

Aus der Klinik für Neurologie
der Universität zu Lübeck
Direktor: Prof. Dr. Th. F. Münte

Mangelnde Fehlersensitivität als Mechanismus
bei der konstitutionellen Dyslexie
– eine elektrophysiologische Studie

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde
der Universität zu Lübeck

- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von
Katharina Breitkopf
aus Berlin

Lübeck 2016

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Thomas Münte
2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Klaus Junghanns
Tag der mündlichen Prüfung: 29.5.2017
Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 29.5.2017
– Promotionskommission der Sektion Medizin –

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
1.1 Dyslexie	11
1.1.1 Definition und Klassifikation	11
1.1.2 Epidemiologie	11
1.1.3 Ätiologie	12
1.1.4 Diagnostik und Differentialdiagnosen	15
1.1.5 Symptomatik und Verlauf	16
1.1.6 Therapie	18
1.2 Errorful learning (EF) vs. Errorless learning (EL) und Fehlerüberwachung	19
1.3 Elektroenzephalogramm (EEG)	20
1.3.1 Grundlagen	20
1.3.2 Ereigniskorrelierte Potentiale (EKPs)	23
1.3.2.1 Grundlagen	23
1.3.2.2 Error-related negativity (ERN)	26
1.4 Fragestellungen und Hypothesen	29
2 Probanden, Material und Methoden	30
2.1 Votum der Ethikkommission	30
2.2 Studienaufbau	30
2.3 Studienpopulation	34
2.4 Beschreibung der diagnostischen Testverfahren	34
2.4.1 Rechtschreibungstest R-T „Moselfahrt“	34
2.4.2 Intelligenztestung WIE	36
2.5 Beschreibung der EEG-Untersuchung	37
2.5.1 Haubenpositionierung	37
2.5.2 Datenerfassung	40
2.5.3 Ablauf und verwendetes Stimulusmaterial	40
2.5.3.1 Studie 1	41
2.5.3.2 Studie 2	42
2.6 Datenauswertung	43
2.6.1 Auswertung der diagnostischen Tests	43

2.6.2	Auswertung der EEG-Daten	44
2.6.2.1	Studie 1	47
2.6.2.2	Studie 2	49
2.7	Statistische Auswertung	49
2.7.1	Diagnostische Tests	50
2.7.2	Neuropsychologische Daten	50
2.7.3	EEG-Daten	51
3	Ergebnisse	53
3.1	Probandencharakteristika	53
3.1.1	Studie 1	53
3.1.2	Studie 2	54
3.2	Ergebnisse der Diagnostischen Tests	55
3.2.1	Rechtschreibungstest R-T „Moselfahrt“	55
3.2.2	Intelligenztest WIE	56
3.3	Ergebnisse der Verhaltensdaten	56
3.3.1	Reaktionszeiten	56
3.3.2	D-Prime/ Fehlerraten	58
3.4	Ergebnisse der EEG-Daten	61
3.4.1	Studie 1	61
3.4.1.1	Stimulusabhängige Analyse	61
3.4.1.2	Reaktionsbezogene Analyse	67
3.4.2	Studie 2	70
3.4.2.1	Stimulusabhängige Analyse	70
3.4.2.2	Reaktionsbezogenen Analyse	79
4	Diskussion	80
4.1	Diagnostische Daten	81
4.2	Verhaltensdaten	82
4.3	EEG-Daten	83
4.4	Vergleich der Versuchsaufbauten	95
5	Zusammenfassung	97
6	Literaturverzeichnis	99
	Anhang	109
	Danksagungen	133
	Lebenslauf	134
	Publikationen	136

Meiner Großmutter gewidmet.

Vorwort

Der Begriff Lese-Rechtschreibschwäche (LRS) ist in der Literatur mannigfaltig definiert und wird unterschiedlich und uneinheitlich angewandt. In der vorliegenden Arbeit werden folgende Begriffe darunter zusammengefasst und synonym verwendet: Lese-Rechtschreibstörung, Legasthenie und die konstitutionelle (erworbene) Dyslexie.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich ausschließlich auf die konstitutionelle Form der Dyslexie, d.h. die entwicklungsbedingte Lese-Rechtschreibstörung, bei der es zu Schwierigkeiten bzw. Beeinträchtigungen beim Erwerb der Schriftsprache kommt, woraus eine Minderleistung in einem oder mehreren Lernbereichen trotz normalem Intelligenzniveau resultiert. Es liegt hier eine Entwicklungsstörung im Erlernen von Fertigkeiten vor, die hirneifungsgebundenen Lernprozessen unterliegt und der somit keine Phase normaler Entwicklung in dem betroffenen Bereich vorausging. Sie wird unterschieden von der erworbenen Dyslexie, die durch den Verlust einer bereits erworbenen Lesefähigkeit gekennzeichnet ist, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Darüber hinaus ist mit der männlichen Form wie beispielsweise „Proband“, „Versuchsperson“ oder „Dyslektiker“ auch stets das weibliche Pendant gemeint und wird lediglich der Einfachheit halber nicht explizit aufgeführt.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ADHS	Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Syndrom
ANOVA	analysis of variance
CGL	Corpus geniculatum laterale
CR	Correct rejection/ korrekte Zurückweisung
dF	Anzahl der Freiheitsgrade
DYS	Dyslexiproband/ Dyslektiker
EEG	Elektroenzephalogramm
EF	Errorful learning
EKP	Ereigniskorreliertes Potential
EL	Errorless learning
EMG	Elektromyographie
EOG	Elektrookulogramm
EPSP	Exzitatorisches postsynaptisches Potential
ERN	Error-related negativity
ERP	Event-related potential
et al.	und andere
FA	False alarm/ falscher Alarm
HEOG	horizontales Elektrookulogramm
Hit	Treffer
HL	Lübeck
Hz	Hertz
ICA	Independent Component Analysis
ICD-10	„International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems“
IPSP	inhibitorisches postsynaptisches Potential
IQ	Intelligenzquotient
ISI	Interstimulusintervall
kOhm	Kilohm
KON	Kontrollproband
L	Linkshändigkeit
LPC	late positive component, späte Positivierung
LRS	Lese-Rechtschreibschwäche
M	Mittelwert
m	männlich
MD	Magdeburg
µV	Mikrovolt
ms	Millisekunde
Miss	Verpasser
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PR	Prozentrang
PSP	postsynaptisches Potential

R	Rechtshändigkeit
R-T	Rechtschreibungstest
SD	Standardabweichung
s.	Siehe
Std.	Stunde
VEOG	vertikales Elektroofokulogramm
VEP	visuell evoziertes Potential
Vp	Versuchsperson
w	weiblich
WIE	Wechsler-Intelligenztest für Erwachsene
WHO	World health organisation
Z.n.	Zustand nach
ZNS	zentrales Nervensystem

1 Einleitung

Lesen und Schreiben sind ebenso wie Sprechen und Hören Formen menschlicher Kommunikation. Das Beherrschen einer Sprache ist unabdingbare Voraussetzung für die Teilhabe am öffentlichen, kulturellen und zivilisierten Leben. Die Aneignung von mündlicher Sprache muss Kindern nicht gelehrt werden, es handelt sich hierbei um eine sog. „natürliche“ Fähigkeit. Im Gegensatz dazu muss die schriftliche Sprache stets durch irgendeine Form von Unterricht erlernt werden.

Durch Lesen und Schreiben wird die Kommunikation über Raum und Zeit möglich, weil sich Sprache in Form von Schrift archivieren, vervielfältigen, vertreiben und teilen lässt. Es stellt zudem ein zentrales Medium für den Wissenserwerb und die Wissensvermittlung dar. Ohne die Erfindung der Schrift wäre unser heutiger Wissenstand in sämtlichen Bereichen (z.B. in Geschichte, Philosophie, Medizin, Theologie u.v.m.) unvorstellbar. Darüberhinaus kann durch Schrift Kulturgut bewahrt und geteilt sowie geschaffen und verändert werden. Das Beherrschen von gesprochener und geschriebener Sprache ist Voraussetzung für das Erlangen einer schulischen und beruflichen Ausbildung, die wiederum Voraussetzungen für eine berufliche Selbstverwirklichung und persönliche Entfaltung darstellt.

Schwierigkeiten beim Lesen und/oder Rechtschreiben haben daher Einfluss auf fast jeden Bereich in Schule, Ausbildung und Privatleben und beeinträchtigen oftmals eine erfolgreiche Teilnahme in der Gesellschaft. Das Vorurteil, dass Menschen mit einem Lese- und/oder Rechtschreibdefizit „dumm“, „faul“ und/oder allgemein minderbegabt sind, ist leider nach wie vor noch weit verbreitet (Brunswick, 2011). Daher erfahren Menschen, die an einer Dyslexie leiden, oftmals schon früh in ihrer Kindheit Misserfolge und leiden häufig lebenslang unter den negativen Konsequenzen und Erlebnissen (Schlüer und Jokeit, 2007). Dazu gehören u.a. Schul- oder Prüfungsangst, Frustration und Depressionen, ein geringes Selbstwertgefühl, mangelndes Selbstvertrauen und geringe oder fehlende Schulmotivation. Auch noch im späteren Leben sind ihre sozialen Entwicklungschancen und beruflichen Entfaltungsmöglichkeiten oft eingeschränkt. Sie haben ein erhöhtes Risiko für Arbeitslosigkeit und Beschäftigung unterhalb des jeweiligen Bildungsniveaus (Schlüer und Jokeit, 2007). Dies verdeutlicht die große Bedeutung guter Lese- und Rechtschreibfertigkeiten in fast jedem Lebensbereich und beinahe jeder Lebensphase.

Da der Pathomechanismus der LRS-Entstehung als Grundvoraussetzung für die Entwicklung einer Therapie noch nicht hinreichend verstanden ist (von Suchodoletz, 2006), sind die Therapieoptionen bislang begrenzt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es mithilfe ereigniskorrelierter Potentiale zu zeigen, dass Probanden mit einer Dyslexie im Gegensatz zu gesunden Probanden eine verminderte Fehlersensitivität gegenüber orthographischen Fehlern beim Lesen aufweisen. Die mangelnde Fehlerbewusstheit und die damit einhergehende verringerte Fähigkeit korrekte von inkorrekten Schreibweisen zu unterscheiden als Hinweis auf eine verringerte Handlungskontrolle tragen zur Aufrechterhaltung des fehlerhaften Schreibens bei Dyslektikern bei. Unser Ansatz ist unabhängig von der Ätiologie der Dyslexie (es besteht derzeit noch kein wissenschaftlicher Konsens diesbezüglich) valide, denn der Fokus liegt vielmehr auf einem wesentlichen Teil der Symptomatik der Dyslexie, nämlich den Rechtschreibfehlern (die Unfähigkeit eigene Fehler beim Lesen und Rechtschreiben selbst zu erkennen und zu korrigieren trotz korrekter Aussprache).

Als neurales Korrelat der Fehlerdetektion und des Konfliktmonitorings wird die ERN-Komponente in antwortbezogenen ereigniskorrelierten Potentialen bei Dyslektikern und gesunden Kontrollprobanden untersucht und miteinander verglichen. Dabei handelt es sich um eine negative Komponente, die nach einer fehlerhaften Antwortgabe als Zeichen eines Antwortkonfliktes zwischen 2 (oder mehreren) Antwortmöglichkeiten auftritt. Ihre Amplitude variiert in Abhängigkeit von der Ausprägung des Antwortkonfliktes: Sie ist umso größer, je größer der Antwortkonflikt ist. Wir gehen davon aus, dass Dyslektiker eine verminderte Fähigkeit aufweisen korrekt und inkorrekt geschriebenen Wörtern beim Lesen korrekt zu klassifizieren. Folglich erwarten wir bei Dyslektikern aufgrund der mangelnden Fehlerbewusstheit und dem damit einhergehend geringer ausfallenden Antwortkonflikt eine reduzierte ERN-Amplitude im Gegensatz zu gesunden Probanden ohne Dyslexie. Dies zeigt sich in einer reduzierten mediofrontalen Negativierung sowie einer verminderten ERN-Komponente bei Dyslektikern im Vergleich zu gesunden Kontrollprobanden.

1.1 Dyslexie

1.1.1 Definition und Klassifikation

Konstitutionelle Dyslexie, auch angeborene Dyslexie oder Entwicklungsdyslexie genannt, wird nach der Internationalen Klassifikation psychischer Störungen (ICD-10) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) unter „umschriebene Entwicklungsstörungen schulischer Fertigkeiten“ geführt und als F81.0 verschlüsselt: „Es handelt sich um Störungen, bei denen der normale Erwerb von Fertigkeiten von frühen Entwicklungsstadien an beeinträchtigt ist.“ (Dilling et al., 2010). Ursächlich hierfür sind nicht eine unzureichende Beschulung oder ein Mangel an Lerngelegenheiten, eine erworbene Hirnschädigung (z.B. traumatisch bedingt) oder eine Krankheit (z.B. Enzephalitis). „Das Hauptmerkmal dieser Störung ist eine umschriebene und eindeutige Beeinträchtigung in der Entwicklung der Lesefertigkeiten, die nicht allein durch das Entwicklungsalter, durch Visusprobleme oder unangemessene Beschulung erklärbar ist. Das Leseverständnis, die Fähigkeit gelesene Worte wiederzuerkennen, vorzulesen und die Leistungen bei Aufgaben, für welche Lesefähigkeit benötigt wird, können sämtlich betroffen sein. Mit Lesestörungen gehen häufig Rechtschreibstörungen einher.“ (Dilling et al., 2010). Es handelt sich um eine Teilleistungsstörung, d.h. um eine isolierte Schwäche im Bereich Lesen und Schreiben bei ansonsten normalem Leistungsniveau.

Im „Diagnostic and Statistic Manual of Mental Disorders“ DSM-V wird die Dyslexie unter den neurologischen Entwicklungsstörungen aufgeführt und zu den spezifischen Lernstörungen gezählt.

Neben der Dyslexie werden nach der ICD-10 außerdem eine isolierte Rechtschreibstörung (F81.1), eine Rechenstörung (F81.2) und kombinierte Störungen schulischer Fertigkeiten (F81.3) klassifiziert.

1.1.2 Epidemiologie

Die LRS stellt eine häufig auftretende umschriebene Entwicklungsstörung dar. Die Prävalenzraten schwanken je nach zugrunde gelegten Definitionskriterien und diagnostischen Methoden zwischen 5 und 12 % (Katusic et al., 2001). Es handelt sich hierbei um ein weltweit auftretendes Phänomen. Dennoch unterscheiden sich die Prävalenzen in Abhängigkeit von dem phonologischen Umfang und der Komplexität einer Sprache (Grigorenko, 2001). Dies bezieht sich u.a. darauf wie einheitlich die Zuordnung von Buchstaben und Lauten ist. Gemeint ist hiermit die

sog. Übereinstimmung von Graphem (= lautbildende Buchstaben oder Buchstabenkombinationen, Bsp.: Ch-ch: Chor ≠ Milch) und Phonem (= bedeutungsunterscheidender Sprachlaut, Bsp.: /k/-Laut in Christus ≠ Quarantäne). Die Mehrzahl von epidemiologischen Studien konnten zeigen, dass Jungen deutlich häufiger betroffen sind als Mädchen (z.B. Katusic et al., 2001). Es existieren allerdings auch Studien, die keinen signifikanten Unterschied in der Geschlechterverteilung bei der LRS fanden (z.B. Shaywitz et al., 1990).

Der Schweregrad kann interindividuell stark variieren, sich teilweise auch mit zunehmendem Alter verändern. Ein Mangel an Selbstbewusstsein, ein geringes Selbstwertgefühl oder Ängste (z.B. vor dem Scheitern) können eine bereits vorhandene Störung weiter verstärken (The dyslexia handbook 2013).

Grundsätzlich kommt die LRS in allen sozialen Schichten vor, jedoch gehäuft in sozioökonomisch schwachen Bevölkerungsgruppen mit niedrigerem Bildungsstand (Warnke et al., 2004).

1.1.3 Ätiologie

Bei der LRS handelt es sich in Bezug auf ihre Ätiologie und Pathogenese um eine heterogene und komplexe Störung. Dies kommt u.a. durch die Vielfalt der Symptomausprägungen (können in Abhängigkeit von Alter, Entwicklungs- und Bildungsstand sogar innerhalb eines Individuums schwanken), die vorherrschenden Definitionskriterien und angewandten Diagnostikmethoden sowie die Art der Untersuchung zustande. Es existieren viele sehr unterschiedliche Theorien bezüglich der Ätiologie. Trotz intensiver Forschung ist jedoch bislang keine abschließende Klärung gelungen. Vielmehr wird von einer multifaktoriellen Genese, im Sinne einer Polyätiologie ausgegangen. Im Folgenden wird ein Überblick über einige anerkannte Ätiologiemodelle gegeben.

Als Ursachen werden diskutiert:

1. Genetische Disposition
2. Neurobiologische Ursachen
3. Psychosoziale (Umwelt-)faktoren

Genetische Disposition

Für eine genetische Beteiligung bei der Entstehung der LRS sprechen Beobachtungen aus Familienstudien (Schulte-Körne, 2002). Ist ein Kind in der Familie von einer Dyslexie betroffen, so sind zu 34-45% auch Geschwister

und/oder zu 40-46% ein Elternteil betroffen (Grimm, 2011). Das Risiko für ein Kind selbst betroffen zu sein, steigt mit der Anzahl der betroffenen Elternteile (keiner, einer oder beide betroffen; Schulte-Körne et al., 1996).

Ergebnisse molekulargenetischer Untersuchungen konnten relevante Genorte auf den Chromosomen 1, 2, 3, 6, 15, 18 und X finden (Schulte-Körne, 2002). Das HUGO Gene Nomenclature Committee (HGNC) führt mittlerweile neun chromosomale Regionen (DYX1-DYX9), in denen Dispositionsgene für eine LRS vermutet werden.

Trotz großer Fortschritte in der molekulargenetischen Forschung auf dem Gebiet der LRS sind viele Fragen noch offen und bedürfen weiterer Abklärung in zukünftigen Studien.

Neurobiologische Ursachen

Neben genetischen Faktoren wird eine Vielzahl von neurobiologischen Ursachen diskutiert. Im Folgenden werden drei etablierte Theorien kurz vorgestellt.

Phonologische Theorie. Sie besagt, dass Dyslektiker ein Defizit in der phonologischen Bewusstheit aufweisen. Phonologische Bewusstheit bezeichnet die Fähigkeit, einzelne Laute/Phoneme in einer gesprochenen Sprache erkennen, verarbeiten und anschließend in Schriftzeichen/Grapheme transformieren zu können. Sprache befähigt zur Erstellung einer großen Anzahl von Wörtern durch das Kombinieren und Umstellen einer relativ kleinen Anzahl an sog. phonologischen Segmenten. Lesen wiederum entsteht durch das Verbinden von Buchstaben mit ihren entsprechenden Lauten. Diese Verbindung setzt die Erkenntnis voraus, dass alle Wörter in Laute zerlegt werden können und durch deren Zusammensetzung wieder Wörter entstehen. Unterstützt wird diese Hypothese u.a. durch Ergebnisse aus Untersuchungen in denen Dyslektiker bei Aufgaben, die eine phonologische Bewusstheit erfordern (z.B. Bildbenennung), signifikant schlechter abschnitten als gesunde Versuchspersonen (Ramus et al., 2003). Mittels Positronen-Emissions-Tomographie (PET) untersuchten Rumsey und Kollegen die Gehirnaktivität während einer Aufgabe zur Reimerkennung und fanden funktionelle Defizite der linken Hemisphäre in Form einer geringeren Aktivierung über dem linken temporoparietalen Kortex gegenüber Normallesenden (Rumsey et al., 1992).

„*Rapid auditory processing theory*“. Diese Hypothese besagt, dass Dyslektiker eine Störung in der Wahrnehmung und Verarbeitung von akustischen Informationen bzw. bei deren Diskrimination aufweisen (Tallal et al., 1993). Die Fähigkeit Laute akustisch voneinander zu unterscheiden ist beeinträchtigt. Es handelt sich somit um eine Störung der Sprachwahrnehmung, die sekundär durch ein auditives Defizit entsteht (Ramus et al., 2003). Die Sprachwahrnehmung ist eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Schriftspracherwerb.

Elektrophysiologische Studien zeigten u.a. eine schwächere kortikale Aktivierung in Arealen im auditiven Kortex bei Dyslektikern bei der Verarbeitung von zeitlich schnell aufeinander folgenden nichtsprachlichen Informationen. Zudem zeigte die Versuchsgruppe höhere Fehlerquoten bei der Unterscheidung der Stimuli bei Interstimulusintervallen (ISI) < 500 ms (Nagarajan et al., 1999).

Magnozelluläre Theorie. Darüberhinaus werden auch andere Systeme bzw. kognitive Prozesse als ursächlich diskutiert. So z.B. das visuelle magnozelluläre System (Stein und Walsh, 1997).

Es werden zwei Ganglionzelltypen der Retina unterschieden: die magnozellulären (M-)Zellen und die parvozellulären (P-)Zellen. P-Zellen finden sich v.a. im Bereich der Fovea, wohingegen sich M-Zellen vorwiegend peripher befinden. Beide Ganglionzellen ziehen in getrennte Schichten des Corpus geniculatum laterale (CGL), ein Kerngebiet des Metathalamus im Diencephalon. Anschließend projizieren sie in den primär visuellen Kortex im Okzipitallappen. Beide Zellen sind beim Lesevorgang involviert: Die Zellen des magnozellulären Systems vermitteln Bewegungen und sich schnell ändernde, kontrastarme visuelle Stimulationen, die P-Zellen wiederum farblesches Sehen und räumliche Wahrnehmung.

Der Lesevorgang setzt sich zusammen aus kurzzeitigen Fixationen, die jeweils durch Sakkaden (= schnelle Augenbewegungen) getrennt werden. Das parvozelluläre System ist bei der Fixierung und Entschlüsselung der Buchstaben beteiligt und das magnozelluläre System kontrolliert die Blickbewegungen beim Lesen durch die Unterdrückung des parvozellulären Systems. Somit wird eine Überlagerung der visuellen Informationen verhindert. Viele Dyslektiker beklagen, dass sich beim Lesen die Buchstaben und Wörter zu bewegen und miteinander zu verschmelzen scheinen (Stein und Walsh, 1997). Postmortem-Untersuchungen der magnozellulären Schichten des CGL bei Dyslektikern zeigten, dass ihre M-Zellen bis zu 30% kleiner und deutlich ungeordneter sind (Livingstone et al., 1991).

Darüberhinaus wurde bei lebenden Dyslektikern mithilfe eines visuell evozierten Potentials (VEP) eine reduzierte und verspätete Aktivität als Antwort auf eine schnelle Kontrastumkehr schwacher Intensität gefunden (Livingstone et al., 1991). Dennoch wird die Bedeutung eines magnozellulären Defizits für die Dyslexie kontrovers diskutiert (z.B. Skottun, 2000).

Darüberhinaus konnten Stein und Kollegen eine Instabilität der binokulären Fixation bei Kindern mit einer LRS nachweisen. Durch eine Verbesserung dieser besserte sich die Leseleistung der Betroffenen signifikant (Stein et al., 2000).

Psychosoziale (Umwelt-)faktoren

Auch werden immer wieder soziokulturelle Komponenten und Umweltfaktoren als Ursachen für die Entstehung der Dyslexie diskutiert. Untersucht wurden Auswirkungen des sozialen (v.a. familiären) Umfelds auf die Entwicklung einer Dyslexie, denn unterstützt die familiäre Häufung der Dyslexie zwar die Annahme eines genetischen Einflusses auf der einen Seite, auf der anderen Seite sind Familien aber auch teils den gleichen Umweltfaktoren ausgesetzt, die somit ebenso Einfluss haben können.

Zu den untersuchten Umweltfaktoren gehörten u.a. die Ausbildung und Herkunft der Eltern, die emotionale Atmosphäre in der Familie, das Leseverhalten der Familie und Hilfestellungen bei der Bewältigung der Hausarbeiten. Die Familiengröße (d.h. die Anzahl der in einem Haushalt lebenden Kinder) zeigte als einziger Faktor einen signifikanten Einfluss (Stevenson und Fredman, 1990).

1.1.4 Diagnostik und Differentialdiagnosen

Die Diagnose einer konstitutionellen Dyslexie setzt eine umfassende multidisziplinäre Diagnostik voraus. Dazu gehören sowohl internistische als auch neurologische und psychologische Untersuchungen.

Die kürzlich erschienene evidenz- und konsensbasierte Leitlinie (S3) zur Diagnostik und Behandlung von Kindern und Jugendlichen mit Lese- und/oder Rechtschreibstörung empfiehlt: „Das Vorliegen einer Lese-Rechtschreibstörung, isolierten Rechtschreibstörung oder isolierten Lesestörung sollte dann festgestellt werden, wenn die Leseleistung und/oder Rechtschreibleistung deutlich unter dem Niveau liegt, das aufgrund der Altersnorm, oder der Klassennorm oder der Intelligenz zu erwarten ist und die Bewältigung der Alltagsanforderungen

beeinträchtigt oder gefährdet ist. Die Diskrepanz sollte anderthalb Standardabweichungen (1,5 SD) betragen und die Leistung in den einzelnen Lernbereichen sollte mindestens unterhalb des Durchschnittsbereichs (mind. 1 SD Abweichung vom Mittelwert) liegen. Wenn die Lese- und/oder Rechtschreibschwierigkeiten durch die Evidenz aus der klinischen Untersuchung und den Ergebnissen der psychometrischen Verfahren belegt werden, kann ein weniger strenger Grenzwert herangezogen werden (ab 1,0 SD unter dem Durchschnitt der Klassennorm, der Altersnorm oder dem aufgrund der Intelligenz zu erwartenden Leistungsniveau im Lesen und/oder Rechtschreiben). Bei der Diagnostik durch psychometrische Verfahren soll wenn möglich auf schulformspezifische Normen und Klassennormen zurückgegriffen werden.“

Grundsätzlich ist eine Diagnose erst im Schulalter möglich. Bei schwer betroffenen Kindern werden die Probleme beim Lesen und Schreiben bereits in der ersten oder zweiten Grundschulklasse deutlich, bei leichter betroffenen oder besonders intelligenten Kindern möglicherweise erst beim Wechsel auf die Oberschule (Warnke et al., 2003).

Folgende **Differentialdiagnosen** dienen dazu, Lese-Rechtschreibschwierigkeiten, die nicht im Sinne einer LRS definierbar sind, auszuschließen:

- Lese- und Rechtschreibschwierigkeiten aufgrund mangelnder Unterrichtung (Analphabetismus)
- Lese- und Rechtschreibschwierigkeiten aufgrund einer neurologischen Erkrankungen (z.B. Seh-, Hörstörungen oder epileptische Anfallsleiden)
- Lese- und Rechtschreibhemmung aufgrund einer anderen psychischen Störung (z.B. Angststörung oder Depression)
- Verlust einer bereits erworbenen Lese- und Rechtschreibfähigkeit (z.B. durch eine Enzephalitis oder ein Trauma; Warnke et al., 2004)

1.1.5 Symptomatik und Verlauf

Die LRS ist eine klinisch heterogene Störung.

Symptome der **Lesestörung** können sein (Dilling et al., 2010):

- Auslassen, Vertauschen, Ersetzen oder Hinzufügen von Worten, Wortteilen oder einzelnen Buchstaben
- reduzierte Lesegeschwindigkeit

- Schwierigkeiten beim Vorlesen: Startschwierigkeiten, stockend, häufiges Verlieren der Zeile im Text, nicht sinnhaftes Betonen
- Vertauschen von Wörtern im Satz oder Buchstaben in Wörtern
- Unfähigkeit Gelesen wiederzugeben, aus Gelesenem Schlussfolgerungen zu ziehen und/oder Zusammenhänge zu erkennen

Zu den Symptomen der **Rechtschreibstörung** gehören nach ICD-10 (Warnke et al., 2004):

- Verdrehung von Buchstaben, Vertauschung der Buchstabenfolge im Wort
- Auslassung von Buchstaben
- Hinzufügen von Buchstaben
- Dehnungsfehler (z.B. „ihm“ statt „im“)
- Regelfehler: Fehler in der Groß- und Kleinschreibung, Doppelungsfehler (Spinne/Spine), Verwechslung von „ä“ und „e“
- Verwechslung von Lautzeichen: v/f, d/t
- Inkonstanz von richtigem und falschem Schreiben: Dasselbe Wort wird immer wieder unterschiedlich geschrieben

Typischerweise fallen Betroffene zu Beginn der Grundschulzeit auf, wenn Lesen und Schreiben erlernt werden. Kinder, die schnell auswendig lernen können, können in der Lage sein, eine Schwäche im Lesen und/oder Rechtschreiben in den ersten Schuljahren noch zu kompensieren. Sie fallen erst in der dritten Klasse oder noch später als lese-rechtschreibschwach auf, wenn spontane, d.h. ungeübte Schriftsprachleistungen wie Aufsätze gefordert werden (Warnke et al., 2004).

Eine Aussage über die Fehlertypologie ist nicht möglich, da die Fehler inkonstant sind.

Die Beeinträchtigungen beim Lesen und Schreiben können zwar mit fortschreitendem Alter abnehmen, dennoch bleiben Defizite meist bis ins Erwachsenenalter bestehen (Dilling et al., 2010). Verlauf und die klinische Symptomatik sind interindividuell sehr variabel. Eine vollständige Remission ist nicht zu erwarten (Dilling et al., 2010).

