
- _____
- _____
- _____
- _____

Subject Code:

weiter auf der nächsten Seite

2 von 3

12. Nehmen Sie regelmäßig verschreibungspflichtige Medikamente ein?

☐ nein ☐ ja Welche? _____

Nur wenn Sie bilingual / mehrsprachig aufgewachsen sind:

13. Sind Sie bilingual / mehrsprachig aufgewachsen?

14. Mit welchen Sprachen sind Sie aufgewachsen und in welchem Alter haben Sie begonnen, diese zu lernen?

Sprache: _____ Alter: _____

Sprache: _____ Alter: _____

Sprache: _____ Alter: _____

15. Wer hat mit Ihnen im Vorschulalter welche Sprachen gesprochen?

Mutter: _____

Vater: _____

Geschwister: _____

Großeltern: _____

Kindertagesstätte / -garten / -krippe: _____

Freunde: _____

andere Menschen: _____

16. Wer hat mit Ihnen nach der Einschulung welche Sprachen gesprochen?

Mutter: _____

Vater: _____

Geschwister: _____

Großeltern: _____

Schule / Hort: _____

Freunde: _____

andere Menschen: _____

17. Sind Ihre Eltern bilingual / mehrsprachig und wenn ja, welche Sprachen sprechen sie?

Mutter: ☐ nein ☐ ja _____ Vater: _____

☐ nein ☐ ja _____

18. Haben Sie eine dominante Sprache und wenn ja welche?

VIELEN DANK FÜR IHRE MITHILFE!

Subject Code:

3 von 3