Ein gehäuftes Auftreten von Dyslexie mit psychiatrischen **Komorbiditäten** wie internalisierenden und externalisierenden Störungen wurde beschrieben. Weibliche Betroffene litten dabei vermehrt unter Depressionen und männliche

Betroffene unter Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Störung (ADHS) oder aggressivem Verhalten (Willcutt und Pennington, 2000). Hinzu kommt, dass bei Dyslektikern im Laufe der Grundschulzeit vermehrt soziale Anpassungsstörungen auftreten, die sich in Form von stark zurückgezogenem Verhalten und Viktimisierung durch Mitschüler äußern können (Gasteiger-Klicpera et al., 2006).

1.1.6 Therapie

Die Behandlung der Dyslexie ist Gegenstand kontroverser Diskussionen. Da bislang keine eindeutige Ursache geklärt werden konnte und es eine Vielzahl von Hypothesen bezüglich der Ätiologie gibt (s.o.), existieren auch zahlreiche Therapieansätze zur Behandlung der Dyslexie.

Im Folgenden werden daher zur Übersicht die Empfehlungen der kürzlich erschienenen Leitlinie zur „Diagnostik und Behandlung von Kindern und Jugendlichen mit Lese- und/oder Rechtschreibstörung“ zusammengefasst (http://www.kjp.med.uni-muenchen.de/download/leitlinie_lrs_kjp_langfassung.pdf, Datum des letzten Zugriffs: 31.08.2015).

Ziel einer Behandlung der Dyslexie soll die Verbesserung der Lese- und/oder Rechtschreibleistung und somit eine Symptomreduktion sein, sodass eine altersgerechte Teilhabe am öffentlichen Leben möglich ist. Prinzipiell sollen die Fördermaßnahmen bereits im ersten Schuljahr beginnen bzw. unmittelbar nach der Diagnosestellung. Sie sollen von Behandelnden mit angemessener Erfahrung im Bereich der Schriftsprachentwicklung und ihrer Förderung sowie im Umgang mit Kindern und Jugendlichen mit einer LRS durchgeführt werden. Außerdem werden regelmäßige Verlaufskontrollen empfohlen.

Eine von Galuschka und Kollegen durchgeführte Meta-Analyse mit allen verfügbaren randomisiert kontrollierten Studien (Evidenzgrad A) zur Prüfung der Wirksamkeit verschiedener Interventionen zur Verbesserung der Lese-Rechtschreibleistung bei von LRS betroffenen Kindern und Jugendlichen zeigte für nachfolgende symptomorientierte Interventionen einen signifikanten Effekt (Galuschka et al., 2014). Daraus leitete sich folgende Leitlinienempfehlung ab: Interventionsmaßnahmen zur Verbesserung der Leistungen im Bereich Lesen und Schreiben von Kinder und Jugendlichen mit einer Lese- und/oder Rechtschreibstörung sollen Übungen mit folgendem Inhalt enthalten:

- Graphem-Phonem und Phonem-Graphem-Korrespondenz
- Zerlegung einzelner Wörter in ihre Laute und Silben

- Silbenreimen
- Verbinden von Phonemen zu einem Wort
- Anweisungen zum Aufbau orthographischen Regelwissens

Für kausale Interventionen, die an basalen Funktionen angreifen, denen eine ursächliche Beteiligung am Misslingen beim Schriftspracherwerb zugesprochen wird wie beispielsweise auditive oder visuelle Wahrnehmungs- und Verarbeitungstrainings, alternativmedizinische Verfahren (Homöopathie, Osteopathie etc.), medikamentöse Behandlungen (mit Piracetam) oder die Verwendung von farbigen Brillengläsern oder Farbfolien beim Lesen konnte keine Wirksamkeit gezeigt werden (Galuschka et al., 2014).

1.2 Errorful learning (EF) vs. Errorless learning (EL) und Fehlerüberwachung

„Fehler vermeiden oder aus Fehlern lernen?“ (Brügelmann, 1986).

Für den Schriftspracherwerb existiert eine Vielfalt an Methoden für die Schulanfangsphase und bis heute gibt es eine langandauernde Kontroverse über schulische Konzepte zu Beginn des Unterrichts wie Kindern am besten Lesen und Schreiben gelehrt wird (Übersicht z.B. Brügelmann und Brinkmann, 2006). Derzeit erfolgt der Orthographieerwerb nach dem Konzept des „freien Schreibens“ bei dem das Hauptaugenmerk nicht auf dem Schreibprodukt (fehlerfrei oder fehlerhaft), sondern vielmehr auf dem Schreibprozess liegt. Rechtschreibfehler werden, zumindest zu Beginn der Grundschule, nicht sofort korrigiert, sondern durch die Fehler können dienliche Hinweise auf die jeweilige Schreibstrategie des Kindes, die es bereits beherrscht oder welche es als nächstes erlernen könnte, gewonnen werden. Die Fehleranzahl und ihre Qualität geben dabei Hinweise auf den vorherrschenden individuellen Entwicklungsstand (Brügelmann, 1986). Fehler werden dabei als „Fenster auf den Lernprozeß“ angesehen (Nübel, 1998).

Es liegt folglich eine „errorful learning“ (EF) Bedingung vor, welche zu vielen Fehlern und der Aktivierung fehlerhafter Schreibweisen führt. Während der Lernphase wird eine gewisse Anzahl an Fehlern produziert bis letztendlich die korrekte Schreibweise gefunden wird („trial-and-error“). Beim Schreiben ist der Abruf der orthographisch korrekten Schreibweise aus dem Gedächtnis erforderlich, besonders während der Lernphase, wenn das Schreiben noch nicht hoch

automatisiert abläuft. Durch EF Bedingungen treten fehlerhafte und korrekte Informationen in Konflikt miteinander, wenn später versucht wird, die korrekte Schreibweise aus dem Gedächtnis abzurufen (Baddeley und Wilson, 1994). Es kommt zu einer Interferenz von inkorrekt und korrekter Schreibweise, die schlussendlich zu einem Misslingen beim Gedächtnisabruf der korrekten Schreibweise führt. Moscovitch hat 1989 ein Modell veröffentlicht, welches die Prozesse *Gedächtnisabruf* und *Bewertung des Gedächtnisabrufs* voneinander trennt. Bei dem Prozess der Bewertung wird der Gedächtnisabruf auf Fehler untersucht.

Im Gegensatz dazu ist das „errorless learning“ (EL) charakterisiert durch das Verhindern von Fehlern während der Lernphase, d.h. die Lernphase konzentriert sich nur auf die korrekte Schreibweise. Dadurch werden Konflikte unterschiedlicher Schreibweisen im späteren Gedächtnisabruf verhindert, da nur die korrekten Schreibweisen während der Lernphase aktiviert wurden. Terrace konnte in einer tierexperimentellen Arbeit mit Tauben bereits 1969 zeigen, dass die Anzahl von späteren Abruffehlern verringert werden konnte, indem in der Lernphase die Generierung von falschen Antworten verhindert wurde (EL Bedingung; Terrace, 1969). Die Effektivität von EL konnte anschließend auch u.a. in der Therapie von Patienten mit Gedächtnisstörungen gezeigt werden (Metzler-Baddeley und Snowden, 1995).

Als neuronales Korrelat wurde im antwortgemittelten EKP nach einer fehlerhaften Antwort die ERN („error-related negativity“) identifiziert (Gehring et al., 1993; s. Abschnitt 1.3.2.2).

Es liegen keine gesicherten Erkenntnisse bezüglich der Konsequenzen des „freien Schreibens“ auf Kinder mit der Neigung zur Entwicklung einer LRS vor. Aus dem Konzept des EL weiß man allerdings, dass Fehler im Lernprozess zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Fehler in zukünftigen Versuchen dasselbe Wort zu schreiben, führen.

1.3 Elektroenzephalogramm (EEG)

1.3.1 Grundlagen

Das EEG stellt die vom Gehirn generierte elektrische Aktivität dar. Im Jahre 1924 gelang es dem Nervenarzt Hans Berger erstmals elektrische Vorgänge im Gehirn eines Menschen mittels eines Galvanometers und an der Kopfhaut angebrachten

Elektroden zu beobachten (Berger, 1929). In der Forschung und Diagnostik der Neurologie ist es als wichtige, nicht-invasive elektrophysiologische Methode zur Messung und Charakterisierung der Hirnaktivität nicht mehr wegzudenken.

Mithilfe von an der Skalpoberfläche platzierten Elektroden werden Potentialschwankungen der Pyramidenzellen des Kortex gemessen (Birbaumer und Schmidt, 2006). Die Elektroden werden nach dem weltweit gültigen, standardisierten 10-20-System nach Jasper (1958) platziert (Abb. 1), um eine reproduzierbare Aufzeichnung zu erhalten. Dies wird durch eine individuelle Anpassung an Größe und Form des Kopfes durch Orientierung an anatomischen Landmarken und die relativen Abstände der Elektroden in 10% bzw. 20% Schritten auf der Kopfoberfläche erreicht.

Der Aufbau des zerebralen Kortex besteht aus vertikalen und horizontalen Funktionseinheiten, den sog. Kolumnen. In den vertikalen Kolumnen liegen die für das EEG bedeutsamen vertikalen Pyramidenzellen (Wellach, 2011). Allerdings muss zwischen den Potentialquellen (den sog. Potentialgeneratoren) und den Strukturen, die für den Rhythmus sowie das Potentialmuster verantwortlich sind, unterschieden werden. „Die eigentlichen Potentialgeneratoren liegen in der Hirnrinde. (...) Die variablen Potentialmuster sind dagegen das Ergebnis einer Interaktion komplizierter Neuronenstrukturen kortikaler und subkortikaler Bereiche des Hirns.“ (Zschocke, 2002).

Das elektrophysiologische Korrelat des EEG sind synchrone Potentialschwankungen einer großen Anzahl von Pyramidenzellen des Kortex verursacht durch postsynaptische Potentiale (PSP). Die damit verbundenen Ionenströme im Intra- und Extrazellulärraum erzeugen ein sog. Feldpotential. Die Summe der gemessenen Feldpotentiale erzeugt an der Schädeloberfläche das EEG (Pape, 2014). Hierbei spielen v.a. die exzitatorischen postsynaptischen Potentiale (EPSP) eine Rolle (Zschocke, 2002). Die inhibitorischen postsynaptischen Potentiale (IPSP) weisen deutlich kleinere extrazelluläre Ströme auf, wodurch sie nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Frequenzen betragen zwischen 0,1-100 Hz und die Amplituden liegen zwischen 1 und 100 μV (Birbaumer und Schmidt, 2010). Durch die relativ weite Entfernung der Ableitelektrode von den Quellen der EEG-Ströme und die schlechte Leitfähigkeit der dazwischenliegenden Strukturen (wie Schädelknochen und Kopfhaut), sind die registrierten Amplituden 100-1000x kleiner als die an der Zelle auftretenden Potentiale (Birbaumer und Schmidt, 2010).

Es werden zwei Arten von Potentialschwankungen entsprechend ihrer Polarität unterschieden. In der vorliegenden Arbeit gilt folgende Konvention: Positive Potentialschwankungen im EEG werden Ausschläge nach unten genannt und negative Potentialschwankungen im EEG entsprechend aufwärts gerichtete Ausschläge. Positive Potentialschwankungen entstehen durch Aktivierung oberflächennaher inhibitorischer oder tiefer exzitatorischer Synapsen und negative Ausschläge durch Aktivierung oberflächennaher exzitatorischer oder tiefer inhibitorischer Synapsen (Bingmann und Köhling, 2008). Aktionspotentiale tragen nicht oder nur in sehr geringem Maß zum EEG bei, da sie zu ungeordnet ablaufen und zu kurz andauern, sodass sie sich i.d.R. nicht zu messbaren Potentialschwankungen aufsummieren (Birbaumer und Schmidt, 2006).

Es werden folgende Frequenzbereiche im EEG unterschieden: Delta- (0,5-4 Hz) ,Theta- (5-7 Hz), Alpha- (8-13 Hz), Beta- (14-30 Hz) und Gamma-Wellen (31-80 Hz; Khader et al., 2009).

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten der EEG-Ableitung: Bei der bipolaren Ableitung werden Potentialunterschiede zwischen zwei differenten (d.h. messenden) Elektroden registriert. Hierbei werden Potentialdifferenzen zwischen beiden Elektroden und somit der Gradient des Potentialfeldes registriert (Hoppe, 2011). Klinisch wird sie z.B. angewendet, um einen epileptogenen Herd zu identifizieren. Bei der unipolaren Ableitung wird eine differente Elektrode an der Kopfhaut nahe dem Entstehungsort des Signals angebracht und eine gemeinsame indifferente (nicht messende) Elektrode (auch „Referenz-, Bezugs- oder Erdelektrode“ genannt) an einem Punkt des Kopfes entfernt von der Hirnaktivität platziert (z.B. am Ohrläppchen oder Mastoid; Pape, 2014). Liegt die Referenzelektrode außerhalb des Potentialfeldes und ist somit nicht „aktiv“, kann so das Potentialfeld selbst dargestellt werden. Beide Arten der Ableitung sind als gleichwertig zu betrachten mit jeweiligen Vor- und Nachteilen. So ist beispielsweise die fokale Darstellung der Aktivität bei der bipolaren Ableitung genauer, wohingegen die bilaterale Aktivitätsdarstellung bei der referenziellen Ableitung, vorausgesetzt die Referenz ist nicht „aktiv“, präziser ist (Hoppe, 2011). Eine große Stärke des EEG ist seine hohe zeitliche Auflösung, da die informationsverarbeitenden Prozesse im Gehirn innerhalb von Millisekunden ablaufen und dadurch nahezu in Echtzeit beobachtet werden können. Ein Nachteil hingegen stellt die wenig präzise örtliche Auflösung dar. Das liegt u.a. daran, dass sich die elektrischen Spannungsänderungen im Hirngewebe durch die gute

Leitfähigkeit fast ungehindert ausbreiten und somit die Ermittlung eines Ursprungs schwierig ist (Birbaumer und Schmidt, 2006). Dennoch ermöglicht das standardisierte 10-20-System durch seine relativ gleichmäßige, individuelle Elektrodenpositionierung eine gute Korrelation zu darunter liegenden Hirnregionen (Jasper, 1958).

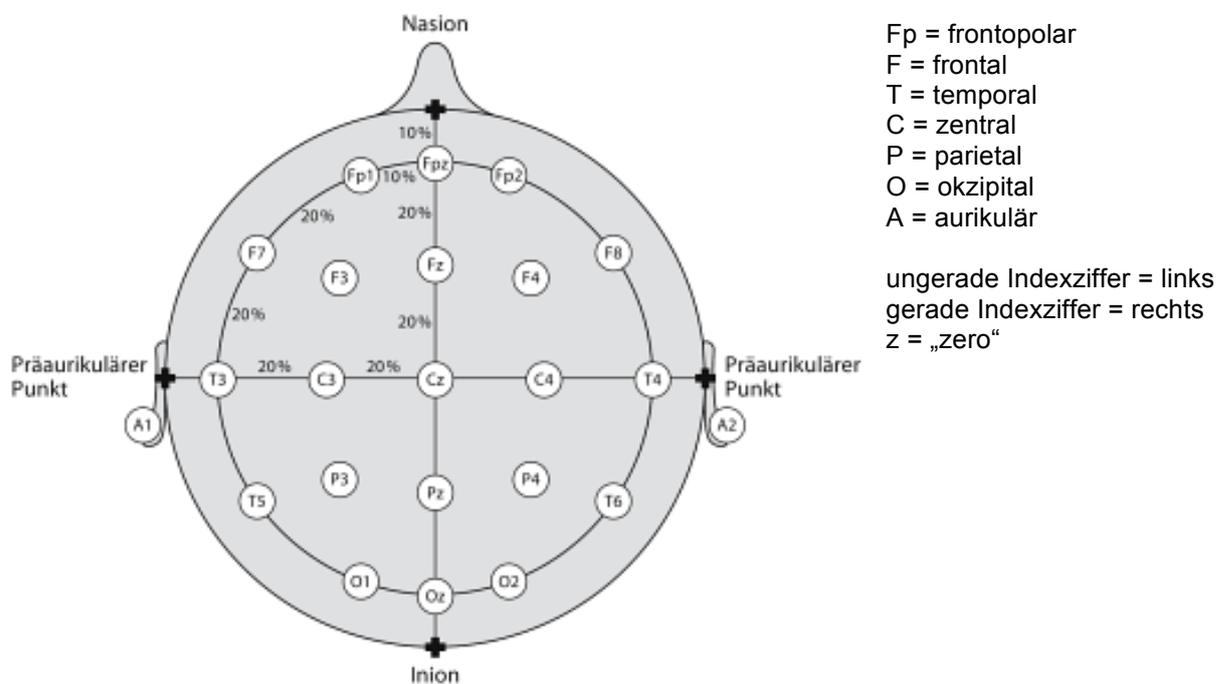


Abb. 1: EEG-Elektrodenpositionen im internationalen 10-20-System nach Jasper (1958) (Wöhrl, 2006).

1.3.2 Ereigniskorrelierte Potentiale (EKPs)

1.3.2.1 Grundlagen

„Unter ereigniskorrelierter Aktivität versteht man hirnelektrische Potentialverschiebungen, die wiederholbar und mit gleicher Charakteristik nach zeitlich exakt definierbaren Ereignissen auftreten, diesen vorausgehen oder solche begleiten. Anfangs- oder Endpunkt eines Ereigniskorrelierten Potentials (EKP, englisch: Event Related Potential, ERP) kann somit durch eine physikalische Zustandsänderung der Umwelt (einen Reiz) oder durch einen motorischen, inklusive sprachlichen Akt des Organismus (eine Reaktion) definiert werden. Man spricht demgemäß auch von reizkorrelierten bzw. reiz-evozierten und reaktionskorrelierten Potentialen.“ (Rösler, 1982).

EKPs weisen meist eine deutlich kleinere Amplitude als die spontan auftretenden Spannungsschwankungen auf, sodass sie in den EEG-Rohdaten meist nicht erkennbar sind (Gerloff, 2005). Sie bewegen sich zwischen 1-30 μV (Birbaumer

und Schmidt, 2010). Das Spontan-EEG mit seinen deutlich größeren Amplituden erzeugt durch Überlagerung der EKP-Signale das sog. „Rauschen“ (Birbaumer und Schmidt, 2010). Um EKP-Daten aus einem EEG zu erhalten, muss daher das Signal-Rausch-Verhältnis gesteigert werden. Dies wird durch Mittelung, auch „averaging“ genannt, erreicht (Gerloff, 2005). Dazu wird nicht nur ein Reiz, sondern eine Vielzahl an Wiederholungen ein und desselben Reizes appliziert und jede Antwort in einem festen Abstand zum Stimulus auftretend aufsummiert. Dabei handelt es sich um eine Summationstechnik von Reizantworten, die in einem gleichbleibenden Abstand zu einem Stimulus auftreten und somit gleichwertige zeitliche Abschnitten im EEG darstellen. Man geht davon aus, dass der zugrunde liegende elektrokortikale Prozess immer gleich bzw. ähnlich aussieht, während die Hintergrundaktivität zufällig verteilt ist. Zufällig variierende Signale (einmal positiv, einmal negativ) bleiben gleich oder werden kleiner durch die Mittelung. Spezifische elektrokortikale Antworten, die mit immer gleicher Gestalt auf den Reiz folgen, werden mit zunehmender Summierung (durch zunehmende Reizanzahl) deutlicher und heben sich hervor (Abb. 2; Birbaumer und Schmidt, 2010).

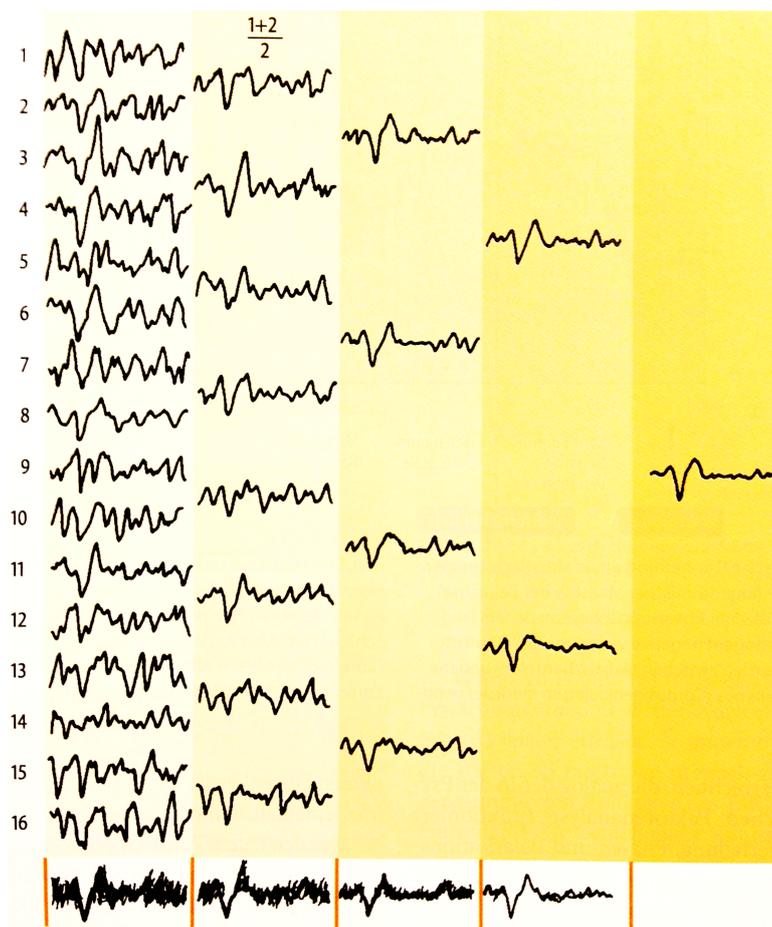


Abb. 2: Darstellung des Mittelungsprozesses zur Rauschunterdrückung (Averaging; Birbaumer und Schmidt, 2010).

Analog zur Polaritätsbezeichnung des EEG werden positive Spannungsausschläge (hier abwärts gerichtet) mit dem Buchstaben „P“ und negative (hier nach oben gerichtet) mit „N“ bezeichnet. Positive Ausschläge sind ebenfalls nach unten und negative Ausschläge aufwärts gerichtet. Im Anschluss wird die mittlere Latenz des Amplitudengipfels, des sog. Peak, hinzugefügt (Khader et al., 2009). Beispielsweise steht die Bezeichnung P300 für einen positiven Peak nach etwa 300 ms nach Beginn eines Reizes. Allerdings ist zu beachten, dass diese Latenzbezeichnung nur sehr grob ist, da die P300 häufig erst deutlich später nach 350-400 ms erscheint (Gerloff, 2005). Bei einer anderen Nomenklatur wird die entsprechende Ordnungszahl hinzugefügt: P1, N1, P2, N2 usw. (Khader et al., 2009). Wiederrum kann dies ebenfalls zu Verwirrungen führen, wenn z.B. kleinere durch größere Ausschläge überlagert werden. In diesen Fällen werden alphabetisch Kleinbuchstaben hinzugefügt: N1a, N1b usw. (Picton et al., 1995).

Charakteristische Spannungsgipfel und -täler werden als sog. Komponenten bezeichnet (Abb 3). Sie sind gekennzeichnet durch ihre Polarität, Latenz und Topographie. Unterschieden werden frühe exogene Komponenten mit einer Latenz von 10-100 ms, die abhängig vom physikalischen Reizcharakter, wie z.B. der Lautstärke eines Tons, sind (Khader et al., 2009). In der Klinik dienen sie der Funktionstestung sensorischer Leitungsbahnen mithilfe von akustisch, visuell oder somatosensorisch evozierten Potentialen und ermöglichen so Rückschlüsse auf deren Funktionstüchtigkeit (Stöhr, 2005). Nach einer Latenz von mehr als 100 ms spricht man von endogenen Komponenten. Diese werden von psychischen Einflüssen, wie z.B. der Aufmerksamkeitsausrichtung oder Erwartungshaltung einer Vp manipuliert und sind relativ unabhängig vom physikalischen Reizcharakter. Sie spiegeln spezifische Prozesse der Informationsverarbeitung wider. Potentialschwankungen in den ersten 10 ms sind auf Hirnstammpotentiale (I-VI) zurückzuführen (Khader et al., 2009).

Zusammenfassend stellt die Verwendung von EKPs eine Methode zur Darstellung kognitiver Prozesse dar.

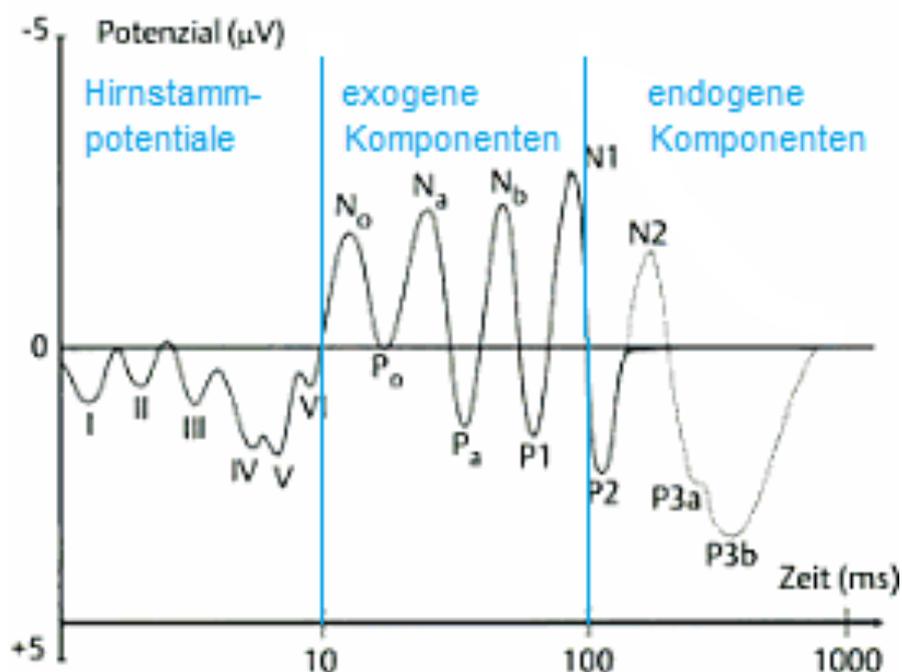


Abb. 3: Auditorisch stimuliertes, ereigniskorreliertes Potential (idealisierte Darstellung). Die Skalierung der Zeitachse ist logarithmisch. Negativierungen werden als Ausschläge nach oben bezeichnet, Positivierungen entsprechend als Ausschläge nach unten.

1.3.2.2 Error-related negativity (ERN)

Auch wenn ein Fehler zu begehen als ein negatives Ereignis angesehen wird, so sind Fehler doch essenziell für unseren Lernprozess und die daraus resultierende Anpassung unseres Verhaltens (Gehring et al., 1993). Um das eigene Verhalten entsprechend adaptieren zu können, ist es notwendig, Handlungen mit dem ursprünglich intendierten Resultat abzugleichen.

Gehring und Kollegen ließen Anfang der 90er Jahre Probanden eine Auswahl Aufgabe unter so großem Zeitdruck bearbeiten, dass es dadurch zu offensichtlichen, ansonsten vermeidbaren Fehlern kam. Beim anschließenden Vergleich der antwortssynchron gemittelten EKPs korrekter und inkorrekt beantworteter Antworten fiel auf, dass die EKPs falscher Antworten durch einen negativen Ausschlag beginnend zum Zeitpunkt der Antwortgabe und einem Peak nach etwa 100 ms charakterisiert war. Dieser Ausschlag war in den Durchläufen in denen die korrekte Antwort gegeben wurde, nicht sichtbar (Abb. 4). Sie nannten diesen Ausschlag „error-related negativity“ (ERN; Gehring et al., 1990). Etwa zeitgleich beschrieben Falkenstein und Kollegen (1990) ebenfalls ein negatives Potential mit frontozentralem Maximum nach Reaktionsfehlern, die unter erhöhtem Zeitdruck entstanden. Sie nannten diese Komponente error negativity (Ne). Heute besteht

Einigkeit darüber, dass beide Bezeichnungen dieselbe Komponente betiteln. Im Folgenden wird die Bezeichnung ERN verwendet.

Die ERN ist eine Komponente des reaktionsbezogenen EKP, die mit einer Latenz von 50-100 ms zu einer fehlerhaften Antwort und einem negativen Ausschlag mit maximaler Ausprägung an frontozentralen Ableitorten charakterisiert ist (Abb. 4; Gehring et al., 1993). Es konnte gezeigt werden, dass auch durch die Beobachtung von fremden Handlungsfehlern eine Aktivierung des eigenen Fehlerüberwachungssystems im Gehirn ausgelöst werden kann (Miltner et al., 2004).

Studien zur Quellenlokalisierung haben einen frontomedianen Ursprung im anterioren cingulären Cortex (ACC) zeigen können (Dehaene et al., 1994). Der ACC ist maßgeblich involviert bei der Handlungsüberwachung und kognitiven Kontrolle (Carter et al., 1998; Botvinick et al., 1999). Zudem wurde eine ERN-Quelle im supplementär-motorischen Areal beschrieben (Luu und Tucker, 2001).

Es existieren unterschiedliche Ansätze bezüglich der funktionalen Interpretation der ERN. Hierzu zählt zum einen die Konfliktüberwachungstheorie (*conflict-monitoring model*), welche besagt, dass eine ERN als Zeichen eines Antwortkonflikts zwischen zwei (oder mehr) Antwortmöglichkeiten auftritt. Die Amplitude der ERN ist umso größer, je größer der Antwortkonflikt ist (Botvinick et al., 2001).

Bekannt geworden ist die ERN als Kennzeichen der Fehlerüberwachung. Falkenstein und Kollegen (1990) stellten die Annahme auf, die ERN trete als Korrelat einer Fehlerdetektion (*error detection model*) auf, wenn es zu einem *mismatch* (Diskrepanz) beim Abgleich der gegebenen mit der geforderten Antwort kommt. Gehring und Kollegen (1990) beobachteten ebenfalls eine ERN nach einer fehlerhaften Antwort, nicht aber nach einer korrekt gegebenen Antwort. Scheffers und Coles (2002) berichteten unterschiedliche ERN-Amplituden in Abhängigkeit von der Selbsteinschätzung des Probanden, ob eine gegebene Antwort korrekt oder inkorrekt war. Die Amplitude war umso größer, je sicherer ein Proband sich war, einen Fehler gemacht zu haben.

Doch auch wenn Fehler nicht bewusst wahrgenommen wurden, zeigte sich eine ERN in den auf die Antwort gemittelten EKPs (Nieuwenhuis et al., 2001).

Holyroyd und Coles (2002) schlugen vor, dass eine ERN generiert wird, wenn ein negatives Lernsignal über das mesenzephalische dopaminerge System zum ACC

gesendet wird und dieses Signal vom ACC genutzt wird, um eine bevorstehenden Leistung zu modifizieren (*reinforcement learning model*).

Eine andere Annahme postuliert, dass die Veränderungen der Aktivität des ACC und damit der ERN-Amplitude am ehesten durch die von dem Probanden wahrgenommene Wahrscheinlichkeit einen Fehler begangen zu haben, erklärt werden kann (*error likelihood model*; Brown und Braver, 2008). Hierbei ist ERN-Amplitude umso größer, je wahrscheinlicher es ist, einen Fehler zu begehen (Hammer et al., 2011).

Die ERN tritt ungeachtet von der Modalität des Stimulus und der Reaktion auf: Sowohl bei visuellen als auch bei auditiven Versuchsaufbauten ist sie beschrieben worden (Hohnsbein et al., 1989), nach Fehlreaktionen mit den Händen, den Füßen (Holroyd et al., 1998) und durch Augenbewegungen (Nieuwenhuis et al., 2001) sowie nach sprachlichen Fehlern (Masaki et al., 2001).

Von einer reduzierten Amplitude der ERN ist berichtet worden, wenn der Wahrnehmungsprozess qualitativ eingeschränkt ist, wie z.B. durch Schlafentzug (Scheffers et al., 1999) und nach Alkoholkonsum (Holroyd und Yeung, 2003).

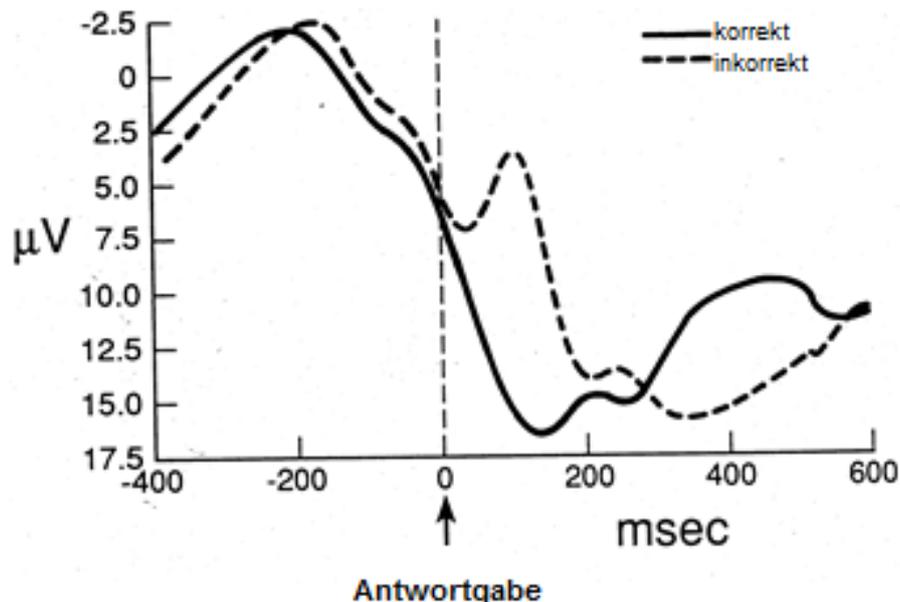


Abb. 4: Gegenüberstellung von antwortkorrelierten EKPs für korrekte und inkorrekte Antworten, abgeleitet über der CZ-Elektrode (modifiziert nach Gehring et al., 1993). Das EKP inkorrekt Antworten ist charakterisiert durch eine zum Zeitpunkt der Antwortgabe beginnende Negativierung (ERN-Komponente) mit einem Peak etwa 100 ms später. In den Durchgängen korrekter Antworten ist diese Negativierung nicht nachweisbar. (Negativierung=aufwärtsgerichteter Ausschlag, Positivierung=abwärts gerichteter Ausschlag).

1.4 Fragestellungen und Hypothesen

Die Grundhypothese der vorliegenden Arbeit lautet, dass eine mangelnde Fehlerbewusstheit als Hinweis auf eine verringerte Handlungskontrolle zur Aufrechterhaltung einer LRS beiträgt. Daraus ergibt sich, dass die neuronalen Korrelate der Fehlerdetektion und des Konfliktmonitorings bei Personen mit einer LRS bei der Konfrontation mit Rechtschreibfehlern deutlich vermindert sind.

Diese Arbeit zielt mithilfe von antwortbezogenen EKP auf die erfolgreiche Kontrolle der Klassifizierung von korrekt und inkorrekt geschriebenen Wörtern beim Lesen ab.

Es kommen zwei neuartige Varianten zur Untersuchung der orthographischen Fehlersensitivität beim Lesen bei erwachsenen Probanden mit und ohne Dyslexie zum Einsatz (s. „Probanden, Material und Methoden“), da bislang keine entsprechenden Versuchsaufbauten in der Literatur beschrieben worden sind.

Folgende Thesen sollen im Rahmen dieser Arbeit geprüft werden:

- Gesunde Kontrollprobanden zeigen eine simultan zum ersten falschen Buchstaben auftretende mediofrontale Negativierung (im Vergleich zu korrekten Buchstaben in entsprechender Position) als Zeichen der Fehlersensitivität
- Probanden mit einer Dyslexie zeigen eine deutlich reduzierte mediofrontale Negativierung als Ausdruck einer verminderten Fehlersensitivität
- Die antwortsynchron gemittelten EKPs zeigen eine ERN-ähnliche Komponente, die als Zeichen des Antwortkonflikts auftritt

2 Probanden, Material und Methoden

Die Studie wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Die Rolle von Fehlersensitivität bei der Aufrechterhaltung der Lese-Rechtschreib-Schwäche“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziell gefördert (BMBF Projektnummer 01GJ1303A).

2.1 Votum der Ethikkommission

Ein Ethikantrag wurde der Ethikkommission der Universität Lübeck vorgelegt, welche die Durchführung der Studie genehmigte (Aktenzeichen 12088).

2.2 Studienaufbau

Die durchgeführten Testungen lassen sich in zwei Teile gliedern, die jeweils an zwei unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden. Alle Untersuchungen fanden in der Poliklinik der Neurologie des Universitätsklinikums Lübeck im EEG-Labor oder einem benachbarten Raum meist am Nachmittag oder Abend im Zeitraum von Dezember 2011 bis September 2013 statt.

Jeder Versuchsteilnehmer wurde vorab mündlich und schriftlich über den Ablauf und die Ziele der Testungen aufgeklärt und unterzeichnete freiwillig eine Einwilligungserklärung. Auf die Freiwilligkeit wurde ausdrücklich hingewiesen.

Zunächst erfolgte die Rekrutierung der dyslektischen Versuchsteilnehmer in Lübeck und Umgebung. Insgesamt nahmen an der 1. Versuchssitzung, bestehend aus R-T und WIE, 18 Probanden teil, wovon 8 das IQ-Diskrepanzkriterium erfüllten und folglich der Dyslexiegruppe zugeteilt wurden. Das **IQ-Diskrepanzkriterium** beinhaltet, dass die erzielte Rechtschreibleistung $\geq 1,5$ SD unterhalb der Leistung liegt, die bei vorliegendem IQ zu erwarten ist ($IQ - 1,5 SD \rightarrow PR > PR (RT)$). Dementsprechend wurden 10 Versuchsteilnehmer ausgeschlossen, da sie die Einschlusskriterien (s.u.) nicht erfüllten.

Anschließend erfolgte die Rekrutierung der Kontrollprobanden, welche parallelisiert nach Geschlecht, Alter, Händigkeit und Schulabschluss bzw. angestrebtem Schulabschluss ausgesucht wurden. Es wurden insgesamt 11

Probanden untersucht. Ein Versuchsteilnehmer musste aufgrund einer ungenügenden Rechtschreibleistung ausgeschlossen werden. Wohingegen ein Proband, welcher aus der Dyslexiegruppe ausgeschlossen wurde, weil das IQ-Diskrepanzkriterium aufgrund einer vollkommen durchschnittlichen Rechtschreibleistung nicht erfüllt wurde, als Kontrollperson eingeschlossen werden konnte (als cross over), wodurch die Kontrollgruppe schlussendlich aus 11 Versuchsteilnehmern bestand. Aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit sowie zu Beginn zu Übungszwecken, wurden mehr Kontrollprobanden untersucht als Dyslexieprobanden zur Verfügung standen. Zudem war vorab bereits bekannt, dass 15 in Magdeburg untersuchte Probanden, worunter sich 8 Dyslektiker und 7 Kontrollprobanden befanden, in die folgende Datenanalyse eingeschlossen werden.

In der 2. Versuchssitzung, bestehend aus den beiden unmittelbar hintereinander folgenden Worterkennungstestungen am PC (Studie 1 und 2) inklusive der elektrophysiologischen EEG-Untersuchung mit Messung der EKPs, wurden 19 Probanden untersucht (8 Dyslexieprobanden und 11 Kontrollpersonen). Es wurde untersucht, ob es zwischen gesunden Probanden und Dyslektikern beim Erkennen eines eigenen Handlungsfehlers (basierend auf der eigenen Klassifizierung, ob ein korrekt geschriebenes Wort als richtig oder falsch geschrieben bzw. ein inkorrektes Wort als falsch oder richtig geschrieben erkannt wurde) und dem damit verbundenen Antwortkonflikt zu einem Unterschied in der mediofrontalen Negativierung kommt und die auf die Antwort gemittelten EKPs eine ERN-ähnliche Komponente zeigen. Die Veränderung bzw. Reduzierung in der mediofrontale Negativierung stellt das elektrophysiologische Korrelat für die verringerte Fehlerbewusstheit für Rechtschreibfehler und die verringerte Handlungskontrolle bei Dyslektikern dar. Eine ERN-ähnliche Komponente tritt als Funktion des Antwortkonflikts auf.

Im Anschluss erfolgte die Datenanalyse, in welche 8 durch Mitarbeiter der Neurologie der Universitätsklinik Magdeburg im Zeitraum von Mai 2006 bis Oktober 2009 unter gleichen Bedingungen getesteten Dyslexieprobanden und 7 Kontrollprobanden eingeschlossen wurden. Sie umfasste somit insgesamt 34 Probanden.

In Studie 1 mussten ein Dyslexieproband aus Lübeck sowie 1 Kontrollproband aus Lübeck und ein Kontrollproband aus Magdeburg wegen einer artefaktbedingt zu geringen Anzahl an reliablen trials, um ein aussagefähiges EKP zu generieren,

ausgeschlossen werden. Somit bestand die Studienpopulation der 1. Studie aus insgesamt 15 Dyslexieprobanden (7 aus Lübeck und 8 aus Magdeburg) sowie 15 Kontrollprobanden (9 aus Lübeck und 6 aus Magdeburg).

In der 2. Studie musste nur ein Kontrollproband aus Lübeck aufgrund einer artefaktbedingt zu geringen Anzahl an reliablen trials ausgeschlossen werden, wodurch die Studienpopulation letztlich aus 16 Dyslexieprobanden (8 aus Lübeck sowie 8 aus Magdeburg) und 17 Kontrollprobanden (10 aus Lübeck und 7 aus Magdeburg) bestand (Abb. 5).

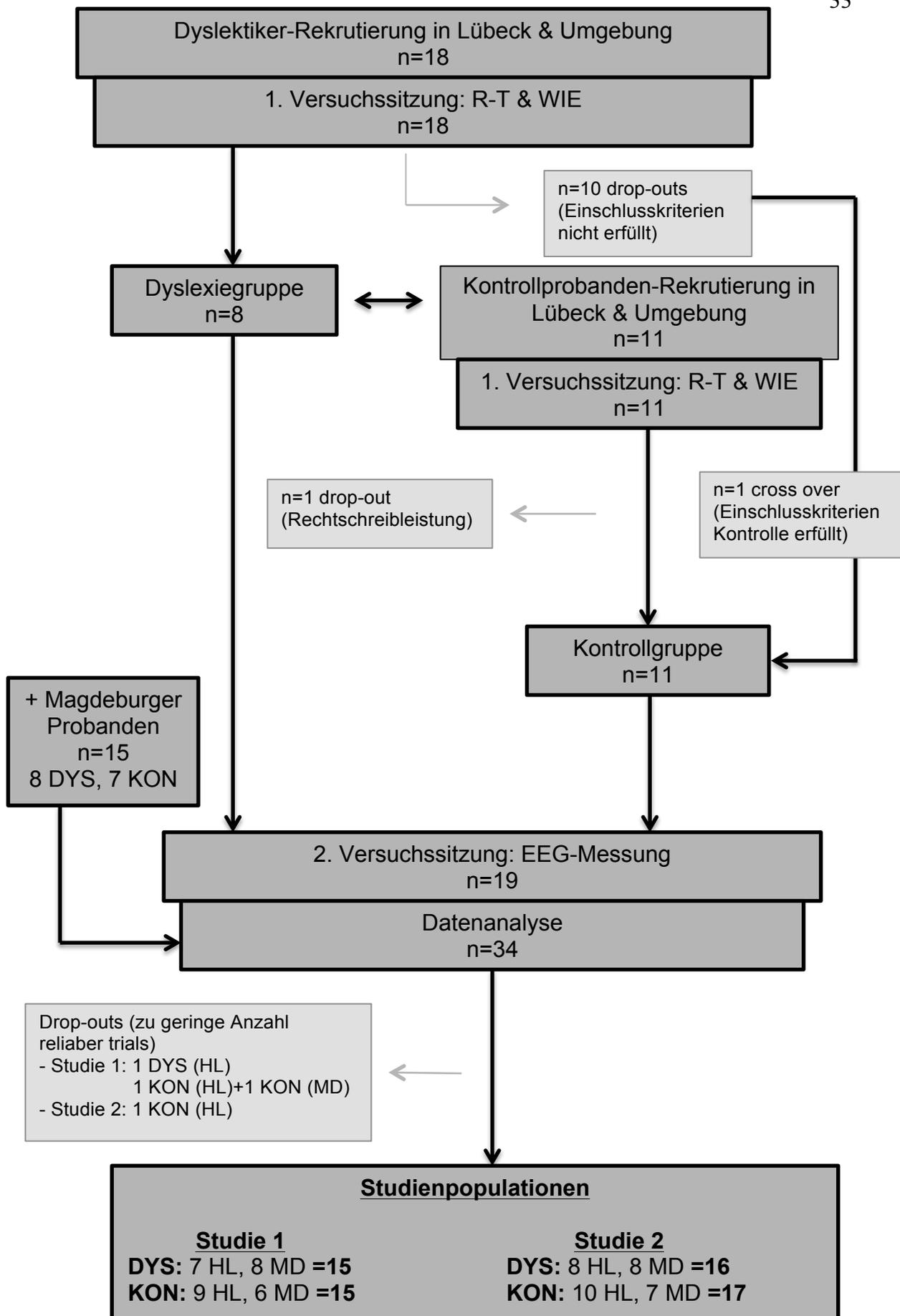


Abb. 5: Studienplan.

R-T=Rechtschreibungstest, WIE=Wechsel-Intelligenztest für Erwachsene, n=Anzahl, DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollprobanden, HL=Lübeck, MD=Magdeburg.

2.3 Studienpopulation

29 Versuchsteilnehmer wurden im Zeitraum von Dezember 2011 bis September 2013 über Aushänge in öffentlichen Einrichtungen (u.a. Universität, Fachhochschule, Oberschulen, Volkshochschulen, Krankenhäuser, Arztpraxen, Stadtbibliothek, Bürgeramt, Arbeitsamt, LRS-Fördereinrichtungen), ein Rundschreiben über den Emailverteiler der Universität zu Lübeck oder direkte Kontaktaufnahme mit Lehrkräften in Lübeck und Umgebung (u.a. Bad Oldesloe, Reinfeld und Ratzeburg) rekrutiert und untersucht. Somit war die räumliche Nähe zum EEG-Labor in der Poliklinik für Neurologie der Universität Lübeck gewährleistet.

Es handelte sich um erwachsene Männer und Frauen (≥ 18 Jahre). Sie nahmen freiwillig an der Studie teil und erhielten 7,50€ pro Stunde als Aufwandsentschädigung. Die Fahrtkosten wurden gegebenenfalls zusätzlich erstattet.

Um an den vorliegenden Studien teilzunehmen, mussten die Versuchsteilnehmer folgende **Einschlusskriterien** erfüllen:

- Mindestalter 18 Jahre
- deutsche Muttersprache
- normaler oder korrigierter Visus
- normaler IQ (>85)

Als **Ausschlusskriterien** galten:

- neurologische oder psychiatrische Vorerkrankungen

2.4 Beschreibung der diagnostischen Testverfahren

2.4.1 Rechtschreibungstest R-T „Moselfahrt“

Für die Diagnose einer LRS muss eine standardisierte, normierte Testung der Rechtschreibfähigkeit durchgeführt werden. Hierfür wurde im Rahmen dieser Studie das häufig eingesetzte Lückendiktat „Moselfahrt“ ausgewählt (Deutsche Gesellschaft für Personalwesen, 1974), welches nach dem Lebensalter, dem Geschlecht und der Schulbildung normiert ist und somit die Bestimmung der individuellen Rechtschreibleistung ermöglicht. Er kann u.a. zur Diagnostik der LRS, einer isolierten Rechtschreibstörung und einer Störung des schriftlichen Ausdrucks sowie zur Berufseignungsdiagnostik und bei der Pädagogischen Diagnostik

eingesetzt werden (Schulte-Körne, 2010). Er wurde regelgeleitet nach den Prinzipien zur Erzeugung kontentvalider Tests kreiert.

Die „Moselfahrt“ ist ein Lückendiktat bestehend aus 57 Lücken, in die die Vp einzelne „kritische“ Wörter einsetzen soll (s. Abb. 28 im Anhang). Als „kritisch“ gelten Wörter, die die wichtigsten Rechtschreibregeln berücksichtigen. Ein Fehler entsteht durch den Verstoß gegen eine Rechtschreibregel. Es wird getestet, ob die Vp in der Lage ist, gesprochene Wörter orthographisch korrekt aufzuschreiben. Hierbei werden nur Wörter verwendet, die nach den bisherigen und nach den neuen Rechtschreibregeln die gleiche Schreibweise enthalten und somit nicht von der Rechtschreibreform betroffen sind. Die Zeichensetzung wird nicht bewertet. Die Diagnose der Rechtschreibleistung erfolgt quantitativ, d.h. eine gute Rechtschreibleistung entsteht durch eine geringe Fehlerzahl bezogen auf die Gesamtzahl einer definierten Anzahl an auszufüllenden Lücken. Es werden gebräuchliche und vergleichsweise leichte einzusetzende Wörter verwendet (z.B.: nämlich, vollends, Morgen, Disput). Die Rechtschreibleistungen werden über die Normen der unterschiedlichen Alters-, Geschlechts- und Schulabschlussgruppen miteinander verglichen.

Testanwendung und -ablauf

Vorab wurde der Proband unter Schaffung optimaler Untersuchungsbedingungen über die geplante Prüfung der Rechtschreibleistung sowie die Ziele, den Ablauf, die Dauer und den Zweck der Untersuchung aufgeklärt. Anschließend erfolgte eine Testanweisung mit einem Beispiel auf der ersten Seite des vierseitigen Aufgabenblattes. Der Proband wurde gebeten mitzulesen und das Beispiel sofort auszufüllen. Durch direkte Kontrolle wurde sichergestellt, dass der Proband das Beispiel und damit die Anweisungen richtig verstanden hat. Nun wurde der eigentliche Text „Moselfahrt“ vorgelesen, bei dem der Proband die fehlenden Wörter direkt in die Lücken eintragen sollte. Die Diktierweise erfolgte ausreichend laut, ohne regionale Färbung und in natürlicher Sprechweise. Nach sinnvoll zusammenhängenden Textabschnitten erfolgte eine Pause, während der der Proband die Lücken ausfüllen konnte. Der Text wurde nur einmal vorgelesen. Bei Verständnisproblemen wurde der Proband gebeten direkt nachzufragen und der Satzteil oder ggfs. der gesamte Satz wurde erneut vorgelesen. Jedoch erfolgte nur maximal eine Wiederholung. Nach Beendigung des Diktierens sollte der Proband das Lückendiktat direkt abgeben.

Alle eingetragenen Wörter (ohne das Beispiel) wurden verglichen und bewertet. Als Fehler galten alle Abweichungen von der korrekten Schreibweise sowie unleserliche Wörter und unklare Verbesserungen. Pro Lücke wurde nur ein Fehler gewertet, auch wenn in einem Wort oder einer Lücke mehrere Fehler vorkamen. Dennoch gab es Ausnahmen, die nicht als Fehler galten: kleingeschriebene Wörter am Satzanfang, vergessene Striche/Punkte über ä, ü und ö und richtig geschriebene Wörter, die in eine falsche Lücke eingetragen wurden. Es wurden ein Rohwert (RW) (entspricht der Fehleranzahl), ein Standardwert (SW) und ein Prozentrang (PR) gebildet. Diese ermöglichten den Vergleich jeder Einzelleistung mit einer definierten Vergleichsgruppe. Somit handelte es sich um Realnormen und die Ermittlung der relativen Position einer Leistung innerhalb einer definierten Gruppe wurde ermöglicht.

2.4.2 Intelligenztestung WIE

In der ersten Versuchssitzung wurde anschließend eine Intelligenztestung mittels dem Wechsler-Intelligenztest für Erwachsene (WIE) vorgenommen, da eine LRS nur bei einem normalen Intelligenzquotienten (IQ >85) definiert ist.

Er kann zur Untersuchung der kognitiven Fähigkeiten und des allgemeinen intellektuellen Leistungsvermögens erwachsener Testpersonen im Alter zwischen 16 und 89 Jahren eingesetzt werden.

Neben dem Gesamt-IQ ist es möglich auch einen Verbal-IQ sowie einen Handlungs-IQ zu bestimmen. Darüberhinaus können durch 11 der insgesamt 14 Untertests weitere Teilleistungsbereiche der Intelligenz erfasst werden. Tab. 1 zeigt die Zuordnung der Untertests zu den einzelnen kognitiven Spektren (detaillierte Darstellung der Untertests im Anhang Abb. 29). Er ermöglicht eine klinische Individualdiagnostik durch Analyse individueller Stärken und Schwächen. Als Grundlage dient das Intelligenzkonzept von David Wechsler, wonach Intelligenz keine einzelne Fertigkeit darstellt, sondern ein Komplex vieler Fähigkeiten mit zahlreichen Facetten ist (Wechsler, 1975).

Sprachliches Verständnis	Wahrnehmungs- organisation	Arbeitsgedächtnis	Arbeits- geschwindigkeit
Wortschatz-Test	Bilderergänzen	Rechnerisches Denken	Bilderergänzen
Gemeinsamkeiten- finden	Mosaik-Test	Zahlennachsprechen	Symbolsuche
Allgemeines Wissen	Matrizen-Test	Buchstaben-Zahlen- Folgen	

Tab. 1: Zuordnung der Untertests zu den Teilleistungsbereichen der Intelligenz.

Zu beachten ist, dass die drei Untertests Bilderordnen, Allgemeines Verständnis und Figurenlegen nicht in die Berechnung der Teilleistungen mit eingehen.

Vor jedem Untertest erfolgte eine kurze Einweisung, bei der Nachfragen gestellt werden konnten. Während eines Durchgangs durfte der Untersuchungsleiter keine Korrekturen oder Verbesserungen vornehmen und kein Lob aussprechen.

Je nach Vp dauerte die Testung etwa zwischen 1,5 und 2 Stunden.

2.5 Beschreibung der EEG-Untersuchung

2.5.1 Haubenpositionierung

Für die EEG-Ableitung wurde das EEG-Ableithaubensystem von Electro-Cap International (Eaton, OH) verwendet. Hierbei handelt es sich um elastische EEG-Hauben mit eingelassenen Zinn-Elektroden. Die Positionierung der Elektroden erfolgte nach dem internationalen 10-20 System (Abb. 6). Es wurde von 32 Positionen der Haube (FP1, FP2, G, F7, F3, FZ, F4, F8, FC5, FC1, FC2, FC6, T7, C3, CZ, C4, T8, Cp5, CP1, CP2, Cp6, P7, P3, PZ, P4, P8, O1, O2) inklusive zweier Ohrelektroden (A1 und A2) und vier Elektroden zur Registrierung des Elektrokulogramms (EOG) abgeleitet. Das EOG diente zur Aufzeichnung von spontanen Augenbewegungen und ermöglichte dadurch die Eliminierung okulomotorischer Artefakte.

Am linken Auge erfolgte die Registrierung des horizontalen Elektrokulogramms (HEOG) durch jeweils eine Elektrode über und unter dem Auge auf Pupillenniveau. Das vertikale Elektrokulogramms (VEOG) wurde mittels jeweils einer Elektrode am äußeren linken und rechten Augenwinkel registriert.

Die Elektroden wurden unipolar gegen die Referenzelektrode A2 am rechten Ohrläppchen abgeleitet. Zusätzlich wurden die Kanäle offline gegen das linke Ohrläppchen (A1) rereferenziert, damit jede Elektrode denselben Abstand zur Referenzelektrode aufwies. Das EOG wurde bipolar abgeleitet, d.h. die Differenz zweier aktiver Elektroden wurde gemessen. Die Elektrode

„G“ (Groundelektrode=Erdungselektrode) diente als Erdungselektrode.

Besondere Beachtung erhielten die frontozentralen Regionen FZ, CZ und die parietozentrale Position PZ, da hier die maximale Reizantwort zu erwarten war.

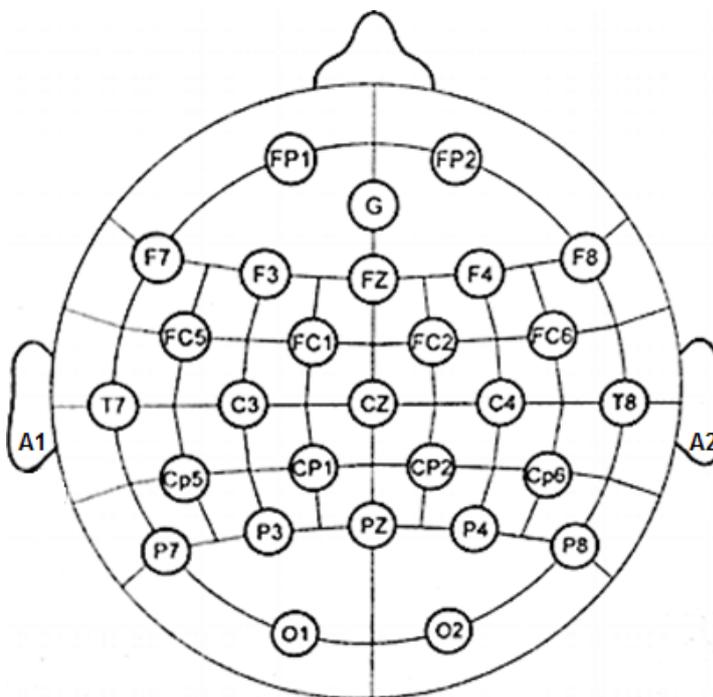


Abb. 6: Positionierung der Elektroden nach dem internationalen 10-20-System (Jasper, 1958).

Um die passende Haubengröße zu ermitteln, wurde der Kopfumfang des Versuchsteilnehmers auf Stirnhöhe mit einem herkömmlichen Maßband ausgemessen. Zu Beginn der Haubenpositionierung wurde die Strecke zwischen Nasion und Inion gemessen und dessen Mitte markiert. Anschließend wurde die Mitte der Strecke zwischen rechter und linker Präaurikularregion gemessen. An dem Schnittpunkt beider Mittelpunkte befand sich die Elektrodenposition CZ. Nun wurde die Elektrodenhaube entsprechender Größe an der Stirn angesetzt und so über den Kopf gestülpt, dass sich die CZ-Elektrode am Vertex befand. An den beiden sich an der Stirn befindlichen Elektroden FP1 und FP2 wurden Einwegschaumstoffkissen (E6 Disposable Sponge Disks) in passender Ringform angebracht, um den Druck des Haubenrandes auf die Stirn zu verringern. Um den Thorax wurde ein elastischer Brustgurt (E3-L Body Harness von Electro-Cap International, Inc.) angelegt. Das rechte und linke Ohr wurden durch die für sie vorgesehenen Ohrschlitze der Haube bewegt und die Haube anschließend mithilfe von zwei Gummibändern (E13-L CAP STRAPS) rechts und links über Knopfverschlüsse unter jedem Ohr mit dem Brustgurt unter leichter Zugspannung

verbunden. Somit wurde ein möglichst kopfhautnaher Kontakt der Elektroden hergestellt und ein für die Dauer der Experimente stabiler Sitz erreicht.

Zunächst wird leitfähiges Elektrodengel (EEG-Gel, Electro-Cap International, Inc.) in jede Elektrodenhöhle gegeben bis der Raum zwischen Kopfhaut und Elektrode vollständig mit Elektrodengel ausgefüllt ist. Anschließend wird das Gel mit der hölzernen Seite eines Wattestäbchens in die Haut einmassiert. Dabei wurden Haare verdrängt und die oberste Hautschicht abgetragen und somit die Impedanzen (Übergangswiderstände) reduziert und die Leitfähigkeit während der Ableitung verbessert. Es folgte die Impedanzmessung über eine Verbindung mit dem Aufzeichnungsrechner. Da es sich bei EKPs um sehr niedrige Potentiale handelt, müssen die Impedanzen möglichst gering sein. Betragen sie mehr als 10 kOhm, erfolgte eine Nachbearbeitung bis schließlich sämtliche Widerstände weniger als 10 kOhm betragen.

Im Anschluss wurden die Elektroden für das EOG zur Registrierung der Augenbewegungen und der dadurch verursachten Artefakte (z.B. durch Lidschläge, Sakkaden) angelegt. Für die Ableitung des VEOG wurden zwei Elektroden ober- und unterhalb des linken Auges auf Pupillenniveau beim geradeaus gerichteten Blick angebracht. Für das HEOG wurden zwei Elektroden jeweils am rechten und linken äußeren Augenwinkel auf Pupillenniveau beim Geradeausblick angebracht. Hierfür wurden ringförmige Elektroden (E17S BIO-POTENTIAL ELECTRODE) verwendet, die mithilfe von Kleberingen (EKG-Kleberinge Hellige Nr. 927 224 00) an der Haut befestigt wurden. Die Referenzelektrode (A2) wurde auf das rechte Ohrläppchen angebracht. Hierfür wurden spezielle Klippelektroden (E5-9S EAR ELECTRODES) verwendet, die einen angenehmen, stabilen Sitz für die Untersuchungszeit ermöglichten.

Vor dem Anbringen des EOGs und der Klippelektroden wurde die betreffende Hautregion mit einer abrasiven Elektrodenpaste mithilfe eines Wattestäbchens von Hautschüppchen befreit und anschließend mit einer herkömmlichen Hautdesinfektionslösung entfettet. Dann wurden die Elektroden mit einem Klebering bzw. einem Klipp angebracht. In die Elektrodenhöhlen wurde wieder Elektrodengel gegeben und mithilfe eines Wattestäbchens in die Haut einmassiert. Zusätzlich wurden die Elektroden, falls notwendig, mit einem hautfreundlichen Klebeband (Leukosilk) fixiert.

Für den Fall, dass eine Elektrode defekt war, wurde eine Überbrückungselektrode eingesetzt.

2.5.2 Datenerfassung

Zur Registrierung der EKPs erfolgte eine kontinuierliche EEG-Aufzeichnung mit einem 32-Kanal-Elektroenzephalograph der Firma *Neuroscan* (Software *Scan 4.3.1*, Modell 5083 SynAmps). Die registrierten EEG- und EOG-Signale wurden über einen Verstärker bei einem Bandpassfilter von 0.05-70 Hz und Notchfilter von 50 Hz gefiltert. Über einen integrierten Analog/Digital-Wandler (16 Bit) wurden die Daten mit einer Abtastrate von 250 Hz digitalisiert.

2.5.3 Ablauf und verwendetes Stimulusmaterial

Zu Beginn der Testung erfolgte die mündliche und schriftliche Aufklärung der Versuchsteilnehmer über den Zweck und die Methoden der EEG-Messungen. Anschließend gab jeder Proband eine schriftliche Einverständniserklärung. Danach wurden der Untersuchungsablauf erläutert und die Geräte sowie der Untersuchungsraum gezeigt.

Es folgte das Anbringen der EEG-Haube.

Über eine Anschlussbox wurde die Elektrodenhaube mit dem Aufzeichnungs-PC verbunden und die Impedanzen gemessen.

Die Testungen fanden aufgrund der hohen Störanfälligkeit des EEG in einem schallarmen Raum statt.

Die Stimulusdarbietung erfolgte mit dem Präsentationsprogramm *Presentation® Version 12.1* (www.neurobehavioralsystems.com).

Die Versuchsteilnehmer saßen auf einem bequemen Sesselstuhl und blickten in einer Entfernung von 70-80 cm (je nach Präferenz) geradeaus auf einen 22-Zoll-Bildschirm.

Während der Präsentation erschienen hintereinander in der Bildschirmmitte auf weißem Bildschirmhintergrund die schwarzen Buchstaben bzw. Wörter und Strichzeichnungen.

Sie erhielten die Anweisung sich während eines Aufgabenblocks möglichst zu entspannen und sich so wenig wie möglich zu bewegen und zu blinzeln, um dadurch verursachte Bewegungs- oder Augenbewegungsartefakte zu verhindern. Die Helligkeit im Raum konnte nach individuellen Wünschen reguliert werden. Außerhalb des schallarmen Raumes konnten die Aufzeichnungen vom

Untersucher auf zwei Monitoren (jeweils einer für die Stimuluspräsentation und die EEG-Ableitung) verfolgt und ggfs. in den Pausen oder nach einem Untersuchungsblock Rückmeldungen gegeben werden.

2.5.3.1 Studie 1

In der Mitte des Bildschirms erschien eine schwarze Strichzeichnung eines Objekts, worüber nach 500 ms die entsprechende Bezeichnung des Objekts in entweder richtiger oder falscher Schreibweise präsentiert wurde (Bsp.: Esel → Ehsel; Abb. 7). Jeweils die Hälfte der Wörter wurde in korrekter und in falscher Schreibweise (mit einem fehlerhaften Buchstaben) dargeboten. Es handelte sich um Wörter bestehend aus acht Buchstaben und zwei Silben, die mithilfe der CELEX-Datenbank ausgewählt wurden (Baayen et al., 1995). Die Vp hatte die Aufgabe durch einen Mausklick anzugeben, ob ein Wort richtig (Klick der rechten Maustaste) oder falsch geschrieben ist (Klick der linken Maustaste). Als Resonsetaste diente eine modifizierte Computermaus auf der rechten Armlehne, die an den Parallelport des Präsentationsrechners angeschlossen war.

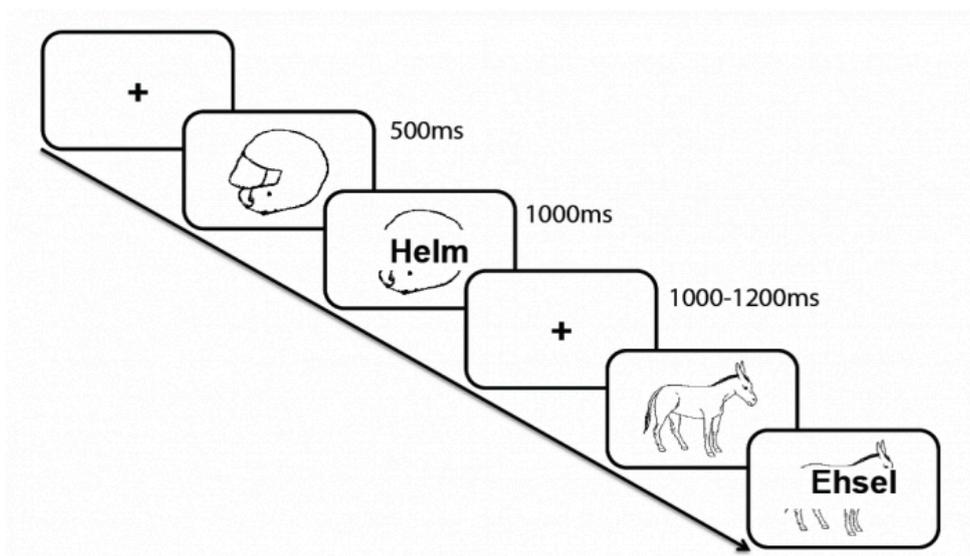


Abb. 7: Zeitliche Abfolge der Stimuluspräsentation.

Insgesamt bestand das Experiment aus 300 Einzelversuchen mit einer Dauer von jeweils 5 Sekunden. Jeweils nach 50 Einzelversuchen gab es eine 60 Sekunden lange Pause, die in der Bildschirmmitte angezeigt und herunter gezählt wurde. Die Gesamtdauer dieses Experiments betrug ca. 30 Minuten (ohne die vorherige Haubenpositionierung).

2.5.3.2 Studie 2

Als Stimulusmaterial diente in der zweiten Studie ein Wort bestehend aus 8 Buchstaben und zwei Silben (mithilfe der CELEX-Datenbank ausgewählt; Baayen et al., 1995), welches zuerst akustisch über Lautsprecherboxen, die sich rechts und links neben dem Präsentationsbildschirm befanden, von einem deutschen Muttersprachler dargeboten wurden. Anschließend erschien das entsprechende Wort in richtiger oder falscher Schreibweise Buchstabe für Buchstabe (alle 150 ms ein Buchstabe) in der Mitte des Bildschirms. Nach etwa 1,2 Sekunden erschien in der Bildschirmmitte die Frage „R-i-c-h-t-i-g?“ (Abb. 8), woraufhin die Vp per Mausklick - analog zu Studie 1 - eine Richtig- oder Falsch-Entscheidung treffen sollte. Alle Wörter bestanden aus der gleichen Buchstaben- und Silbenanzahl, sodass EKP-Unterschiede psychologische Änderungen und nicht physikalische Veränderungen (wie z.B. die Wortlänge) widerspiegeln. Es wurden 8 Buchstaben lange Wörter gewählt, um Artefakte durch Augenbewegungen zu minimieren. Die Lautstärke wurde nach individueller Präferenz reguliert. Die Hälfte der Wörter wurde in korrekter und die andere Hälfte der Wörter in inkorrekt Schreibweise (ein falscher Buchstabe) präsentiert.

Insgesamt erfolgten 200 Einzelversuche (d.h. 100 korrekt und 100 inkorrekt geschriebene Wörter) mit einer jeweiligen Dauer von 8 Sekunden. Nach jeweils 50 Einzelversuchen folgte eine Pause von 60 Sekunden. Die Gesamtdauer belief sich auf etwa 30 Minuten.

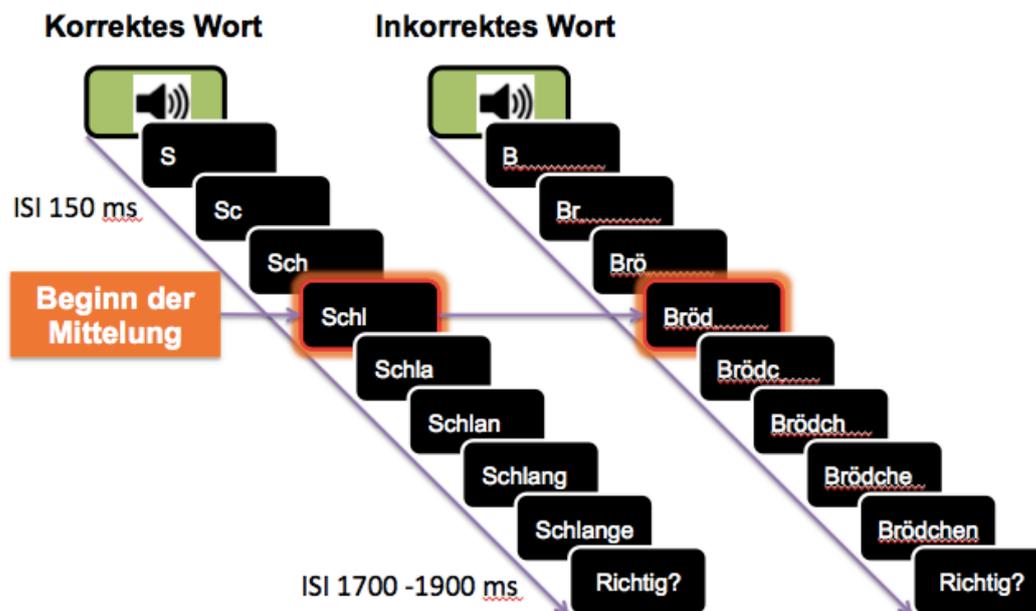


Abb. 8: Stimuluspräsentation eines korrekt geschriebenen Wortes (links) und eines inkorrekt geschriebenen Wortes (rechts).
ms= Millisekunden, ISI= Interstimulusintervall

2.6 Datenauswertung

2.6.1 Auswertung der diagnostischen Tests

Auswertung des R-T

Mithilfe des Manuals zum Rechtschreibungstest wurden durch den Rohwert (RW) (entspricht der Fehlerzahl) entsprechend des Alters und des Schulabschlusses ein Standardwert (SW) und der Prozentrang (PR) ermittelt. Diese ermöglichten den Vergleich jeder Einzelleistung mit einer definierten Vergleichsgruppe und Ermittlung der relativen Position einer Leistung innerhalb einer definierten Gruppe. Alle eingetragenen Wörter (ohne das Beispiel) wurden verglichen und bewertet. Als Fehler galten alle Abweichungen von der korrekten Schreibweise sowie unleserliche Wörter und unklare Verbesserungen. Pro Lücke wurde nur ein Fehler gewertet, auch wenn in einem Wort oder einer Lücke mehrere Fehler vorkamen. Dennoch gab es Ausnahmen, die nicht als Fehler galten: kleingeschriebene Wörter am Satzanfang, ausgelassene Striche oder Punkte über ä, ü und ö und richtig geschriebene Wörter, die aber in eine falsche Lücke eingetragen wurden.

Auswertung des WIE

Der Intelligenzquotient wurde anhand der erzielten Ergebnisse in den Untertests mithilfe des Manuals nach Vorgaben der Testentwickler ermittelt.

2.6.2 Auswertung der EEG-Daten

Die Datenanalyse umfasste die Auswertung der Verhaltensdaten und der EEG-Daten.

Zu den Verhaltensdaten zählen die Reaktionszeiten und die Fehlerraten. Die Reaktionszeiten der Antwortgaben wurden bestimmt durch Messen des Zeitabstands zwischen der Stimuluspräsentation und dem Mausklick. Für jeden einzelnen Probanden wurde eine durchschnittliche Reaktionszeit für jede Stimulus-Antwort-Kombination berechnet.

Zur Analyse der Fehlerraten wurden D-Prime-Werte (d') errechnet, die Diskriminationsindices darstellen, welche richtige und falsche Reaktionen (Antworten) beurteilen. D-Prime und die zugrunde liegende Signalentdeckungstheorie werden im Folgenden kurz vorgestellt.

D-Prime

„Wer die Wahl hat, hat die Qual“ (Rösler, 2011).

In ihrem 1966 erschienenen Buch „Signal Detection Theory and Psychophysics“ stellten Green und Swets die Signalentdeckungstheorie vor (Green und Swets, 1966). Dabei handelt es sich um ein Modell zur Messung der Empfindlichkeit einer Reizwahrnehmung.

In ihrem Versuch wurde den Vp ein Reiz mehrfach präsentiert, wobei es auch Durchgänge ohne Reizdarbietung gab. Die Aufgabe für die Vp bestand darin, zu sagen, ob ein Reiz dargeboten wurde oder nicht.

Die Gesamteindrücke der Umwelt werden als „Rauschen“ (R) und der Reiz als „Signal“ (S) bezeichnet. Da der Reiz stets mit dem Rauschen gemeinsam erscheint („Signal+Rauschen“, S+R), kann er mit nur dem „Rauschen“ verwechselt werden. Es stellte sich die Frage, wie gut sie zwischen nur R und S+R unterscheiden können.

Prinzipiell ergeben sich hieraus vier mögliche Antwortkombinationen:

		Reiz	
		Signal+Rauschen (S+R)	Rauschen (R)
Reaktion	Signal+Rauschen (S+R)	Treffer (Hit)	Falscher Alarm (FA)
	Rauschen (R)	Übersehenes Signal (Miss)	korrekte Zurückweisung (correct rejection=CR)

Mögliche Antwortkombinationen zwischen der Realität und der Antwort des Probanden. Falsche Antwortkombinationen sind in rot dargestellt, richtige in schwarz.

Entweder bestand der Reiz (in Realität) nur aus R und der Proband entschied entsprechend (also korrekt), dann lag in diesem Fall eine korrekte Zurückweisung (correct rejection=CR) vor. Enthielt der Reiz zusätzlich ein Signal und der Proband entschied entsprechend, so hatte er einen Treffer (*Hit*) gelandet. Ebenso gab es zwei Fehlermöglichkeiten: Entweder bestand der Reiz nur aus R, aber der Proband entschied sich für S+R. Hierbei handelte es sich dann um einen falschen Alarm (*FA*). Oder aber, bei Erscheinen von S+R entschied sich der Proband für nur R (d.h. kein Signal). Dabei handelte es sich dann um ein übersehenes Signal (*Miss*).

Die Signalentdeckungstheorie unterscheidet zwischen der reinen Leistungskomponente (Sensitivität= d') einerseits und der Reaktionsneigung (dem Antwortkriterium) auf der anderen Seite.

Bei der Entscheidung für eine Antwort muss Evidenz gesammelt und bewertet werden, ob diese Evidenz ein bestimmtes Antwortkriterium überschritten hat oder nicht. Wird dieses Kriterium überschritten, fällt die Antwort zugunsten des Signals aus. Wird es indes nicht überschritten, verhält es sich umgekehrt. Die Lage des Entscheidungskriteriums hängt zum einen von der Signalstärke und zum anderen von weiteren Faktoren wie der persönlichen Antworttendenz, der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Reizes und der Kosten-Nutzen-Abwägung der Antwortmöglichkeiten ab und stellt somit ein subjektives Maß, den ein Effekt erreichen muss, damit er von der Vp als Reiz wahrgenommen wird, dar.

D-Prime (d') dient zur Ermittlung der Genauigkeit einer Antwort bzw. des zugrunde liegenden Entscheidungskriteriums eines Probanden, wenn er sich einer Antwort unsicher ist. Es stellt ein kriteriumsfreies Maß dar und eignet sich als Sensitivitätsindex, da es unabhängig von den genannten Einflüssen ist und somit die tatsächliche Sinnesleistung abbildet.

Grundsätzlich werden zwei Arten von Entscheidungskriterien unterschieden:

- I. „Liberales Kriterium“: Im Zweifel fällt die Entscheidung hier häufiger für „Signal“ aus. Ein ausgelassenes Signal (*Miss*) wird als schlimmer angesehen als ein falscher Alarm (*FA*) → Folglich werden zwar viele Treffer (*Hits*), aber gleichzeitig auch viele falsche Alarme (*FA*) erzielt.
- II. „Konservatives Kriterium“: Hierbei fällt die Entscheidung im Falle von Unsicherheit eher für „Rauschen (kein Signal)“ aus
→ Demzufolge werden kaum falsche Alarme (*FA*), im Gegenzug jedoch einige ausgelassene Signale (*Miss*) produziert.

Die Genauigkeit der Antwort bzw. die tatsächliche Fehlerdetektionsleistung wird ermittelt, indem die Reaktionsneigung herausgerechnet wird. Dazu ermittelt man zunächst die relativen Häufigkeiten der Treffer (*Hit*) und der falschen Alarme (*FA*) und bildet die Differenz (über eine z-Transformation).

Das Modell der Signalentdeckungstheorie geht von einem Kontinuum aus. Darauf können die Verteilungen von R und S+R aufgetragen werden. Eine Überlappung beider Dichten bedeutet, dass der Proband R und S+R nicht klar voneinander trennen kann. Der Abstand der Mittelwerte beider Verteilungen ist der Sensitivitätsindex, d.h. der Index für die Leistungsfähigkeit des Probanden zwischen beiden zu unterscheiden.

Je niedriger d' , desto mehr Schwierigkeiten hatte ein Proband zwischen Treffern (*Hit*) und falschen Alarmen (*FA*) zu unterscheiden. Ein d' -Wert von >4 zeigt eine nahezu perfekte Diskriminierungsfähigkeit an, wohingegen $d'=0$ bedeutet, dass die Trefferrate der Fehlerrate entspricht.

Die Notwendigkeit, bei Unsicherheit eine Entscheidung für eine Antwort treffen zu müssen, ergab sich auch bei der Worterkennungsaufgabe dieser Studie: Von dem Probanden wurde eine Entscheidung verlangt, nämlich anzugeben, ob ein Wort richtig oder falsch geschrieben wurde. Ihnen wurden hintereinander Wörter in korrekter oder inkorrekt Schreibung präsentiert und sie mussten zwischen

S+R (korrekt geschriebenes Wort) und R (inkorrekt Buchstabe) unterscheiden. Die Schreibweise lieferte hier die Evidenz für die eine oder die andere mögliche Reizsituation, auf welcher Basis eine Richtig- oder Falsch-Entscheidung getroffen werden musste.

Die EEG-Daten wurden mithilfe der Software MATLAB und den Toolboxen EEGLAB und ERPLAB (Lopez-Calderon und Luck, 2014) aufgearbeitet.

Um Störsignale und Muskelartefakte zu eliminieren, wurde zunächst mit einem lowpass Filter von 0.1 Hz und einem highpass Filter von 40 Hz gefiltert.

Anschließend erfolgte die Rereferenzierung gegen das linke Ohrläppchen (A1), damit alle Elektroden denselben Abstand zur Referenzelektrode aufweisen.

2.6.2.1 Studie 1

Nun wurden die Daten folgendermaßen segmentiert, d.h. in Epochen eingeteilt:

In Vorbereitung für die stimulusabhängige Analyse wurden Epochen für den Zeitraum von 200 ms vor bis 1600 ms nach der gegebenen Antwort erstellt.

Für die reaktionsbezogene Analyse wurden die Daten 300 ms vor Erscheinen eines jeden Stimulus bis 600 ms poststimulus epochiert, sodass die Segmente eine Länge von 1800 und 900 ms hatten.

Für die Artefaktkorrektur wurde zunächst eine unabhängige Komponentenanalyse („Independent Component Analysis“, „ICA“; Makeig et al., 1996) auf den kontinuierlichen Daten jeder Vp berechnet. Mithilfe der „ICA“ ist es möglich, ein zweidimensionales Oberflächensignal (Elektrode x Zeitpunkt) in weitestgehend unabhängige, mathematische Komponenten zu zerlegen und diese aus einem Datensatz zu extrahieren. Es werden räumlich-zeitliche Überlagerungen durch latente Komponenten eliminiert (Groppe et al., 2008). EEG-Daten sind ein Maß elektrischer Felder im Gehirn, welche durch Elektroden an der Kopfhaut gemessen werden. Jede Elektrode erhält ein Mischsignal aus dem Gehirn und anderen Körperregion (z.B. aus dem Herzen, von den Augen und den Muskeln). Diese Signale aus anderen Körperregionen werden als Störsignale angesehen, da beim EEG meist nur die elektrische Aktivität des Gehirns interessiert. Es wird angenommen, dass diese Signale unabhängig voneinander sind und somit mittels ICA identifiziert und entfernt werden können. Im Anschluss erfolgte eine visuelle Inspektion mit individuellen Schwellenwerten und ggfs. eine manuelle

Nachbearbeitung. Komponenten, die sicher als Lidschlag oder horizontale Augenbewegung identifiziert werden konnten, wurden entfernt.

Die baseline-Korrektur für die antwortabhängige Analyse erfolgte 300 ms prästimulus, die Baselinekorrektur für die stimulusabhängige Analyse 100 ms prästimulus. Durch diesen Vorgang werden die Daten an eine gemeinsame Grundlinie angeglichen.

Schließlich erfolgte die Mittelung der elektrischen Signale der Segmente innerhalb eines Probanden pro Bedingung.

In dieser Studie wurden insgesamt 3 Bedingungen untersucht:

1. ‚Treffer‘ (*Hit*): ein korrektes Wort wird als korrekt geschrieben erkannt
2. ‚korrekte Ablehnung‘ (*CR*): ein falsch geschriebenes Wort wird richtig als inkorrekt geschrieben erkannt und
3. ‚falscher Alarm‘ (*FA*): ein falsch geschriebenes Wort wird als korrekt geschrieben angegeben

Die vierte Bedingung ‚verpasstes Signal‘ (*Miss*: ein korrekt geschriebenes Wort wurde inkorrekt als falsch geschrieben angegeben) wurde aufgrund einer zu geringen Anzahl an reliablen Durchgängen (trials) von der Auswertung ausgeschlossen. Es werden mindestens 10 Trials benötigt, um ein reliables EKP erstellen zu können.

Anschließend erfolgte eine Mittelung über alle Probanden einer Gruppe (grand averages), um die spontane elektrische Aktivität des EEGs gegenüber der ereigniskorrelierten Aktivität zu reduzieren.

Zur Bestimmung der **N2-Komponente** wurden für jede Vp an jeder Elektrodenposition (FZ, CZ, PZ) im Zeitfenster von 220-360 ms nach Stimulusonset die Peaklatenzen bestimmt und anschließend die gemittelte Amplitude eines 50 ms Zeitfensters um die Peaklatenz als statistischer Kennwert verwendet.

Die mittlere Amplitude der **N4-Komponente** wurde in dem Zeitfenster 380-480 ms nach Stimulusonset bestimmt, welche als statistischer Kennwert diente.

Die mittlere Amplitude der **späten Positivierung (LPC)** wurde im Zeitfenster von 600-700 ms poststimulus bestimmt und als statistischer Kennwert verwendet.

2.6.2.2 Studie 2

Die Epochierung für die stimulusabhängige Analyse erfolgte 200 ms vor Erscheinen eines jeden Stimulus bis 1200 ms poststimulus.

Für die Artefaktkorrektur wurde ebenso zunächst eine unabhängige Komponentenanalyse („ICA“; Makeig et al., 1996) auf den kontinuierlichen Daten jeder Vp berechnet.

Anschließend erfolgte eine visuelle Inspektion mit individuellen Schwellenwerten und falls erforderlich eine manuelle Nachbearbeitung. Konnten Komponenten sicher als okulomotorische Artefakte identifiziert werden, wurden sie eliminiert.

Die baseline-Korrektur erfolgte 100 ms prästimulus.

Schließlich erfolgte die Mittelung der elektrischen Signale der Segmente innerhalb eines Probanden pro Bedingung.

In dieser Studie wurden zwei Bedingungen untersucht:

1. ‚Treffer‘ (*Hit*): ein korrektes Wort wird als korrekt geschrieben erkannt
2. ‚korrekte Ablehnung‘ (*CR*): ein falsch geschriebenes Wort wird als inkorrekt geschrieben erkannt

Die anderen Bedingungen (‚*false alarm/ falscher Alarm*‘ und ‚*Miss/ Verpasser*‘) konnten aufgrund zu weniger Trials (zu geringen Fehlerzahl) nicht ausgewertet werden.

Schließlich erfolgte die Mittelung über alle Probanden einer Gruppe zur Erstellung der grand averages.

2.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm Excel (Version 14.0.0), pspire 0.8.3 (Version 3: GNU PSPP, 2007) sowie der Statistik-Software R (Version 3.1.2: R Core Team, 2014) und dem Paket ezANOVA (Version 4.0.2: Lawrence, 2013).

Als Signifikanzniveau wurde $\alpha=0,05$ festgelegt. Betrug die Irrtumswahrscheinlichkeit $p\leq 0,05$, wurde dies als signifikant gewertet. Entsprechend wurde $p>0,05$ als nicht signifikant gewertet.

Zur Prüfung signifikanter Geschlechter-, Händigkeits- und Schulabschlussunterschiede zwischen beiden Versuchsgruppen in beiden Studien

wurde jeweils ein Fisher exact test durchgeführt. Zur Testung signifikanter Altersunterschiede wurden zunächst ein Levene-Test zur Prüfung der Varianzhomogenität und anschließend ein t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt.

2.7.1 Diagnostische Tests

Hinsichtlich signifikanter Gruppenunterschiede bezüglich des durch den WIE ermittelten IQ und der Fehleranzahl im R-T wurden in beiden Studien zweiseitige t-Tests für unabhängige Stichproben angewandt. Zur Prüfung der Varianzgleichheit wurde der Levene-Test verwendet. Wurde er signifikant ($p < 0,05$), wurde die Nullhypothese (Gruppenvarianzen sind gleich) abgelehnt und Varianzheterogenität angenommen.

2.7.2 Neurophysiologische Daten

Verhaltensdaten

Für die statistische Analyse der d' -Werte in beiden Studien wurde ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben eingesetzt, um die Mittelwerte der Dyslexie- und Kontrollgruppe miteinander hinsichtlich eines signifikanten Unterschieds zu untersuchen.

Mittels einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA= analysis of variance) wurden die Reaktionszeiten auf Gruppenunterschiede zwischen der Dyslexie- und Kontrollgruppe für jeden Antworttyp (*Hit*=Treffer, *FA*=false alarm/falscher Alarm, *CR*=correct rejection/korrekte Ablehnung, *Miss*=Verpasser; entspricht dem Messwiederholungsfaktor) untersucht. Voraussetzung hierfür war eine Korrelationshomogenität.

Für die Testung der Sphärizität wurde der Mauchly-Test verwendet. Wurde er signifikant ($p < 0,05$) und somit die Sphärizitätsannahme verletzt, erfolgte die Korrektur der Freiheitsgrade mit der Greenhouse-Geisser-Korrekturformel (Jennings und Wood, 1976). Es werden korrigierte p-Werte, aber unkorrigierte Freiheitsgrade berichtet.

In Studie 2 konnten die Reaktionszeiten aufgrund einer verfrühten Antwortgabe (bereits vor der Frage „R-i-c-h-t-i-g-?“) nicht ausgewertet werden.

2.7.3 EEG-Daten

Die Daten der Elektroden FZ, CZ und PZ wurden zur statistischen Auswertung exportiert und weiteranalysiert.

Studie 1

Zur inferenzstatistischen Analyse kamen zwei- (Faktoren: „Gruppe“ *Dyslexie-* vs. *Kontrollgruppe* und „Bedingung“ *Hit, FA und CR*) und mehrfaktorielle Varianzanalysen vom gemischten Modell (Faktoren: „Gruppe“ *Dyslexie-* vs. *Kontrollgruppe*, „Bedingung“ *Hit, FA und CR* und „Elektrodenposition“ *FZ, CZ und PZ*) zum Einsatz.

Für Einzelvergleiche wurden t-Tests für abhängige Stichproben (Bedingungsvergleich pro Gruppe) sowie t-Tests für unabhängige Stichproben (Gruppenvergleich pro Bedingung) durchgeführt.

Studie 2

Im **Zeitfenster 260 bis 320 ms poststimulus** wurde die Negativierung aus den mittleren Amplituden eines 50 ms Fensters zentriert um die individuelle Gipfellatenz berechnet.

Da die Negativierung unterschiedlich über der Skalpoberfläche verteilt war, wurden für **zentrale, parasagittale und laterale Elektrodenpositionen** separate Analysen durchgeführt, um den bedeutsamsten Effekt lokalisieren zu können. Zu den zentralen Elektrodenpositionen gehörten die Elektrodenpositionen FZ (frontozentral), CZ (zentral) und PZ (parietozentral). Die Elektrodenpositionen F (frontal), FC (frontozentral), C (zentral), CP (zentroparietal), P (parietal) und PO (parietookzipital) ergaben die parasagittale Elektrodenreihe und zu der lateralen Reihe gehörten die Elektrodenpositionen F (frontal), FC (frontozentral), CP (zentroparietal), T (temporal) und P (parietal).

Die **LPC** (late positive component=späte Positivierung) wurde im Zeitfenster 550-650 ms poststimulus bestimmt.

Zur inferenzstatistischen Analyse wurden mehrfaktorielle Varianzanalysen (vom gemischten Modell) eingesetzt. Für die Negativierung über den parasagittalen Elektrodenpositionen F (frontal), FC (frontozentral), C (zentral), CP (zentroparietal), P (parietal) und PO (parietookzipital) wurden anschließend Paarvergleiche zwischen den Gruppen mittels t-Tests für unabhängige Stichproben und Paarvergleiche zwischen den Bedingungen mittels t-Tests für abhängige

Stichproben durchgeführt. Zur Verhinderung der Alphafehler-Kumulierung, d.h. die Erhöhung des Fehlers 1. Art durch multiples Testen, wurde die Bonferroni-Korrektur eingesetzt.

3 Ergebnisse

3.1 Probandencharakteristika

3.1.1 Studie 1

Dyslexiegruppe

Es galten die genannten Ein- und Ausschlusskriterien. Zusätzlich musste das IQ-Diskrepanzkriterium für das Vorliegen einer Dyslexie erfüllt werden (erzielte Rechtschreibleistung $\geq 1,5$ SD unterhalb der Leistung, die bei vorliegendem IQ zu erwarten ist (IQ - 1,5 SD \rightarrow PR > PR (RT))).

Die Dyslexiegruppe bestand aus 9 männlichen und 6 weiblichen Versuchsteilnehmern. Das Durchschnittsalter betrug 22,7 Jahre (19-27 Jahre; SD 2,9). Zwölf Vp waren Rechtshänder. Sieben Probanden hatten ein Abitur/Fachabitur oder strebten dieses als höchsten Schulabschluss an, 6 einen Realschulabschluss und 2 einen Hauptschulabschluss.

Kontrollgruppe

Die Kontrollgruppe setzte sich aus 8 männlichen und 7 weiblichen Probanden zusammen. Das Durchschnittsalter betrug 24,7 Jahre (18-43 Jahre; SD 7,5). Unter ihnen befanden sich 14 Rechtshänder. Elf Probanden hatten ein Abitur/Fachabitur vorzuweisen oder strebten dieses an und 4 einen Realschulabschluss.

In den durchgeführten Fisher's exact tests zur Prüfung signifikanter Gruppenunterschiede der ersten Studie zeigten sich keine signifikanten Geschlechter- ($p=0,73$), Händigkeit- ($p=0,6$). oder Schulabschlussunterschiede ($p=0,23$) zwischen beiden Untersuchungsgruppen. Hinsichtlich signifikanter Altersunterschiede wurde ein t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt, welcher keinen signifikanten Gruppenunterschied in Bezug auf das Probandenalter ergab ($F=4,28$, $p=0,35$). Vorab wurde ein Levene-Test zur Prüfung der Varianzhomogenität durchgeführt, welcher signifikant ($p=0,05$) wurde, weshalb die Nullhypothese (Varianzen sind gleich) abgelehnt wurde (Tab. 2).

	DYS n=15	KON n=15	p-Wert
Geschlecht			
m	9	8	0,73
w	6	7	
Alter (Jahre)			
Altersspanne	19-27	18-43	0,35
mittleres Alter	22,7	24,7	
Händigkeit			
R	12	14	0,6
L	3	1	
Schulabschluss			
Abitur/Fachabitur	7	11	0,23
Realschule	6	4	
Hauptschule	2	0	

Tab. 2: Studie 1 Probandencharakteristika.

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollproband, n=Anzahl, m=männlich, w=weiblich, R=Rechtshändigkeit, L=Linkshändigkeit.

3.1.2 Studie 2

Dyslexiegruppe

Die Gruppe der Dyslektiker der 2. Studie bestand aus insgesamt 16 Probanden. Darunter waren 9 männliche und 7 weibliche Versuchsteilnehmer. Das Durchschnittsalter betrug 23,8 Jahre (19-40 Jahre; SD 5,1). Vierzehn Vp waren Rechtshänder. Acht Probanden hatten ein Abitur/Fachabitur als höchsten Schulabschluss vorzuweisen oder strebten dieses an, 6 einen Realschulabschluss und 2 einen Hauptschulabschluss.

Kontrollgruppe

Die Gruppe der Kontrollprobanden bestand insgesamt aus 17 Vp. Sie setzte sich aus 9 männlichen und 8 weiblichen Probanden zusammen. Das Durchschnittsalter betrug 26,5 Jahre (18-50 Jahre; SD 9,4). Unter ihnen befanden sich 16 Rechtshänder und ein Linkshänder. Als Schulbildung hatten 13 Probanden ein Abitur oder Fachabitur vorzuweisen oder strebten dieses an und 4 einen Realschulabschluss.

In den durchgeführten Fisher's exact tests zeigten sich keine signifikanten Geschlechter- ($p=1,0$), Händigkeits- ($p=0,6$) oder Schulabschlussunterschiede ($p=0,19$) zwischen beiden Untersuchungsgruppen. Hinsichtlich signifikanter

Altersunterschiede wurde nach Prüfung der Varianzhomogenität mit dem Levene-Test, welcher signifikant wurde ($p=0,3$), ein t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt, welcher keinen signifikanten Gruppenunterschied bezüglich dem Probandenalter erbrachte ($F=5,19$, $p=0,3$; Tab. 3).

	DYS n=16	KON n=17	p-Wert
Geschlecht			
m	9	9	1,0
w	7	8	
Alter (Jahre)			
Altersspanne	19-40	18-50	0,3
mittleres Alter	23,8	26,5	
Händigkeit			
R	14	16	0,6
L	2	1	
Schulabschluss			
Abitur/Fachabitur	8	13	0,19
Realschule	6	4	
Hauptschule	2	0	

Tab. 3: Studie 2 Probandencharakteristika.

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollproband, n=Anzahl, m=männlich, w=weiblich, R=Rechtshändigkeit, L=Linkshändigkeit.

3.2 Ergebnisse der diagnostischen Tests

Im Folgenden werden die Ergebnisse der diagnostischen Tests für beide Studien zusammen dargestellt.

3.2.1 Rechtschreibungstest R-T „Moselfahrt“

Die Probanden der Dyslexiegruppe machten in der ersten Studie im Mittel 34,5 Rechtschreibfehler (SD 10,7) in dem Lückendiktat „Moselfahrt“. Die gesunden Kontrollprobanden hingegen machten im Mittel 10,8 Rechtschreibfehler (SD 5,1).

In der zweiten Studie machten die Probanden der Dyslexiegruppe im Mittel 34 Rechtschreibfehler (SD 10,6) in dem Lückendiktat. Die Probanden der Kontrollgruppe machten im Gegensatz dazu im Mittel 10 Rechtschreibfehler (SD 5,1).

Zur Prüfung der Varianzhomogenität wurde der Levene-Test eingesetzt. Er wurde in beiden Studien signifikant (Studie 1: $F=4,47$; $p=0,04$; Studie 2: $F=4,86$; $p=0,04$), weshalb die Nullhypothese (Gruppenvarianzen sind gleich) jeweils abgelehnt wurde. Der anschließende Vergleich auf signifikante Mittelwertunterschiede von Dyslexie- und Kontrollgruppe mittels eines zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben ergab in beiden Studien einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen auf dem 5% Signifikanzniveau (Studie 1: $t=7,76$; $df=20,07$; $p<0,001$; Studie 2: $t=-8,06$; $df=21,2$; $p<0,001$).

Die Probanden der Dyslexiegruppe machten somit in beiden Studien signifikant mehr Rechtschreibfehler als die gesunden Kontrollprobanden.

3.2.2 Intelligenztest WIE

Die Dyslektiker in der Versuchsgruppe der ersten Studie wiesen im Mittel einen IQ von 108,1 (SD 13,2) auf. Der WIE ergab bei den gesunden Kontrollprobanden einen mittleren IQ von 116,3 (SD 10,8).

Die Dyslektiker der Versuchsgruppe der zweiten Studie wiesen im Mittel einen IQ von 110 (SD 15,7) auf. Bei den gesunden Kontrollprobanden ergab sich ein mittlerer IQ von 116 (SD 12,1).

Zur Prüfung der Varianzgleichheit wurde erneut der Levene-Test verwendet. Dieser wurde in beiden Studien nicht signifikant (Studie 1: $F=0,99$; $p=0,33$; Studie 2: $F=1,95$; $p=0,17$), wodurch sich die Varianzhomogenität bestätigte. Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben ergab einen nicht signifikanten Mittelwertunterschied bezüglich der IQ beider Gruppen in beiden Studien (Studie 1: $t=-1,84$; $df=28$; $p=0,08$; Studie 2: $t=-1,37$; $df=31$; $p=0,18$).

Somit lag kein signifikanter Unterschied der IQ der Probanden beider Gruppen in beiden Studien vor und die Parallelisierung war erfolgreich.

Die IQ im Mittel lagen im Normalbereich.

3.3 Ergebnisse der Verhaltensdaten

3.3.1 Reaktionszeiten

Im Folgenden werden lediglich die Reaktionszeiten der ersten Studie dargestellt. Die Reaktionszeiten der zweiten Studie konnten aufgrund einer verfrühten Antwortgabe vor der Frage: „R-i-c-h-t-i-g?“ nicht ausgewertet werden.

Die Reaktionszeiten der Dyslexie- und Kontrollgruppe für jede Bedingung sind in der folgenden Tabelle aufgeführt (Tab. 4).

REAKTIONSZEITEN (ms)	GRUPPE			
	Dyslexiegruppe (n=15)		Kontrollgruppe (n=15)	
	M	SD	M	SD
Gesamt	1362,8	389,3	1101,3	369,1
Hit	1117,9	287,9	907,8	338,4
CR	1326,8	336,4	1032,3	327,9
FA	1464,0	331,8	1204,1	315,3
Miss	1542,5	470,5	1261,2	410,8

Tab. 4: Deskriptivstatistik: Reaktionszeiten.

M=Mittelwert, SD=Standardabweichung, n=Anzahl, ms=Millisekunden, Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Ablehnung, FA=false alarm/ falscher Alarm, Miss=übersehenes Signal.

Insgesamt zeigte sich eine höhere Reaktionslatenz der Dyslektiker gegenüber den gesunden Kontrollprobanden für jede einzelne Bedingung (*Hit*, *CR*, *FA*, *Miss*; Abb. 9). Die mittlere Reaktionszeit der Dyslexiegruppe lag insgesamt bei 1363 ms (SD 389) und die der gesunden Kontrollprobanden bei 1101 ms (SD 369).

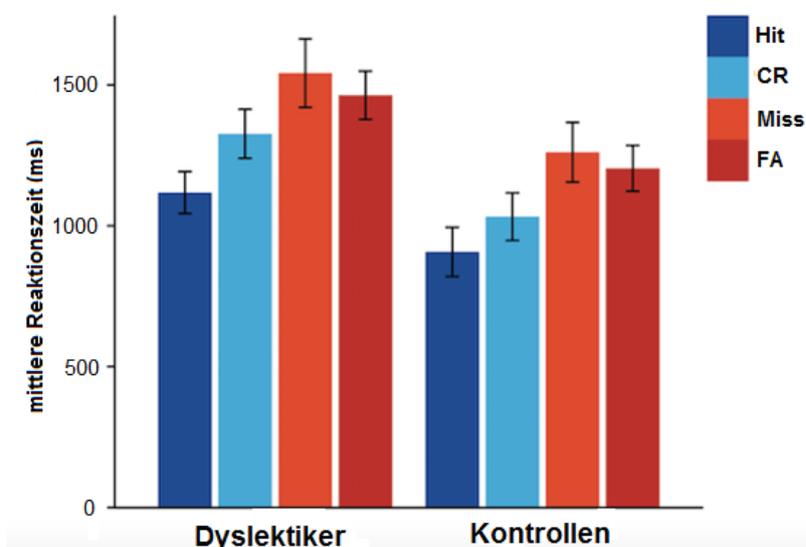


Abb. 9: Mittlere Reaktionszeiten und Standardabweichungen der Dyslexie- und Kontrollgruppe für jede Bedingung: Hit= Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, Miss=verpasstes Signal, FA=false alarm/ falscher Alarm. ms=Millisekunden.

Den deskriptiv dargestellten Unterschieden wurde mit einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung nachgegangen, wobei der Faktor „Antworttyp“ als vierstufiger Faktor (*Hit*, *CR*, *FA* und *Miss*) und die beiden Gruppen (Dyslexie- vs. Kontrollgruppe) als abhängige Variablen in die Analyse eingingen. Für den Faktor „Gruppe“ zeigte sich ein Haupteffekt ($F(1, 28)=4,90$; $p=0,04$). Ebenso ergab sich ein Haupteffekt für den Faktor „Antworttyp“ ($F(3, 84)=29,79$; $p<0,001$), jedoch keine signifikante Interaktion „Gruppe x Antworttyp“ ($F(3, 84)=0,34$; $p>0,05$; Tab. 7 im Anhang).

Um zu testen, ob die Voraussetzung der Sphärizität gegeben ist, wurde der Mauchly-Test verwendet (Mauchly, 1940). Da der Mauchly-Test signifikant wurde für den Faktor „Antworttyp“ ($p<0,001$; Tab. 8 im Anhang), wurde die Sphärizitätsannahme verletzt. Um das Risiko eines Fehlers 1. Art zu reduzieren, erfolgte die Korrektur der Freiheitsgrade mit der Greenhouse-Geisser-Korrekturformel (Jennings und Wood, 1976). Die Korrektur der Freiheitsgrade ergab einen korrigierten p-Wert, der weiterhin signifikant für den Haupteffekt „Antworttyp“ war ($p<0,001$; Tab. 9 im Anhang).

3.3.2 D-Prime/ Fehlerraten

Als Fehler galt eine falsche Antwort. Eine ausgelassene Antwort wurde nicht gewertet.

D-Prime-Variablen (d') stellen Diskriminationsindices dar, die richtige (*Hits*) und falsche Reaktionen (*false alarms/ falscher Alarme*) bewerten. Mithilfe der Signalentdeckungstheorie können im Gegensatz zu beispielsweise reinen Fehlerraten die Sensitivität und das Entscheidungskriterium eines Probanden unabhängig voneinander erfasst werden. Neben der Wahrnehmungssensitivität spielt das sog. Entscheidungskriterium eine Rolle. Wenn beispielsweise ein Reiz nahe der Absolutschwelle dargeboten wird, muss der Proband entscheiden, ob ein Reiz dargeboten wurde oder nicht. Diese Entscheidung erfolgt subjektiv und kann entweder konservativ oder liberal erfolgen (s. S. 44-48: D-Prime).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der D-Prime-Variablen für beide Studien getrennt dargestellt.

Studie 1

Die Dyslektiker erzielten im Mittel ein d' von 2,07, wohingegen die gesunden Kontrollprobanden ein mittleres d' von 3,20 erreichten (Abb. 10).

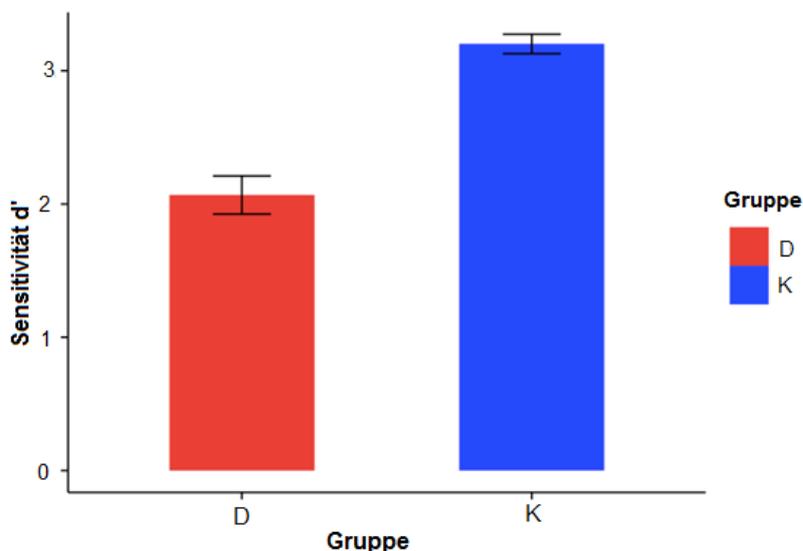


Abb. 10: Mittlerer Sensitivitätsindex d' und Standardfehler des Mittelwertes der Dyslexie- und Kontrollgruppe. D=Dyslektiker, K=Kontrollen.

Der Vergleich auf signifikante Mittelwertunterschiede von Dyslexie- und Kontrollgruppe mittels eines t-Tests für unabhängige Stichproben ergab eine signifikante ($p < 0,001$; s. Tab. 5) Differenz der d' -Mittelwerte auf dem 5%-Signifikanzniveau. Probanden der Dyslexiegruppe wiesen eine signifikant schwächere Diskriminierungsfähigkeit zwischen den Reizen R (inkorrektes Wort) und S+R (korrekt geschriebenes Wort) auf und zeigten somit eine signifikant schwächere Leistung bei der korrekten Klassifizierung von richtig und falsch geschriebenen Wörtern.

	M	SD	t	dF	p
DYS (n=15)	2,067	0,56			
KON (n=15)	3,201	0,28	-7,06	20,75	<0,001

Tab. 5: T-Test für d' .

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Studie 2

Die Dyslektiker erzielten im Mittel ein d' von 2,95, wohingegen die gesunden Kontrollprobanden ein mittleres d' von 4,34 erreichten (Abb. 11).

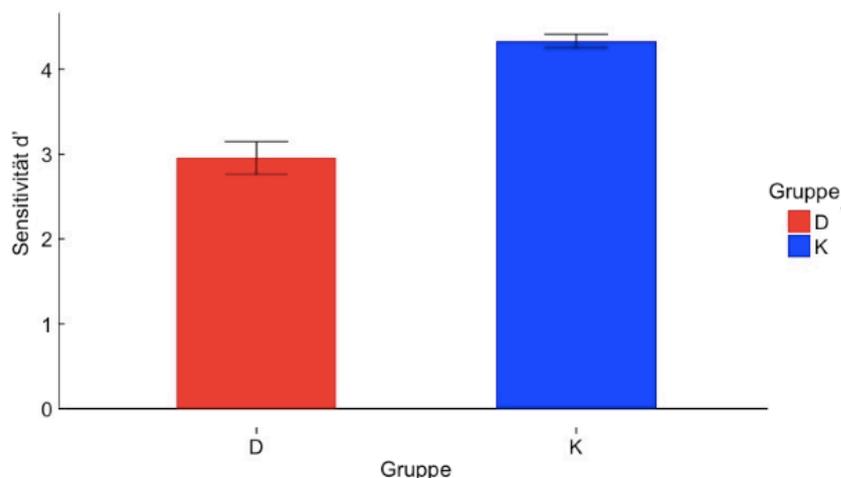


Abb. 11: Mittlerer Sensitivitätsindex d' und Standardfehler des Mittelwertes der Dyslexie- und Kontrollgruppe. D=Dyslektiker, K=Kontrollen.

Der Vergleich auf signifikante Mittelwertunterschiede der beiden Gruppen mittels eines t-Tests für unabhängige Stichproben ergab, wie bereits in Studie 1, eine signifikante ($p < 0,001$, s. Tab. 6) Differenz der d' -Mittelwerte. Probanden der Dyslexiegruppe wiesen auch hier eine signifikant schwächere Diskriminierungsfähigkeit zwischen einem korrekt geschriebenen und einem inkorrekt geschriebenen Wort auf und zeigten ebenso eine signifikant schwächere Leistung bei der korrekten Klassifizierung von richtig und falsch geschriebenen Wörtern.

	M	SD	t	dF	p
DYS (n=16)	2,954	0,771			
KON (n=17)	4,335	0,326	6,63	19,945	<0,001

Tab. 6: T-Test für d' .

DYS= Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

3.4 Ergebnisse der EEG-Daten

3.4.1 Studie 1

3.4.1.1 Stimulusabhängige Analyse

In Abbildung 12 sind die auf den Beginn der Stimuluspräsentation gemittelten EKPs der Dyslexie- und Kontrollgruppe für die drei in die Auswertung eingegangenen Bedingungen *Hit* (Treffer), *CR* (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) und *FA* (false alarm/ falscher Alarm) über den Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ dargestellt. Da es zu wenige Trials der *Miss*-Bedingung (verpasstes Signal) gab (d.h. <10 Trials), um ein aussagefähiges EKP zu generieren, wurde diese Bedingung von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Im Mittel bestand die *Hit*-Bedingung bei den Dyslektikern aus 127.5 und bei den Kontrollprobanden aus 136.5 Trials. Die *CR*-Bedingung setzte sich aus 102.7 (Dyslexiegruppe) und 130.2 (Kontrollgruppe) Trials zusammen. Die *FA*-Bedingung bestand insgesamt aus 41.5 (Dyslexiegruppe) und 16.5 (Kontrollgruppe) Durchläufen.

Für die stimulusabhängige Analyse wurden die Daten 200 ms prästimulus bis 1600 ms poststimulus ausgewertet. Die Epochen hatten somit eine Länge von 1800 ms. Als Stimulus diente eine in der Bildschirmmitte erscheinende schwarze Strichzeichnung eines Objekts, worüber nach 500 ms die entsprechende Bezeichnung in entweder richtiger oder falscher Schreibweise (ein inkorrekt Buchstabe) präsentiert wurde. Die Hälfte der Wörter wurde in korrekter und die andere Hälfte in inkorrekt Schreibweise dargeboten. Durch einen Mausklick sollte die Vp angeben, ob ein Wort richtig oder falsch geschrieben ist.

Es zeigten sich unterschiedliche Verläufe der Potentiale für beide Gruppen: Mit einem Gipfel etwa 250-300 ms poststimulus zeigte sich eine Negativierung (N2-Komponente), die über der Elektrodenposition FZ bei den Kontrollprobanden für alle Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) eine größere Amplitude aufwies. Anschließend folgte eine Negativierung bei etwa 400 ms nach Stimulusonset (N4-Komponente), die über allen drei Mittellinienelektroden (FZ, CZ und PZ) bei den Kontrollprobanden im Vergleich zu den Dyslektikern der Versuchsgruppe größer war. Ab etwa 500 ms poststimulus folgte eine späte positive Komponente (late positive component=LPC), welche insgesamt bei der Kontrollgruppe und

insbesondere bei der CR-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) am größten war (Abb. 12).

Für die Polarität gilt folgende Konvention: Negative Potentialverläufe sind aufwärts gerichtete Ausschläge und positive Potentialverläufe verlaufen abwärts gerichtet.

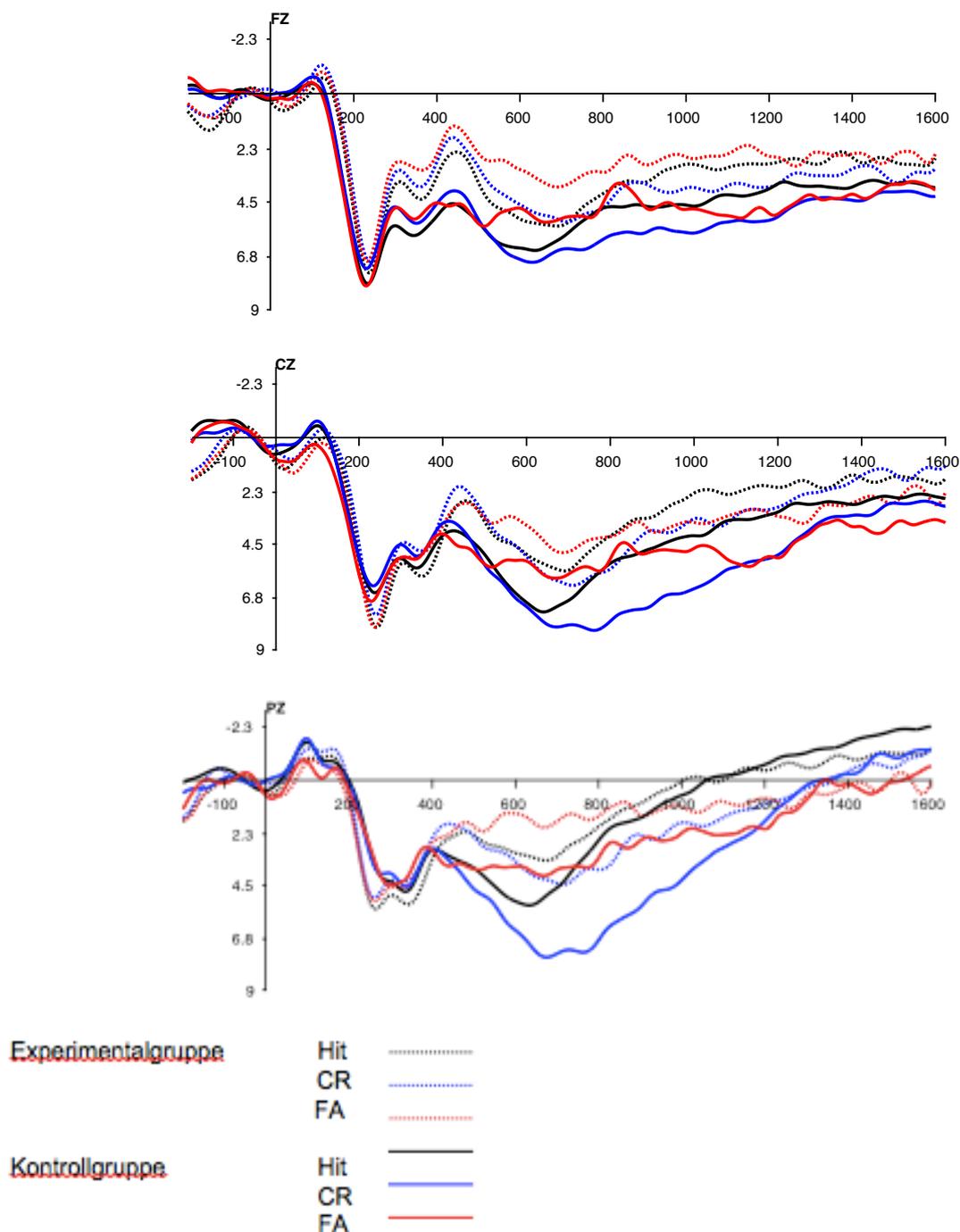


Abb. 12: Gemittelte stimulusbezogene EKPs der Dyslexie- und Kontrollgruppe der drei Bedingungen Hit, CR und FA über den Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ. Negative Ausschläge verlaufen aufwärts gerichtet, positive Ausschläge sind abwärts gerichtet. Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm. y-Achse: Mikrovolt, x-Achse: Millisekunden.

Im Rahmen der statistischen Analyse wurden die einzelnen Komponenten hinsichtlich signifikanter Mittelwertdifferenzen wie folgt untersucht:

N2-Komponente

N2 und N200 werden in der vorliegenden Arbeit synonym verwendet und bezeichnen dieselbe Komponente/denselben Effekt im stimulusbezogenen ereigniskorrelierten Potential.

Für alle drei in die Auswertung eingeschlossenen Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) zeigten sich größere mittlere Amplituden der N2-Komponente bei der Kontroll- gegenüber der Dyslexiegruppe über der Elektrodenposition FZ (Abb. 13).

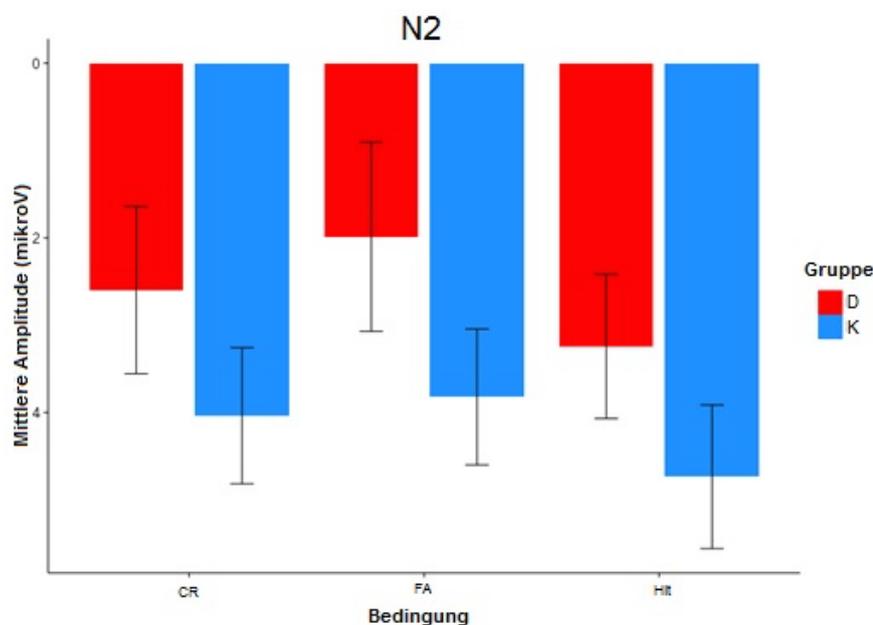


Abb. 13: Graphische Darstellung der mittleren Amplituden und Standardfehler des Mittelwertes des N2-Effekts (220-360 ms poststimulus) für die drei Bedingungen Hit, CR und FA der Dyslexie- und Kontrollgruppe (D und K) über der Elektrodenposition FZ.

MikroV=Mikrovolt, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm, Hit=Treffer.

Zur inferenzstatistischen Analyse wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslexie- und Kontrollgruppe), „Bedingung“ (*Hit*, *CR* und *FA*) und „Elektrodenposition“ (FZ, CZ und PZ) durchgeführt, welche einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Elektrodenposition“ ($F(2,56)=4,61$, $p=0,01$) und eine signifikante Interaktion „Gruppe x Elektrodenposition“ ($F(2,56)=7,74$, $p=0,001$) ergab. Es zeigten sich keine signifikante Interaktion „Gruppe x Bedingung“ ($F(2,56)=0,27$, $p>0,05$) sowie keine dreifach gestufte Interaktion „Gruppe x Bedingung x Elektrode“ ($F(4,112)=0,18$, $p>0,05$). Darüberhinaus

ergaben sich keine weitere signifikante Haupteffekte oder Interaktionen (Tab. 10 im Anhang).

N4-Komponente

N4 und N400 werden in der vorliegenden Arbeit synonym verwendet und bezeichnen dieselbe Komponente/denselben Effekt im stimulusbezogenen EKP. Es zeigten sich größere mittlere Amplituden des N4-Effekts bei der Kontrollgruppe im Vergleich zur Gruppe der Dyslektiker für alle drei in die Auswertung eingegangenen Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) über allen drei Mittellinienelektrode (FZ, CZ und PZ) mit dem größten Unterschied über der Elektrodenposition FZ (Abb. 14).

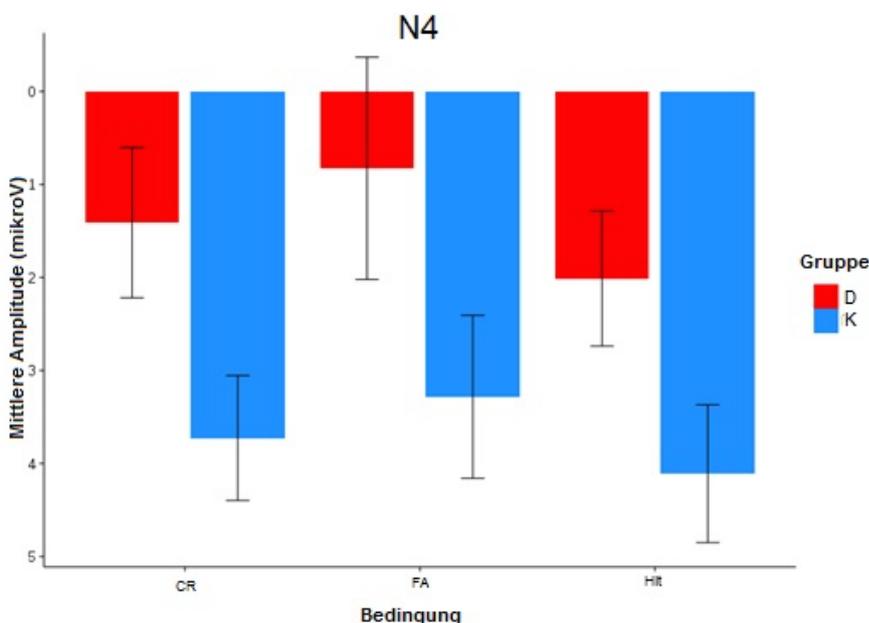


Abb. 14: Graphische Darstellung der mittleren Amplituden und Standardfehler des Mittelwertes der N4-Komponente (380-480 ms poststimulus) für die drei Bedingungen Hit, CR und FA der Dyslexie- und Kontrollgruppe über der Mittellinienelektrode FZ.

MikroV=Mikrovolt, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm, Hit=Treffer, D=Dyslektiker, K=Kontrollen.

Eine anschließend durchgeführte zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslektiker, Kontrollen) und „Bedingung“ (*Hit*, *CR* und *FA*) ergab einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Gruppe“ ($F(1, 28)=4,60$, $p=0,04$) über der Elektrodenposition FZ. Der Haupteffekt „Bedingung“ und die Interaktion „Gruppe x Bedingung“ ergaben keinen signifikanten Effekt (Tab. 11 im Anhang).

In der folgenden Abbildung (Abb. 15) sind die Topographien der Differenzwellen (errechnet aus den gemittelten EKPs im N4-Zeitfenster der Dyslektiker abzüglich

der gemittelten EKP im gleichen Zeitfenster der Kontrollprobanden) für die drei ausgewerteten Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) dargestellt.

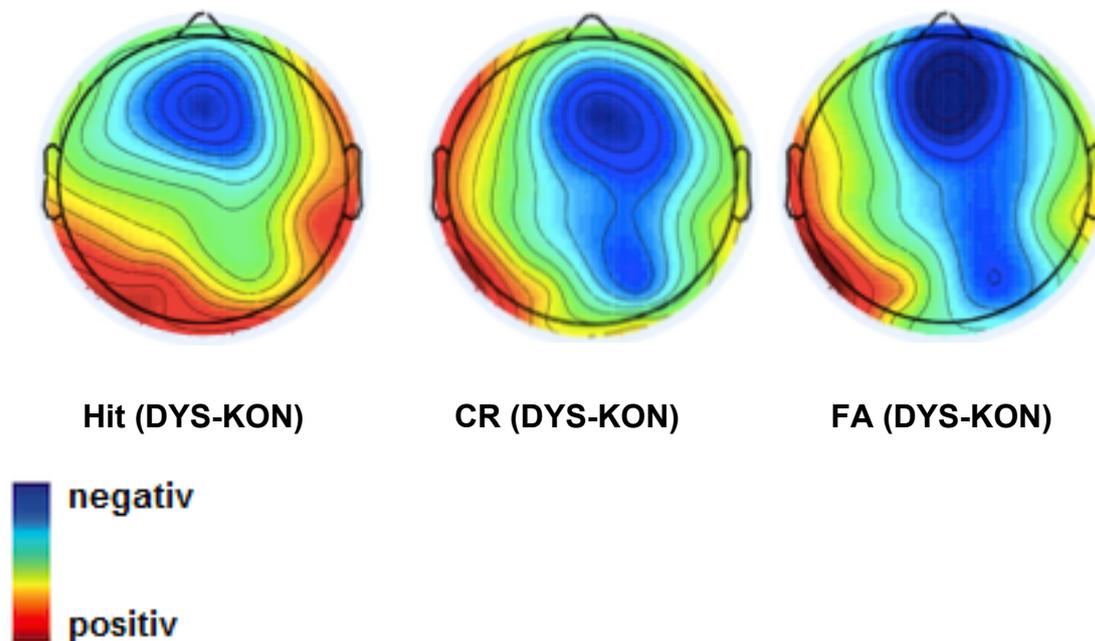


Abb. 15: Topographie der Differenzwellen (Dyslexieprobanden-Kontrollprobanden) im N4-Zeitfenster (380-480 ms poststimulus) der drei Bedingungen Hit, CR und FA. DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, Hit= Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm.

Bei allen drei in die Auswertung eingegangenen Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) zeigte sich eine frontomediane Negativierung, die für die *FA*-Bedingung (false alarm/ falscher Alarm), d.h. die Bedingung nach einer fehlerhaften Reaktion (Antwortgabe), bei den Dyslektikern am stärksten ausgeprägt war.

LPC

Zunächst ist anzumerken, dass z. Zt. keine einheitliche Bezeichnung dieser Komponente existiert. Unter folgenden Bezeichnungen findet sie in der Literatur derzeit Erwähnung: P3, P300, P600 und LPC (late positive component=späte Positivierung). In dieser Arbeit wird sie einheitlich als LPC oder späte Positivierung bezeichnet ohne Bezug darauf zu nehmen, ob es sich bei den genannten Komponenten um ein und dieselbe Entität handelt oder nicht. Es zeigten sich eine größere mittlere Amplituden der LPC bei den Kontrollprobanden im Vergleich zu den Dyslektikern über allen Mittellinienelektroden (FZ, CZ und PZ) mit der größten Ausprägung bei der *CR*-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) über der PZ-Elektrode (Abb. 16).

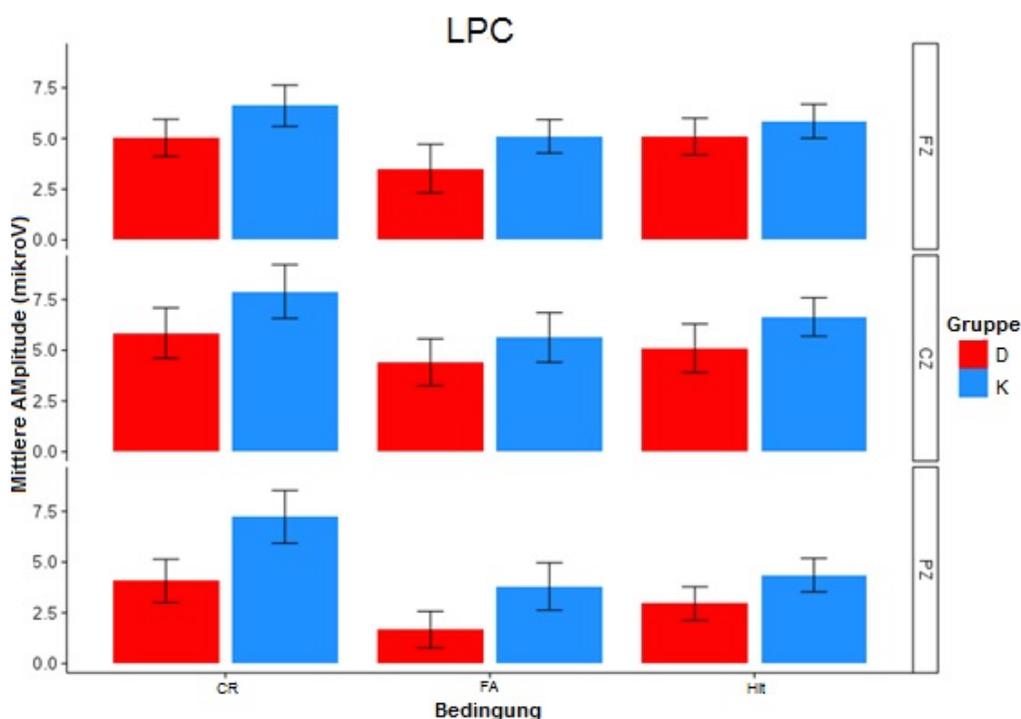


Abb. 16: Graphische Darstellung der mittleren Amplituden und Standardfehler des Mittelwertes der LPC (600-700 ms poststimulus) für die drei Bedingungen Hit, CR und FA über den Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ. MikroV=Mikrovolt, Hit= Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm, D=Dyslektiker, K=Kontrollen.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslexie- und Kontrollgruppe), „Bedingung“ (*Hit*, *CR* und *FA*) und „Elektrodenposition“ (FZ, CZ und PZ) ergab signifikante Haupteffekte für die Faktoren „Bedingung“ ($F(2, 56)=11,33, p<0,001$) sowie „Elektrodenposition“ ($F(2, 56)=8,65, p<0,001$) und eine signifikante Interaktion „Bedingung x Elektrode“ ($F(4, 112)=4,27, p=0,003$). Für den Faktor „Gruppe“ zeigten sich kein signifikanter Haupteffekt sowie keine signifikanten Interaktionen (Tab. 12 im Anhang).

In anschließend durchgeführten Einzelvergleichen mittels t-Tests für unabhängige Stichproben zum Gruppenvergleich pro Bedingung zeigte sich ein Trend ($p=0,07$) für den Gruppeneffekt bei der Elektrodenposition PZ für die *CR*-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung). Für die *Hit*- und *FA*-Bedingungen zeigten sich keine signifikanten Gruppeneffekte (*Hit*: $p=0,24$, *FA*: $p=0,16$, Tab. 13a-c) im Anhang).

Zum Vergleich zwischen den Bedingungen pro Gruppe wurden t-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt und ergaben in der Dyslexiegruppe für die Vergleiche *Hit* vs. *CR* ($p=0,02$) und *FA* vs. *CR* ($p=0,006$) signifikante Unterschiede. Ebenso ergaben sich in der Kontrollgruppe signifikante Unterschiede für *Hit* vs. *CR* ($p=0,001$) und *FA* vs. *CR* ($p=0,0002$). Der Vergleich *Hit* vs. *FA* zeigte in der

Gruppe der Dyslektiker einen Trend ($p=0,06$) und ergab in der Kontrollgruppe einen nicht signifikanten Unterschied ($p=0,44$; Tab. 14a-f) im Anhang).

In der folgenden Abbildung (Abb. 17) sind die Topographien der Differenzwellen für die drei in die Auswertung eingegangenen Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) dargestellt, die sich aus den mittleren Amplituden der LPC (im Zeitfenster 600-700 ms poststimulus) der Kontrollprobanden abzüglich der Dyslexieprobanden errechneten.

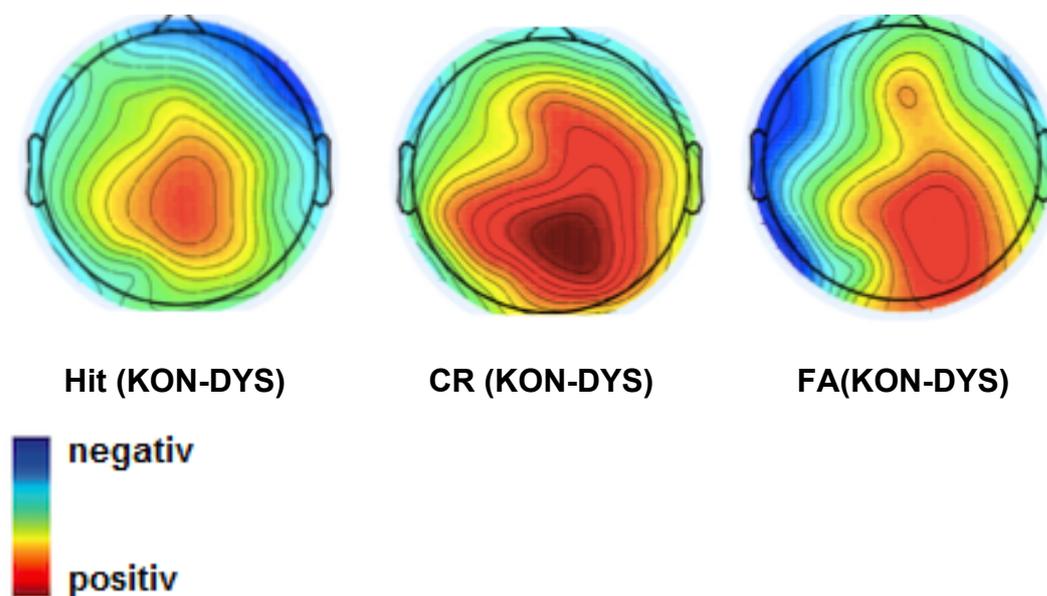


Abb. 17: Topographie der Differenzwellen (Kontrollen-Dyslektiker) der späten Positivierung (LPC) im Zeitfenster 600-700 ms poststimulus für die drei Bedingungen Hit, CR und FA. DYS= Dyslektiker, KON=Kontrollen, Hit= Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm.

Es zeigte sich hier ebenfalls deutlich, dass die *CR*-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) eine stärker ausgeprägte zentroparietale späte Positivierung (LPC) im Vergleich zu den anderen Bedingungen bei den Kontrollprobanden hervorruft.

3.4.1.2 Reaktionsbezogene Analyse

Für die reaktionsbezogene Analyse wurden Epochen 300 ms vor bis 600 ms nach der gegebenen Antwort analysiert. Die Segmente hatten somit eine Länge von 900 ms.

Die Daten wurden mit einem Filter 8. Ordnung bei 4-8 Hz gefiltert, um die theta-Antwort, die sich in diesem Bereich befindet und im Wesentlichen die ERN bildet,

hervorzuheben. Bereits in Arbeiten von z.B. Luu et al. (2004) wurde diese Analyse verwendet und zeigte in diesem Bereich die deutlichsten Effekte der ERN.

In Abb. 18 sind die antwortgemittelten EKPs der Dyslexie- und Kontrollgruppe für alle in die Auswertung eingegangenen Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) über den Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ dargestellt.

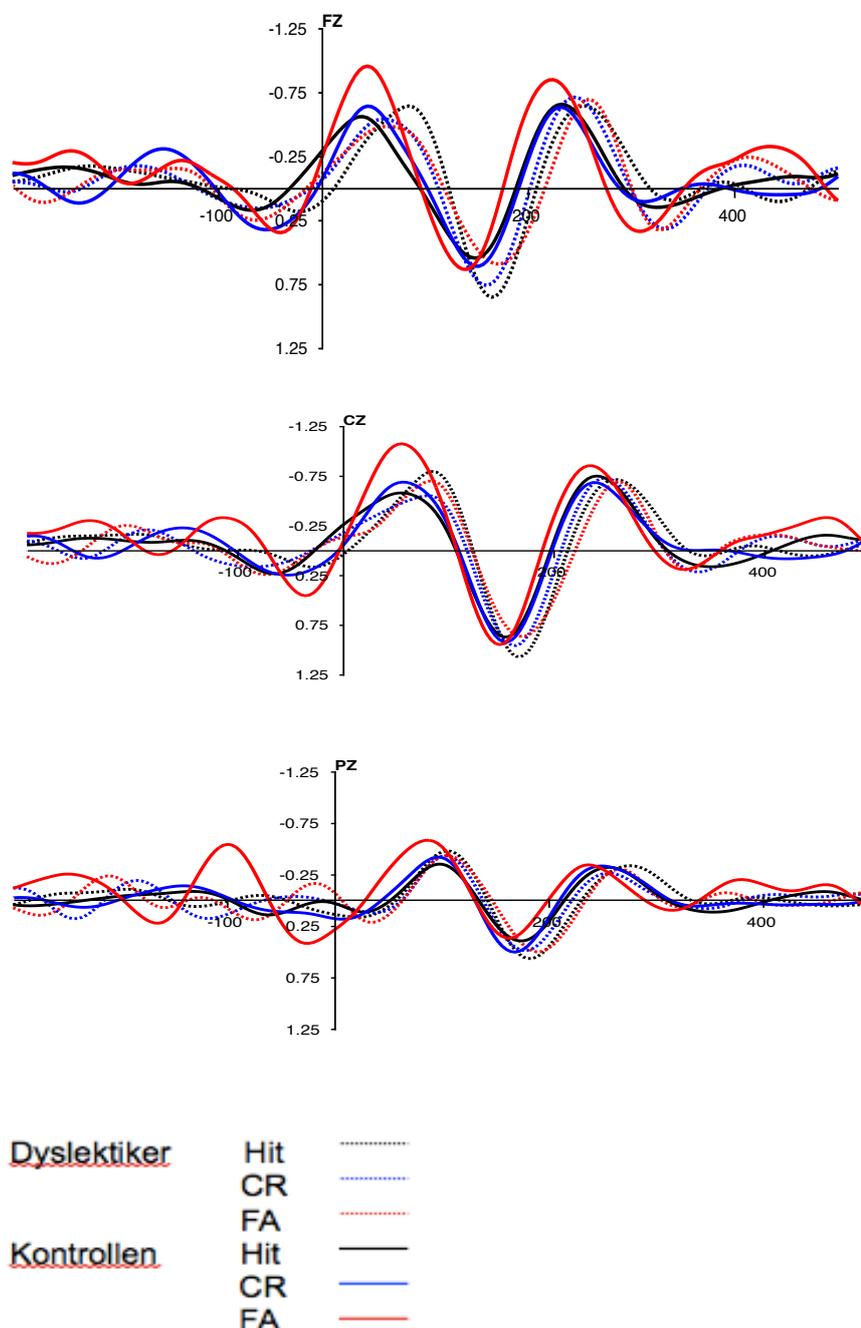


Abb. 18: Graphische Darstellung der antwortgemittelten EKPs der Dyslexie- und Kontrollgruppe der drei Bedingungen (Hit, CR, FA) über den Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ. Negative Ausschläge verlaufen aufwärts gerichtet, positive Ausschläge sind abwärts gerichtet. Alle drei Bedingungen beider Gruppen sind mit einer Negativierung mit einem Maximum etwa 100 ms nach Antwortgabe assoziiert, welche die typischen Charakteristika einer ERN darstellen. y-Achse: Mikrovolt, x-Achse: Millisekunden. Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm.

Im reaktionsbezogenen EKP zeigte sich eine deutliche ERN-Komponente, die mit einer Latenz von 50-100 ms zu einer fehlerhaften Antwortgabe und mit einem negativen Peak mit einer maximalen Ausprägung an den frontozentralen Ableitorten FZ und CZ auftrat. Die mittlere Amplitude der ERN ist bei den Kontrollprobanden in der FA-Bedingung (false alarm/ falscher Alarm) über den Mittellinienelektroden FZ und CZ am größten (Abb. 19) und weist eine kürzere Latenz in allen Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) auf im Vergleich zu der Dyslexiegruppe (Abb. 18).

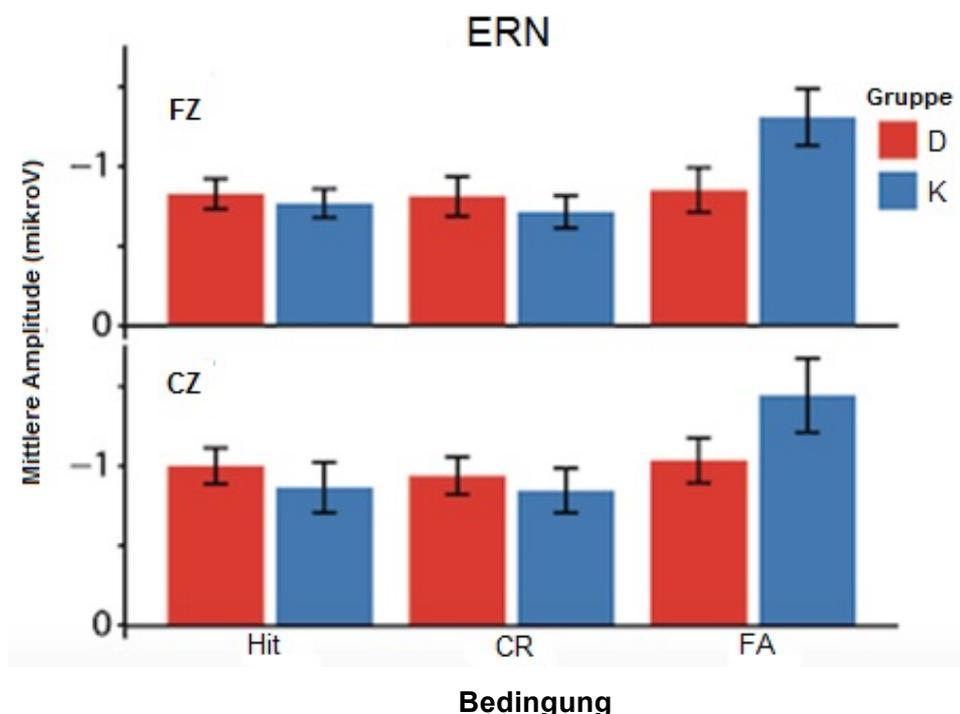


Abb. 19: Mittlere Amplituden und Standardfehler des Mittelwertes der ERN der Dyslexie- und Kontrollprobanden über den Mittellinienelektroden FZ und CZ für die drei Bedingungen Hit, CR und FA. mikroV=Mikrovolt, Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm.

Die mehrfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslexie- und Kontrollgruppe), „Bedingung“ (*Hit*, *CR* und *FA*) und „Elektrodenposition“ (FZ und CZ) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Bedingung“ ($F(2, 56)=8,65, p<0,001$) sowie den Faktor „Elektrodenposition“ ($F(1, 28)=6,91, p=0,01$) und eine signifikante Interaktion „Gruppe x Bedingung“ ($F(2, 56)=6,09, p=0,004$). Darüberhinaus zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt sowie keine signifikanten Interaktionen (Tab. 15 im Anhang).

In der topographischen Darstellung zeigte sich eine mediozentrale Negativierung für die *Hit*-Bedingung (Treffer) bei den Dyslektikern sowie eine deutliche mediozentrale Negativierung bei den Kontrollprobanden für die *FA*-Bedingung (false alarm/ falscher Alarm; Abb. 20).

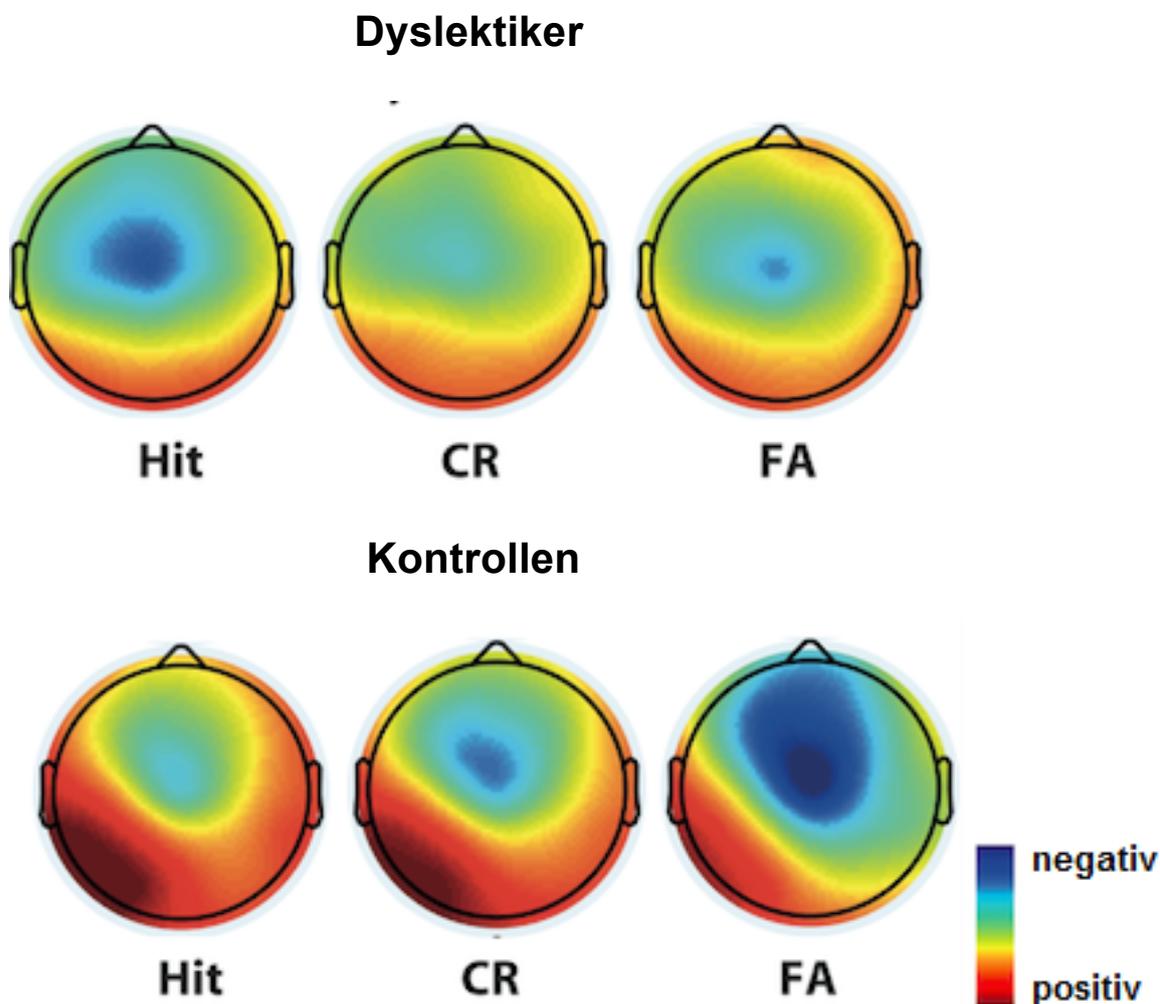


Abb. 20: Topographie der drei in die Auswertung eingegangenen Bedingungen (Hit, CR und FA) der Dyslektiker (oben) und Kontrollprobanden (unten).
 Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, FA=false alarm/ falscher Alarm.

3.4.2 Studie 2

3.4.2.1 Stimulusabhängige Analyse

Für die EEG-Daten des zweiten Paradigmas wurde eine stimulusbezogene Analyse durchgeführt.

In Abb. 21 sind die gemittelten stimulusbezogenen EKPs der Dyslexie- und Kontrollgruppe für die beiden in die Auswertung eingegangenen Bedingungen *Hit* (Treffer) und *CR* (korrekte Zurückweisung) über den Mittellinienelektroden FZ, CZ

und PZ dargestellt. Im Mittel bestand die *Hit*-Bedingung bei den Dyslektikern aus 88.6 und bei den Kontrollprobanden aus 96.9 Trials. Die *CR*-Bedingung setzte sich aus 87.7 (Dyslexiegruppe) und 97.5 (Kontrollgruppe) Trials zusammen. Die *FA*-Bedingung sowie die *Miss*-Bedingung wurden aufgrund einer zu geringen Anzahl an Trials (jeweils <10), um ein aussagefähiges EKP zu generieren von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Für die Analyse wurden die Daten 200 ms prästimulus bis 1200 ms nach Stimulusonset ausgewertet. Die Epochen hatten somit eine Länge von 1400 ms. Als Stimulus diente jeweils ein Wort bestehend aus acht Buchstaben und zwei Silben, welches zuerst akustisch über Lautsprecherboxen von einem deutschen Muttersprachler dargeboten wurde und anschließend in richtiger oder falscher Schreibweise Buchstabe für Buchstabe (alle 150 ms ein Buchstabe) in der Mitte des Bildschirms erschien. Nach etwa 1,2 Sekunden erschien in der Bildschirmmitte die Frage „R-i-c-h-t-i-g-?“, woraufhin die Vp per Mausklick eine Richtig- oder Falsch-Entscheidung treffen sollte. Die Hälfte der Wörter wurde in korrekter und die andere Hälfte in falscher Schreibweise (ein inkorrekt Buchstabe) dargeboten.

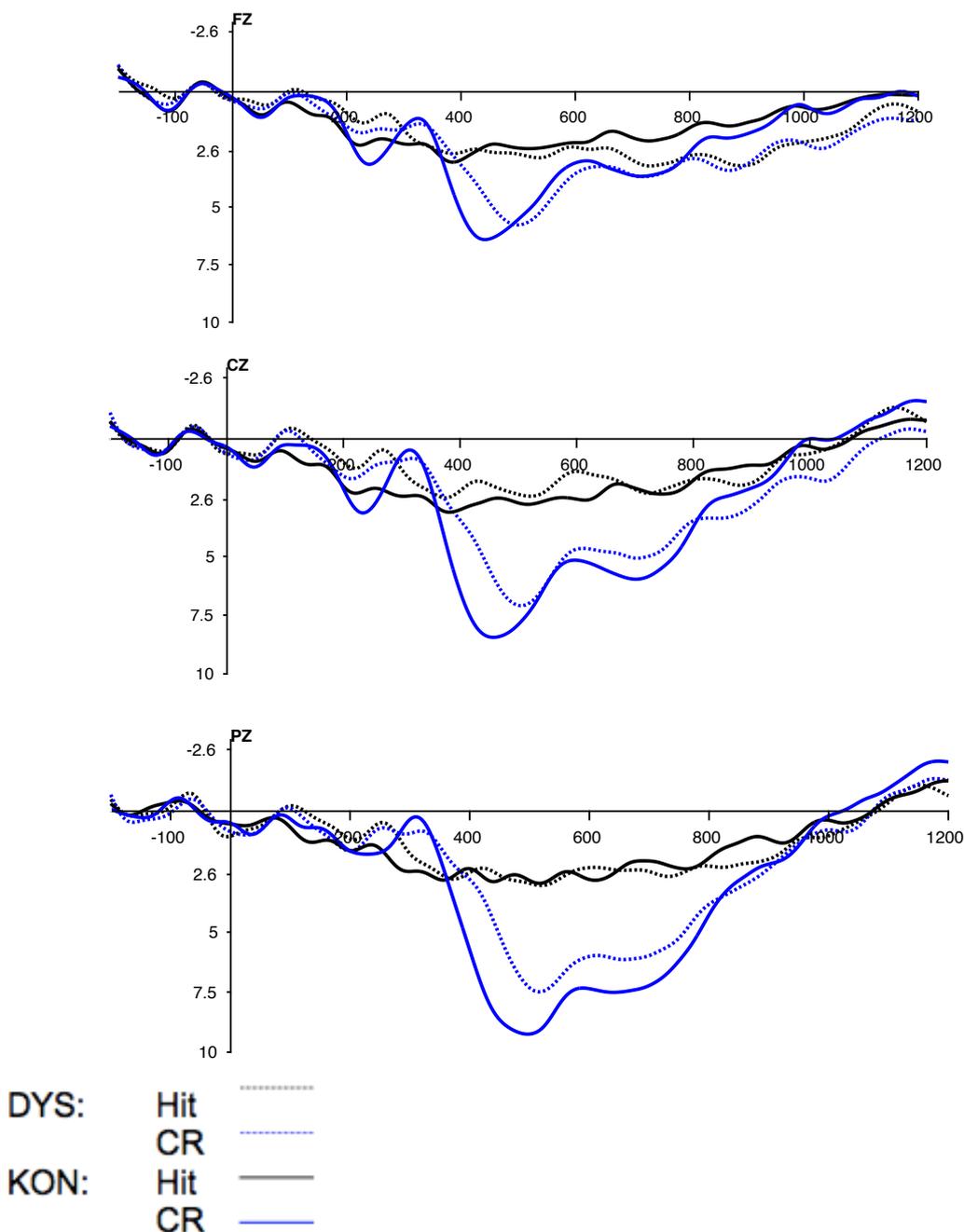


Abb. 21: Gemittelte stimulusabhängige EKPs der Dyslexie- (DYS) und Kontrollgruppe (KON) der zwei Bedingungen Hit (Treffer) und CR (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) über den Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ. Negative Ausschläge verlaufen aufwärts gerichtet, positive Ausschläge sind abwärts gerichtet. y-Achse: Mikrovolt, x-Achse: Millisekunden.

Die EKPs der CR-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) zeigen eine frontozentrale Negativierung, gefolgt von einer Negativierung, die Ihre maximale Ausprägung zentroparietal über der Elektrodenposition PZ etwa bei 360 ms nach Stimulusonset hat und eine späte Positivierung (LPC) mit maximaler Ausprägung um etwa 700 ms poststimulus zentroparietal. Die Potentialverläufe der Dyslexie- und Kontrollgruppe stellen sich mit unterschiedlicher Ausprägung dar.

Zeitfenster 280-380 ms poststimulus

Beim Vergleich der topographischen Verteilung der mittleren Amplituden der Dyslexie- und Kontrollgruppe im Zeitfenster der 280-380 ms nach Stimulusonset, zeigte sich eine bilaterale parietotemporale Verteilung der Negativierung bei der Kontrollgruppe, die sich bei den Dyslektikern nicht ergab (Abb. 22).

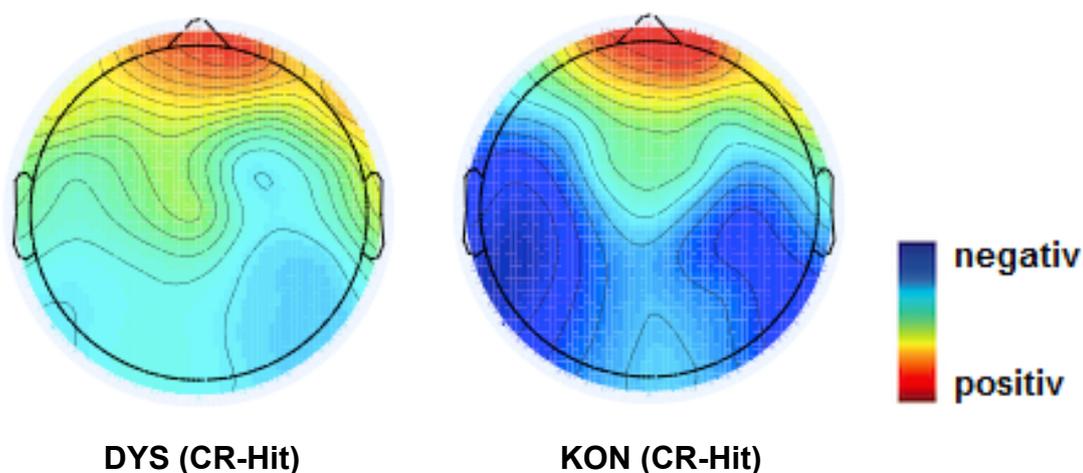


Abb. 22: Topographie der Differenzwellen (CR-Hit) im Zeitfenster 280-380 ms poststimulus der Dyslexie- (DYS) und Kontrollgruppe (KON).
Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung.

Zeitfenster 260-320 ms poststimulus

Es folgte die Betrachtung der Negativierung im genannten Zeitfenster getrennt für zentrale (FZ, CZ und PZ), parasagittale (F, FC, C, CP, P und PO) und laterale Ableitelektrodenpositionen (F, FC, CP, T und P), um die Lokalisation des bedeutsamsten Effektes zu ermitteln.

Zentrale Elektrodenpositionen FZ, CZ und PZ

Über den zentralen Elektrodenpositionen FZ, CZ und PZ zeigten sich deutlich größere mittlere Amplituden der Negativierung für die *CR*-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) in der Gruppe der Kontrollprobanden im Vergleich zu den Dyslektikern. Für die *Hit*-Bedingung (Treffer) stellte es sich umgekehrt dar, d.h. die mittleren Amplituden der Negativierung bei den Dyslektikern waren größer über allen drei Ableitelektroden als bei den Kontrollprobanden (Abb. 23).

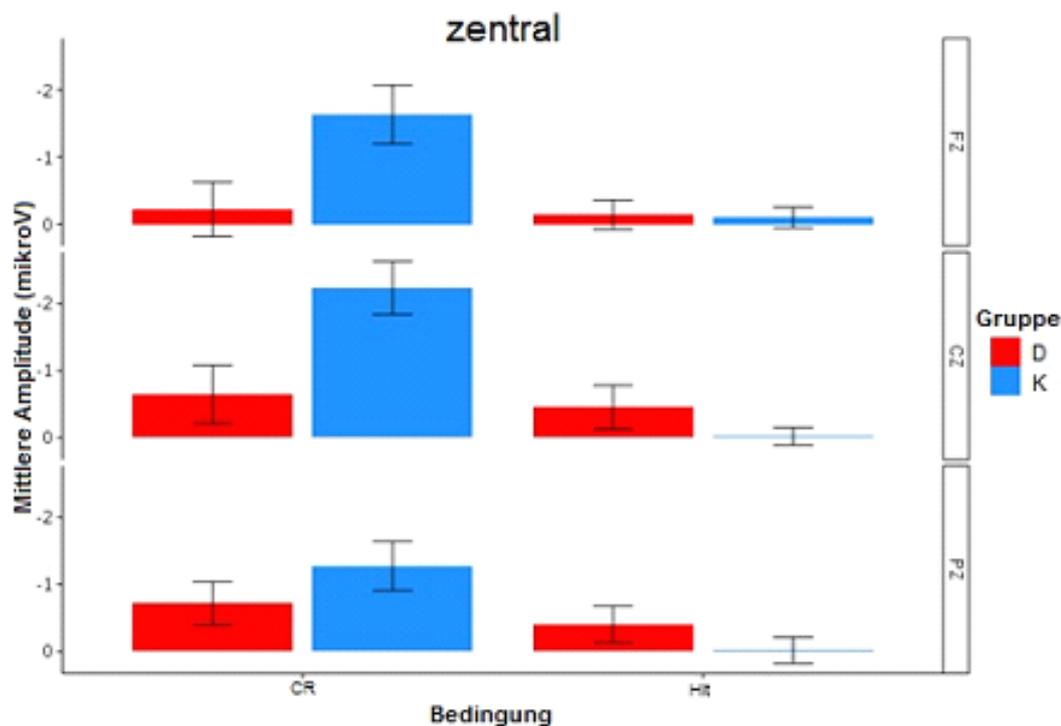


Abb. 23: Graphische Darstellung der Negativierung (260-320 ms poststimulus) der Dyslexie- (D) und Kontrollgruppe (K) über den zentralen Elektrodenpositionen FZ (frontozentral), CZ (zentral) und PZ (parietozentral). MikroV=Mikrovolt, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, Hit=Treffer.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslexie- und Kontrollgruppe), „Bedingung“ (*Hit* und *CR*) und „Elektrodenposition“ (FZ, CZ und PZ) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Bedingung“ ($F(1, 31)=16,00$; $p<0,001$) und eine signifikante Interaktion „Gruppe x Bedingung“ ($F(1, 31)=9,57$; $p=0.004$), d.h. die beiden Bedingungen (*Hit* und *CR*) unterscheiden sich signifikant in den gemittelten Amplituden der Negativierung. Ebenso unterscheiden sich die beiden Gruppen in beiden Bedingungen signifikant.

Es ergaben sich keine weiteren signifikanten Haupteffekte oder Interaktionen (Tab. 16 im Anhang). Insgesamt deuteten die Ergebnisse darauf hin, dass sich die Ausprägung der gemittelten Amplituden der Negativierung über den zentralen Elektrodenpositionen FZ, CZ und PZ nicht unterscheiden.

Parasagittale Elektrodenpositionen F, FC, C, CP, P und PO

Über den parasagittalen Elektrodenpositionen F, FC, C, CP und P zeigten sich bei den Kontrollprobanden im Gegensatz zu den Dyslektikern deutlich größere mittlere Amplituden der Negativierung über der linken und der rechten Hemisphäre in der *CR*-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung). Lediglich an der

parietookzipitalen Elektrodenposition PO über der linken Hemisphäre zeigte sich dieser Effekt nicht (Abb. 24).

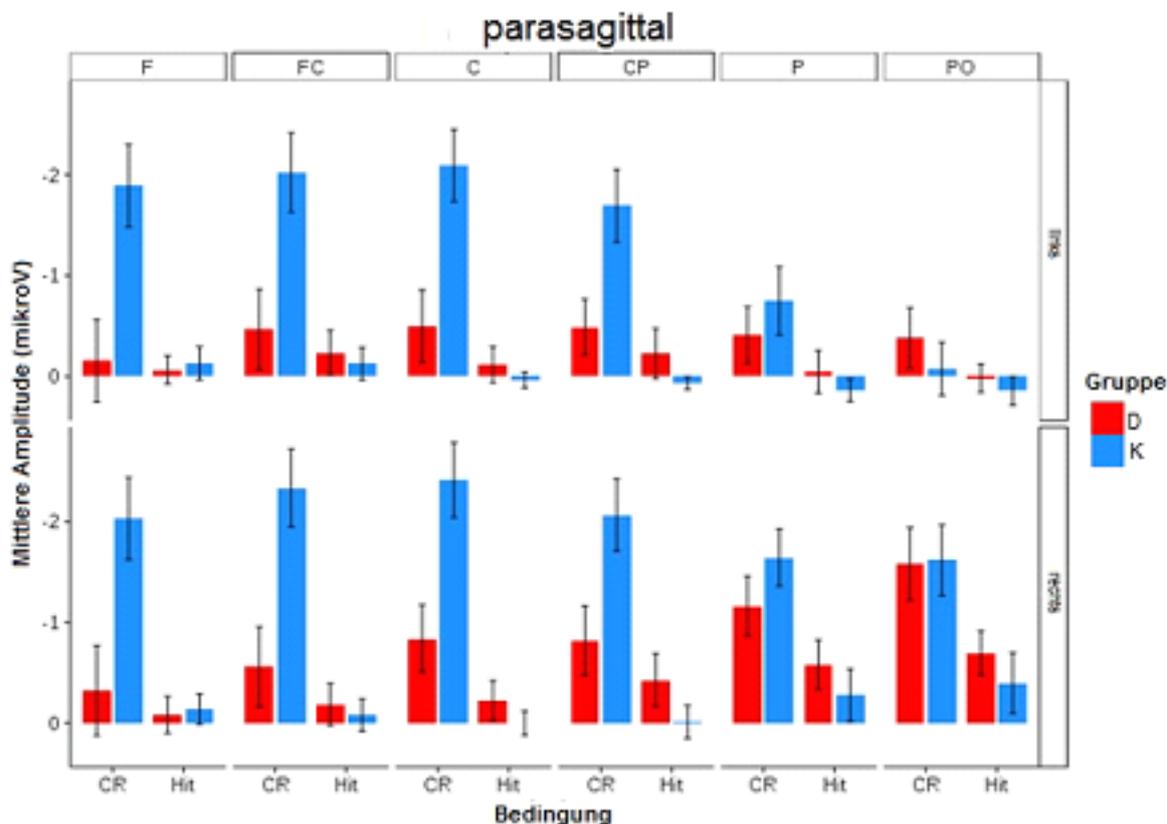


Abb. 24: Graphische Darstellung der mittleren Amplituden und Standardfehler des Mittelwertes der Negativierung im Zeitfenster 260-320 ms poststimulus der Dyslexie- (D) und Kontrollgruppe (K) für die beiden in die Auswertung eingegangenen Bedingungen Hit und CR über den parasagittalen Elektrodenpositionen F, FC, C, CP, P und PO.

MikroV=Mikrovolt, Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung.

Eine anschließend durchgeführte mehrfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslexie- und Kontrollgruppe), „Bedingung“ (*Hit* und *CR*), „Hemisphäre“ (rechte und linke) und „anterior-posteriore Elektrodenpositionen“ (F, FC, C, CP, P und PO) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Bedingung“ ($F(1, 31)=25,98; p<0,001$) sowie den Faktor „Hemisphäre“ ($F(1, 31)=16,95; p<0,001$). Darüberhinaus ergaben sich eine signifikante Interaktion für „Gruppe x Bedingung“ ($F(1, 31)=9,31, p=0,005$), „Gruppe x anterior-posteriore Elektrodenposition“ ($F(5, 155)=4,73; p<0,001$), „Bedingung x Hemisphäre“ ($F(1, 31)=7,31; p=0,01$), „Bedingung x anterior-posteriore Elektrodenposition“ ($F(5, 155)=3,47; p=0,005$), „Hemisphäre x anterior-posteriore Elektrodenposition“ ($F(5, 155)=20,26; p<0,001$) sowie signifikante dreistufige Interaktionen für „Gruppe x Bedingung x anterior-posteriore Elektrodenposition“ ($F(5, 155)=6,13; p<0,001$)

und "Bedingung x Hemisphäre x anterior-posteriore Elektrodenposition" ($F(5, 155) = 2,75$; $p = 0,02$; Tab. 17 im Anhang).

In anschließend durchgeführten Paarvergleichen zwischen den Gruppen mittels t-Tests für unabhängige Stichproben ergaben sich für die *CR*-Bedingung für die Elektrodenposition F (frontal; $p = 0,005$), C (zentral; $p = 0,004$) über der linken Hemisphäre (Tab. 18a) im Anhang) und für F (frontal; $p = 0,008$), FC (frontozentral; $p = 0,003$) und C (zentral; $p = 0,004$) über der rechten Hemisphäre (Tab. 18b) im Anhang) signifikante Unterschiede zwischen der Dyslexie- und Kontrollgruppe. Alle weiteren parasagittalen Elektrodenpositionen der linken und rechten Hemisphäre zeigten keine signifikanten Gruppenunterschiede für die *CR*-Bedingung (Tab. 18a),b) im Anhang).

Für die *Hit*-Bedingung (Treffer) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der Dyslexie- und Kontrollgruppe über den parasagittalen Ableitelektroden der linken und rechten Hemisphäre (s. Tab. 18c),d) im Anhang).

Zum Vergleich zwischen den Bedingungen pro Gruppe wurden t-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt. Diese ergaben in der Dyslexiegruppe für keine der parasagittalen Elektrodenpositionen über der linken und rechten Hemisphäre signifikante Unterschiede (Tab. 19a),b) im Anhang). In der Kontrollgruppe zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen *Hit* vs. *CR* über der linken Hemisphäre für die Elektrodenpositionen F (frontal; $p = 0,001$), FC (frontozentral, $p < 0,001$), C (zentral, $p < 0,001$) und CP (zentroparietal, $p < 0,001$; Tab. 19c)) sowie über der rechten Hemisphäre für die Ableitelektroden F (frontal, $p < 0,001$), FC (frontozentral, $p < 0,001$), C (zentral, $p < 0,001$), CP (zentroparietal, $p < 0,001$), P (parietal, $p = 0,001$) und PO (parietookzipital, $p = 0,002$; Tab. 19d) im Anhang).

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass sich die bedeutsamsten Unterschiede zwischen der Dyslexie- und Kontrollgruppe für die *CR*-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) über den frontalen Ableitelektroden (F) der rechten und linken Hemisphäre zeigten.

In der Kontrollgruppe zeigten sich signifikante Unterschieden zwischen den Bedingungen *Hit* vs. *CR* über den frontozentralen (F, FC und C) und zentroparietalen (CP) Elektrodenpositionen linkshemisphärisch sowie allen parasagittalen Ableitelektroden der rechten Hemisphäre. Im Gegensatz dazu

zeigten sich in der Dyslexiegruppe keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen.

Da es sich um multiple Einzelvergleiche handelt, wurde die Fehlerwahrscheinlichkeit einer Bonferroni-Korrektur unterzogen (α'/m), um die Kumulierung des alpha-Fehlers zu kompensieren (Bortz et al., 1990).

Laterale Elektrodenpositionen F, FC, CP, T und P

Über allen lateralen Elektrodenpositionen F, FC, CP, T und P zeigte sich eine ausgeprägtere frontozentrale Negativierung sowohl über der linken als auch der rechten Hemisphäre bei den Kontrollprobanden in der CR-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) im Vergleich zu den Dyslektikern (Abb. 25).

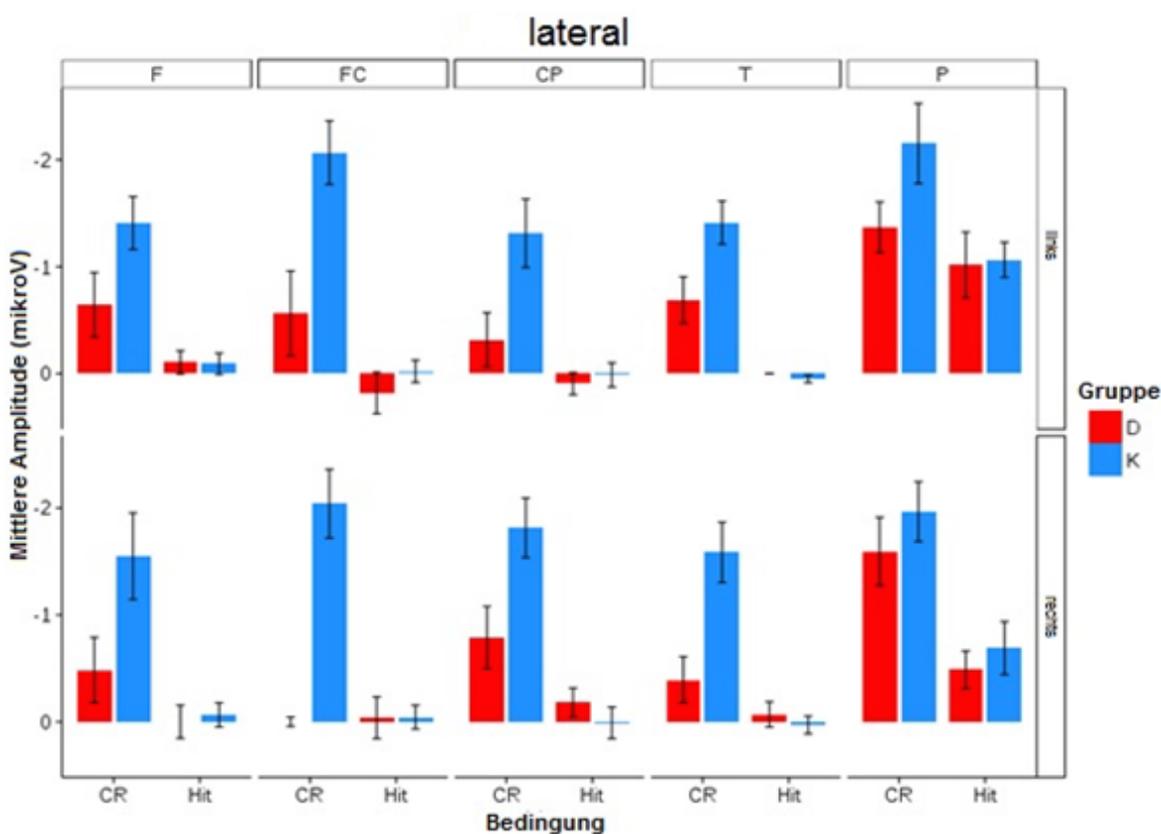


Abb. 25: Graphische Darstellung der mittleren Amplituden und Standardfehler des Mittelwertes der Negativierung im Zeitfenster 260-320 ms poststimulus der Dyslexie- (D) und Kontrollprobanden (K) für die zwei Bedingungen Hit und CR über den lateralen Elektrodenpositionen F, FC, CP, T und P. MikroV=Mikrovolt, Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslexie- und Kontrollgruppe), „Bedingung“ (Hit und CR), „Hemisphäre“ (rechte und linke) und „anterior-posteriore Elektrodenposition“ (F, FC, CP, T und P) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Gruppe“ ($F(1, 31)=14,73$; $p<0,001$), für

den Faktor „Bedingung“ ($F(1, 31)=55,28$; $p<0,001$) sowie für den Faktor „anterior-posteriore Elektrodenposition“ ($F(4, 124)=19,29$; $p<0,001$). Zudem ergaben sich eine signifikante Interaktion „Hemisphäre x anterior-posteriore Elektrodenposition“ ($F(4, 124)=3,35$; $p=0,01$) und eine dreistufige Interaktion „Bedingung x Hemisphäre x anterior-posteriore Elektrodenposition“ ($F(4, 124)=3,28$; $p=0,01$), wodurch sich auch statistisch der Effekt der erhöhten frontozentralen Negativierung bei den Kontrollprobanden zeigte.

Des Weiteren zeigten sich keine signifikanten Haupteffekte oder Interaktionen (Tab. 20 im Anhang).

LPC

Es fiel ein Effekt für die CR-Bedingung (correct rejection/ korrekte Zurückweisung) auf: Die LPC ist in der CR-Bedingung über allen drei Mittellinienelektroden (FZ, CZ und PZ) bei der Kontrollgruppe größer ausgeprägt mit dem größten Unterschied zwischen den Gruppen an der parietozentralen Elektrodenposition PZ (Abb. 26).

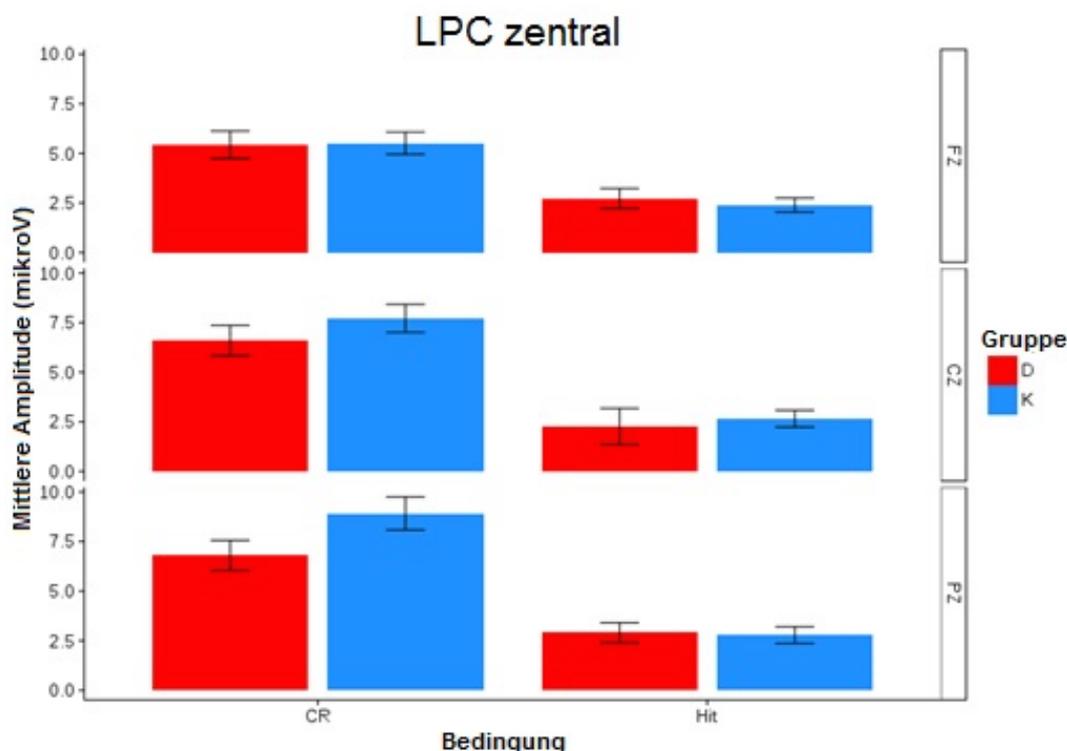


Abb. 26: Graphische Darstellung der mittleren Amplituden und Standardfehler des Mittelwertes der späten Positivierung (LPC; 550-650 ms poststimulus) der Dyslexie- (D) und Kontrollprobanden (K) für die zwei Bedingungen Hit und CR über den zentralen Elektrodenpositionen FZ, CZ und PZ. MikroV=Mikrovolt, Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Gruppe“ (Dyslexie- und Kontrollgruppe), „Bedingung“ (*Hit* und *CR*) und „Elektrodenposition“ (FZ, CZ und PZ) ergab einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Bedingung“ ($F(1, 31)=86,40, p<0,001$) und den Faktor „Elektrodenposition“ ($F(2, 62)=7,97, p<0,001$) sowie eine signifikante Interaktion „Bedingung x Elektrode“ ($F(2, 62)=19,75, p<0,001$) und eine signifikante dreistufige Interaktion „Gruppe x Bedingung x Elektrode“ ($F(2, 62)=3,59, p=0,03$), wodurch sich der Effekt der größeren mittleren Amplitude der LPC für die *CR*-Bedingung über der parietozentralen Elektrodenposition PZ bei den Kontrollprobanden statistisch bestätigte. Es ergaben sich darüberhinaus keine weiteren signifikanten Haupteffekte oder Interaktionen (Tab. 21 im Anhang).

Bei der topographischen Verteilung der Differenzwellen zeigte sich im Zeitfenster 550-650 ms poststimulus bei den Kontrollprobanden eine deutlich ausgeprägte Positivierung über der parietozentralen Elektrodenposition, die bei den Dyslektikern nicht nachgewiesen werden konnte (Abb. 27).

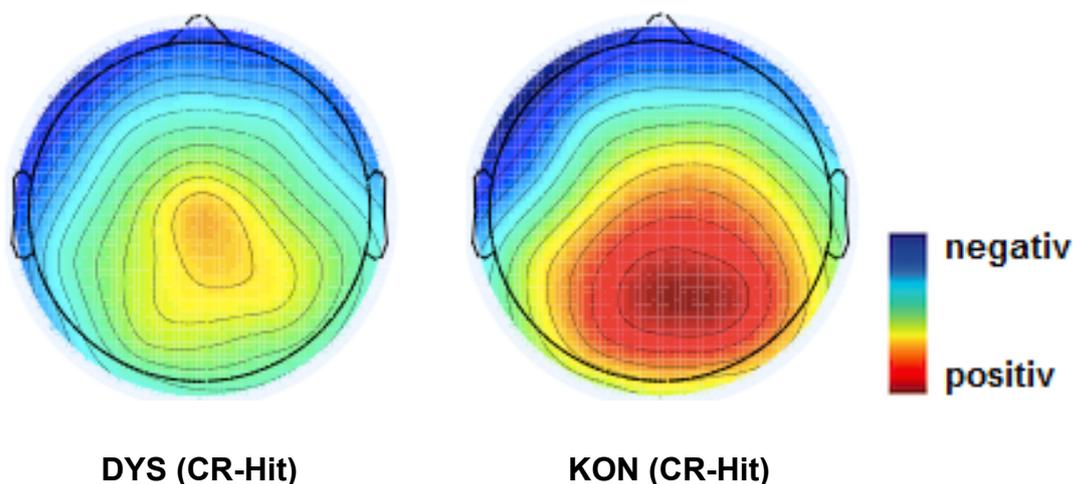


Abb. 27: Topographie der Differenzwellen (CR-Hit) der Dyslexie- (DYS) und Kontrollgruppe (KON) im Zeitfenster 550-650 ms poststimulus.
Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung.

3.4.2.2 Reaktionsbezogenen Analyse

Aufgrund der verfrühten Antwortgabe der V_p (d.h. bereits vor der Frage: „R-i-c-h-t-i-g-?“) konnte keine antwortbezogene Analyse durchgeführt werden.

4 Diskussion

Jede Handlung ist mit dem Risiko behaftet, einen Fehler zu begehen. Die menschliche Evolution wird bestimmt von der erfolgreichen Anpassung an veränderte Bedingungen, dem Lernen aus Fehlern und dem daraus erworbenen Wissen.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel mithilfe elektrophysiologischer Untersuchungsmethoden nachzuweisen, dass die neuralen Korrelate der Fehlerdetektion und des Konfliktmonitorings bei Menschen mit einer LRS bei der Konfrontation mit Rechtschreibfehlern im Gegensatz zu gesunden Personen ohne LRS verändert sind. Dies äußert sich bei Dyslektikern in einer verminderten Fehlerbewusstheit im Sinne einer verringerten Handlungskontrolle.

Mittels antwortbezogener EKPs sollte die ERN-Komponente als Zeichen eines Antwortkonflikts und Kontrolle der Klassifizierung von korrekt und inkorrekt geschriebenen Wörtern beim Lesen dargestellt und untersucht werden. Es sollte gezeigt werden, dass gesunde Probanden eine mediofrontale Negativierung als Zeichen der Fehlersensitivität beim Erscheinen des falschen Buchstabens zeigen und dass diese bei Dyslektikern als Hinweis auf eine herabgesetzte Fehlersensitivität vermindert ist.

Die beiden neuartigen Versuchsaufbauten zur Untersuchung der orthographischen Fehlersensitivität beim Lesen bei gesunden und dyslektischen Erwachsenen sollten hinsichtlich ihrer Eignung reliable (stimulus- und anwortbezogene) EKPs zu generieren verglichen werden.

Zunächst wurde das Vorliegen einer Dyslexie nach dem IQ-Diskrepanzkriterium mittels eines Rechtschreibtests (Lückendiktat „Moselfahrt“) und eines Intelligenztests (WIE) festgestellt (Dyslexiegruppe) bzw. ausgeschlossen (Kontrollgruppe). In einer anschließenden zweiten Sitzung wurden die neuralen Korrelate der Fehlersensitivität mittels einer EEG-Messung unter der Verwendung der ERN-Komponente sowie der mediofrontalen Negativierung untersucht.

Hierzu wurden insgesamt 29 erwachsene (Mindestalter 18 Jahre) Versuchsteilnehmer mittels einem Lückendiktat („Moselfahrt“) und dem IQ-Test WIE untersucht. Nach einer Selektion erfolgte die Einteilung der Dyslektiker in die Dyslexiegruppe (8 Probanden) und die parallelisierte Einteilung der gesunden Probanden in die Kontrollgruppe (8 Probanden). Es folgte die EEG-Untersuchung

mit der Worterkennungstestung am PC. In die Datenanalyse wurden insgesamt 16 (9 Dyslektiker, 7 Kontrollprobanden) in Magdeburg unter gleichen Bedingungen getestete Probanden aufgenommen und mit ausgewertet. Wegen ungleicher drop-outs bei der Datenanalyse wurden zusätzlich drei lübecker Kontrollprobanden rekrutiert und getestet.

Im Folgenden soll zunächst auf die einzelnen diagnostischen Testverfahren eingegangen werden und abschließend die elektrophysiologischen Ergebnisse zusammenfassend diskutiert werden.

4.1 Diagnostische Daten

Rechtschreibungstest R-T „Moselfahrt“

Zur Ermittlung des Rechtschreibniveaus wurde das Lückendiktat „Moselfahrt“ ausgewählt, da es sich hierbei um einen häufig eingesetzten Test zur Bestimmung der Rechtschreibleistung handelt (Schulte-Körne, 2010). Er enthält Normierungen nach Lebensalter, Geschlecht und Schulbildung.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Versuchsgruppen, erwartungskonform sowie gemäß der Definition der Dyslexie, hinsichtlich ihrer Rechtschreibleistung signifikant voneinander unterschieden. Gesunde Vp erbrachten eine alters- und bildungsentsprechende Rechtschreibleistung, wohingegen die Leistung der Dyslektiker im Lückendiktat deutlich unterhalb dessen blieb, was aufgrund ihres (normalen) IQ zu erwarten war.

Intelligenztest WIE

Die Ergebnisse des Intelligenztests zeigten, dass sich die beiden Gruppen mit und ohne Dyslexie, erwartungsgemäß sowie entsprechend den Einschlusskriterien und der Definition der Dyslexie, hinsichtlich ihres IQ nicht signifikant voneinander unterschieden. Darüberhinaus lagen sie über einem IQ 85 und damit im Normalbereich. In beiden Studien fiel auf, dass der mittlere IQ der Kontrollprobanden über dem der Dyslexieprobanden (Studie 1: 116 vs. 108; Studie 2: 116 vs. 109) lag, was dadurch erklärt werden könnte, dass die Gruppe der Kontrollprobanden im Gegensatz zu den Dyslexieprobanden überwiegend aus Studenten (v.a. der Humanmedizin) bestand. Allgemein lag das

Schulbildungsniveau in der Kontrollgruppe höher, was den beobachteten Unterschied am ehesten erklären könnte.

Da sich die mittleren IQ der Gruppen nicht signifikant unterschieden, kann festgehalten werden, dass die Parallelisierung erfolgreich war.

4.2 Verhaltensdaten

Reaktionszeiten

Die Ergebnisse der Analyse der Reaktionszeiten der ersten Studie replizierten die Befunde aus vorausgegangenen Studien, in denen Vp mit Dyslexie im Vergleich zu gesunden Probanden ohne Dyslexie bei Aufgaben, die das Wortlesen erforderten, signifikant langsamer antworteten (z.B. Rüsseler et al., 2007). Verantwortlich gemacht werden kann hierfür u.a. die herabgesetzte Lesegeschwindigkeit, welche ein Kernsymptom der Dyslexie darstellt (Schulte-Körne und Remschmidt, 2003). Moll und Kollegen (2005) veröffentlichten einen Einzelfallbericht über Messungen der Lesegeschwindigkeit eines erwachsenen deutschen Muttersprachlers mit Dyslexie und berichteten dort von einer herabgesetzten Lesegeschwindigkeit sowohl für Pseudowörter, seltene, aber auch geläufige Wörter, wobei die Anzahl der Augenfixationen nicht erhöht war. Sie interpretierten die verlangsamte Lesegeschwindigkeit als Beeinträchtigung einzelner phonologischer Verarbeitungsprozesse, die in der Folge zu einer Ineffizienz (nicht Unfähigkeit) beim Lesevorgang führen.

Eine Aussage darüber welcher Teilprozess bzw. welche Teilprozesse bei der Verarbeitung beim Lesen bei Dyslektikern möglicherweise beeinträchtigt und für die reduzierte Lesegeschwindigkeit verantwortlich sind, kann hier nicht getroffen werden und bedarf weiterer Abklärung in künftigen Studien.

D-Prime/ Fehlerraten

Die errechneten D-Prime-Variablen d' geben Aufschluss über die reine Leistungskomponente bei der Klassifizierung der Schreibweise der Vp unabhängig von der individuellen Reaktionsneigung (Näheres s. 2.3.3.4.2 Auswertung der EEG-Daten → D-Prime).

Die D-Prime-Variablen d' waren in beiden Studien bei den Dyslektikern im Vergleich zu den gesunden Vp deutlich vermindert. In den inferenzstatistischen Analysen zeigten sich signifikant niedrigere Werte der Dyslektiker im Vergleich zu

den Kontrollprobanden. Somit boten die Dyslexieprobanden eine signifikant schlechtere Leistung bei der Klassifizierung korrekt und inkorrekt geschriebener Wörter als die Vp der Kontrollgruppe.

Zusammengefasst deuten die Befunde der Verhaltensdaten auf größere Schwierigkeiten der Dyslektiker bei der Aufgabenbewältigung, d.h. der Klassifizierung korrekt und inkorrekt geschriebener Wörter in einer begrenzten Zeitspanne, hin.

4.3 EEG-Daten

Zunächst wird auf die erwartete ERN-ähnliche Komponente als Zeichen des auftretenden Antwortkonflikts bei der Kontrolle der Wortklassifizierung in den antwortbezogenen EKPs eingegangen.

Anschließend wird die erwartete mediofrontale Negativierung bei falsch geschriebenen Wörtern als Zeichen der Fehlersensitivität diskutiert und auf die nachgewiesenen sprachbezogenen Komponenten in den stimulusbezogenen Daten eingegangen.

Antwortbezogene Analyse: ERN

Erwartungsgemäß zeigten sich in den antwortbezogenen gemittelten EKPs in beiden Gruppen ERN-ähnliche Komponenten.

Das Auftreten einer ERN in den antwortbezogenen EKPs beider Gruppen in der *FA*-Bedingung (false alarm/ falsche Alarme), d.h. nach einer fehlerhaften Antwortgabe, kann als Zeichen eines auftretenden Antwortkonflikts interpretiert werden, welcher sowohl bei den Kontrollprobanden als auch bei den Dyslektikern bei der Kontrolle der Klassifizierung der Schreibweise auftrat. Dieser zeigte sich bei den Dyslektikern vermindert, was sich in der signifikanten Interaktion „Gruppe x Bedingung“ ($p=0,004$) statistisch bestätigte. Dass sich keine signifikante dreistufige Interaktion „Gruppe x Bedingung x Elektrodenposition“ ergab ($p>0,05$), lässt sich durch den nahezu gleichen Potentialverlauf über den frontozentralen Elektrodenpositionen FZ und CZ erklären.

Zusammengefasst handelt es sich bei der ERN um eine antwortbezogene negative Komponente, die mit einer Latenz von 50-100 ms nach einer fehlerhaften Antwortgabe an frontozentralen Ableitelektroden auftritt (Gehring et al., 1993). Ihr Maximum erreicht das Potential bei etwa 100 ms nach Antwortgabe (Coles et al.,

2001) (Näheres s. Abschnitt 1.3.2.2 Error-related-negativity (ERN)). Eine Vielzahl an Studien berichtete davon, dass wenn Fehler in Versuchsaufbauten zu kognitiven Fragestellungen begangen werden, es zur Aktivierung eines neuronalen Mechanismus kommt, der in der Folge eine negative elektrische Komponente auslöst, welche als ERN bezeichnet wird (Horowitz-Kraus, 2012). Der Mechanismus der Fehlerdetektion, als Teil des kognitiven Prozesses der Handlungskontrolle, dient der Vermeidung von Fehlerwiederholungen und dadurch der Modifizierung und Anpassung des künftigen Verhaltens.

Horowitz-Kraus und Breznitz (2011) beschrieben eine kleinere Amplitude der ERN-Komponente bei Dyslektikern und interpretierten dies als geringere Aktivierung des Fehlerdetektionsmechanismus bei Dyslektikern, wodurch es in der Folge zu einer erhöhten Anzahl an Fehlern kommt. Allerdings muss hinzugefügt werden, dass die verwendete Schriftsprache bei ihrer Studie hebräisch war, welche sich erheblich von der deutschen bzw. englischen Schriftsprache unterscheidet.

Die reduzierte ERN-Amplitude in der Dyslexiegruppe lässt sich auch in dieser Studie durch einen verringerten Antwortkonflikt (als Ausdruck einer verminderten Handlungskontrolle) als Folge einer verminderten Fehlerdetektion bei den Dyslektikern interpretieren. Dass v.a. in der fehlerbehafteten *FA*-Bedingung (false alarm/ falscher Alarm), aber auch in reduzierter Ausprägung in den Durchgängen nach korrekter Klassifizierung (*Hit*/ Treffer und *CR*/ korrekte Zurückweisung) eine ERN-ähnlichen Komponente auftrat, lässt sich entsprechend der Konfliktüberwachungstheorie (*conflict-monitoring model*) erklären. Diese besagt, dass eine ERN-Komponente als Zeichen eines Antwortkonflikts zwischen zwei (oder mehr) Antwortmöglichkeiten auftritt und die Amplitude der ERN umso ausgeprägter ist, je größer dieser Antwortkonflikt ausfällt (Botvinick et al., 2001).

Bei den Potentialverläufen der korrekten Durchgänge (*Hit=Treffer* und *CR=korrekte Zurückweisung*) in den antwortbezogenen EKPs fiel auf, dass sich die Potentialverläufe zwischen den Gruppen zwar nicht voneinander unterscheiden, es aber zu der *FA*-Bedingung sehr ähnlichen Verläufen mit deutlich kleineren Amplituden kam.

Coles und Kollegen (2001) führten dies auf einen der beiden folgenden oder beide Faktoren zurück, die hier möglicherweise ebenfalls eine Rolle gespielt haben könnten: (1) Die ERN-Komponente als Zeichen des auftretenden Antwortkonflikts bei der Fehlerverarbeitung erfolgt auch bei korrekten Trials und/oder (2) die

antwortbezogenen gemittelten Potentiale, von denen die ERN stammt, sind mit negativen Komponenten (ausgelöst durch den Stimulus) kontaminiert, die einer ERN-Komponente sehr ähnlich sehen können.

Eine ERN-ähnliche Aktivität ist bereits mehrfach bei korrekten Trials beschrieben worden: Beispielsweise berichteten Vidal und Kollegen (2000) von einer kleinen ERN-ähnlichen Komponente nach korrekter Antwortgabe bei einer Auswahl Aufgabe, welche ebenfalls frontozentral lokalisiert war und einen gleichen zeitlichen Verlauf wie die ERN in inkorrekten Durchgängen aufwies. Sie schlossen daraus, dass die ERN primär einen Abgleichprozess widerspiegelt, der erst sekundär zu einer Fehlerdetektion führt. Dieser Abgleichprozess kann als Teil des Antwortkonflikts angesehen werden und für die kleinen ERN-ähnlichen Komponenten in den Trials nach korrekter Antwortgabe verantwortlich gemacht werden. Diese Annahme stellt auch eine mögliche Erklärung des Auftretens von einer ERN-ähnlichen Komponente nach korrekter Klassifikation der Schreibweise der vorliegenden Arbeit dar. Auch die verminderte Amplitude in korrekten Durchgängen wäre insofern zu erklären, als dass der primäre Abgleichprozess alleine eine ERN auslöst und im Falle einer sekundären Fehlerdetektion, die Amplitude weiter zunimmt. Bleibt die Fehlerdetektion aus, vergrößert sich auch nicht die ERN-Amplitude (wie im Fall korrekter Trials).

Coles und Kollegen (2001) zeigten, dass trotz sichtbaren korrekten Reaktionen unterschwellige Aktivierungen fehlerhafter Reaktionen stattfinden können, durch welche potentiell Prozesse der Fehlerverarbeitung initiiert werden können. Sie postulierten, dass der Fehlerverarbeitungsprozess bei korrekten Reaktionen auf Probleme bei der Repräsentation der korrekten Reaktion (hier der korrekten Antwortgaben durch entsprechenden Mausklick) zurückgeführt werden kann. Eine ERN-Komponente nach korrekten Reaktionen ist somit vereinbar mit der Annahme, dass die ERN an Abweichungen von der Repräsentation einer Reaktion gebunden und spezifisch für Prozesse der Fehlerentdeckung und des Antwortkonflikts ist. Möglicherweise spielten Probleme bei der Reaktionsrepräsentation auch in dieser Arbeit eine Rolle, verstärkt durch das zeitliche Limit für die Antwortgabe, wodurch es zu ERN-ähnlichen Komponenten nach korrekter Klassifikation gekommen ist.

Bezüglich der möglichen Kontaminierung der antwortbezogenen gemittelten EKPs durch negative Komponenten durch die stimulusbezogenen Daten ist anzumerken, dass sie theoretisch denkbar ist, da es ein grundsätzliches Problem darstellt,

stimulusbezogene Komponenten bei der Erstellung antwortbezogener Mittelungen zu eliminieren. Folglich kann es zu Ausschlägen in antwortbezogenen EKPs kommen, die einer ERN-Komponente zwar sehr ähneln, aber nichts mit der gegebenen Antwort zu tun haben. Sie reflektieren vielmehr residuelle stimulusbezogene Aktivität, die durch den Mittelungsprozess nicht entfernt werden konnte. In der Tat zeigten sich in der vorliegenden Arbeit in den stimulusbezogenen EKPs des ersten Paradigmas negative Komponenten, die für diesen Effekt verantwortlich gemacht werden könnten, was aber durch den durchgeführten Mittelungsprozess und v.a. die Reaktionszeiten in Bezug auf die Stimuluspräsentation (>900 bzw. >1000 ms) als sehr unwahrscheinlich erachtet bzw. praktisch ausgeschlossen werden kann.

Auch eine mögliche Sinnestäuschung durch die zu identifizierenden Stimuli durch Ermüdung oder Ablenkung als Auslöser einer ERN (Scheffers et al., 1999) ist hier als unwahrscheinlich anzusehen, da ausschließlich einfach zu identifizierende Stimuli in Form von geläufigen, acht Buchstaben langen Wörtern mit zwei Silben verwendet wurden (z.B. Brötchen, Esel, Kamel).

Luu und Kollegen (2000) beobachteten einen Einfluss zeitlicher Parameter auf korrekte Trials. Bewegungsparameter, die mit der Ausführung der Antwortgabe (hier dem Mausklick des rechten Zeige- oder Mittelfingers) bei Aufgaben mit einem zeitlichen Limit assoziiert sind, führten bei einer korrekten, aber verlangsamt gegebenen Antwort zu einer ERN-Komponente. Allerdings wird bei Betrachtung der Reaktionszeiten beider Gruppen insgesamt und pro Bedingung deutlich, dass beide Gruppen in den korrekten Trials deutlich kürzere Reaktionszeiten aufwiesen als in den inkorrekten Trials, wodurch sich diese Beobachtungen von Luu et al. (2000) hier nicht replizieren ließen.

Abschließend kann am ehesten davon ausgegangen werden, dass die ERN-Komponente als Zeichen eines auftretenden Antwortkonflikts ausgelöst durch den Prozess der Handlungskontrolle, d.h. im Speziellen der Kontrolle der Klassifizierung der dargebotenen Schreibweise, auftritt. Dieser Antwortkonflikt tritt sowohl nach korrekter als auch nach inkorrekt Klassifizierung auf, jedoch mit einer deutlich größeren Amplitude nach fehlerhafter Antwortgabe, da diese zu einem stärkeren Antwortkonflikt führt als die korrekte Antwortgabe. Die verminderte mittlere ERN-Amplitude der Dyslektiker (im Vergleich zu der mittleren ERN-Amplitude der Kontrollprobanden) unterstützt die Hypothese, dass die

neuronalen Korrelate der Fehlerdetektion und des Konfliktmonitorings bei Menschen mit einer Dyslexie bei der Konfrontation mit Rechtschreibfehlern reduziert sind.

Stimulusbezogenen Analyse: N2-Komponente

In den stimulusbezogenen EKPs zeigte sich eine N2-Komponente in beiden Gruppen bei allen drei in die Auswertung eingegangenen Bedingungen (*Hit/Treffer*, *CR/ korrekte Zurückweisung* und *FA/ falscher Alarm*).

In der schließenden Statistik ließ sich dennoch kein relevant signifikanter N2-Effekt nachweisen. Die für die Komponente interessante Interaktion „Gruppe x Bedingung“ und die dreifachgestufte Interaktion „Gruppe x Bedingung x Elektrode“ wurden in der inferenzstatistischen Analyse nicht signifikant.

Einige EKP-Studien registrierten eine N200 als Antwort auf Wörter bzw. Buchstabenfolgen als Stimulusmaterial (Bentin et al., 1999). Die frontozentrale N2-Komponente, die ihren Ursprung im ACC hat und zwischen 300-500 ms nach Stimulusonset in stimulusbezogenen EKPs zu beobachten ist, wird in Verbindung mit dem Prozess des Konfliktmonitorings gebracht (Yeung et al., 2004). Das Auftreten eines N2-Effekts wurde in Studien beobachtet, die eine Eriksen-Flanker-Aufgabe als Stimulusmaterial verwendeten (Eriksen und Eriksen, 1974). Diese wird zur Untersuchung der visuellen Aufmerksamkeit eingesetzt. Die klassische Flanker-Aufgabe besteht aus mehreren visuellen Einzelreizen, wobei die Vp für den zentralen Zielreiz eine einfache Klassifikationsentscheidung treffen und dabei gleichzeitig dargebotenen Störreize (flanker) ignorieren soll. Es zeigte sich, dass obwohl die Flankierreize für die Klassifikationsentscheidung irrelevant sind, diese die Entscheidung beeinflussen: Bei *kongruente/kompatiblen* Reizen erfolgt die Entscheidung deutlich schneller als bei *inkongruenten/inkompatiblen* Durchgängen, da die Flankierreize nicht vollständig ignoriert werden können. Dieses Phänomen nennt sich flanker-Interferenz oder flanker-Effekt. Nach Eriksen und Eriksen (1974) entsteht die flanker-Interferenz bei der Handlungsauswahl während dem Prozess der Informationsverarbeitung. Es wurde eine größere Amplitude der N2-Komponente in *inkongruenten* als in *kongruenten* Trials beobachtet (Yeung et al., 2004). Andere Studien zeigten die N2-Komponente nur bei Durchgängen mit *inkongruenten* Reizen. Folglich wurde sie mit der Konfliktdetektion in Verbindung gebracht. Danielmeier und Kollegen (2009) berichteten von einer zunehmenden N2-Amplitude, je näher die Störreize dem Zielreiz sind.

Mahé und Kollegen (2014) untersuchten bei erwachsenen dyslektischen und gesunden Vp u.a. die N2-Komponente und zeigten, dass ihre Amplitude bei *inkongruenten* Trials bei den Kontrollprobanden größer ausfiel als bei *kongruenten* Trials. Im Gegensatz dazu blieb dieser Effekt bei den Dyslexieprobanden aus. Sie deuteten diesen Befund als einen gestörten Prozess des Konfliktmonitorings bei Dyslektikern. Veränderungen der N2-Komponente bei Dyslektikern sind bereits in Untersuchungen mit anderem Stimulusmaterial bzw. anderen Aufgaben beschrieben worden (Dhar et al., 2008; Jednoróg et al., 2011).

Es ist anzunehmen, dass der N2-Effekt im ersten Paradigma in den stimulusbezogenen EKPs den Prozess der Konfliktdetektion in beiden Gruppen (Dyslektiker und Kontrollen) anzeigte. Visuell wurde den Probanden zunächst eine Strichzeichnung eines Objekts präsentiert und anschließend die entsprechende Bezeichnung in korrekter oder inkorrekt Schreibweise dargeboten. Von Ihnen wurde schließlich die Klassifizierung der Schreibweise (durch den entsprechenden Mausklick) gefordert. Dass sich inferenzstatistisch kein signifikanter Gruppenunterschied nachweisen ließ (lediglich ein Unterschied bezüglich der Elektrodenposition), ist möglicherweise auf den eingesetzten Versuchsaufbau bzw. die verwendeten Stimuli, die Anforderungen bei der Aufgabenbewältigung oder die Zusammensetzung der Charakteristika beider Versuchsgruppen oder die Größe der Studienpopulation zurückzuführen. Dies bedarf einer weiteren Abklärung in künftigen Untersuchungen mit größeren Fallzahlen und einem modifizierten Versuchsaufbau (bspw. durch Modulation der Stimuli).

N4-Komponente

Es zeigten sich stimulationsbezogene Aktivierungsunterschiede in den beiden Gruppen für die N4-Komponente über der frontozentralen Elektrodenposition FZ. Die gemittelten Amplituden des N4-Effektes waren in allen drei in die Auswertung eingegangenen Bedingungen (*Hit=Treffer*, *CR=korrekte Zurückweisung* und *FA=falscher Alarm*) in der Kontrollgruppe größer als in der Dyslexiegruppe bzw. zeigten sich in der Dyslexiegruppe reduzierte mittlere Amplituden mit einer topographisch ausgeprägtesten Negativierung in der *FA*-Bedingung (*false alarm=falscher Alarm*), was sich inferenzstatistisch bestätigte.

Die N4-Komponente tritt als eine Komponente der Wortverarbeitung auf und variiert systematisch mit der Verarbeitung semantischer Information (Kutas und Federmeier, 2000). Sie reflektiert den Zugang zum orthographischen Lexikon als Teilprozess der Wortverarbeitung (Hasko et al., 2013). Unter denen mit der Sprache in Verbindung stehenden Komponenten ist sie die am besten erforschte (Luck, 2005).

Im Jahr 1980 beschrieben Kutas und Hillyard erstmals die N400 bei einem Paradigma, bei welchem Wort für Wort ein Satz bestehend aus insgesamt sieben Wörtern präsentiert wurde. In 25% der Fälle passte das letzte Wort nicht sinnvoll in den Kontext, d.h. es war semantisch *inkongruent* (Bsp.: „Ich nehme einen Kaffee mit Milch und *Hund*.“). Auf die *inkongruente* Satzendung folgte im stimulusbezogenen EKP eine negative Komponente, die ca. 250 ms nach Stimulusonset begann und ihr Maximum bei etwa 400 ms nach Erscheinen des Stimulus hatte, weshalb sie N400 genannt wurde. Die N400 zeigte sich nicht nur bei semantischer Abweichung am Satzende, sondern auch in der Satzmitte (Kutas und Hillyard, 1993). Jedoch sind semantische Anomalien keine notwendige Voraussetzung für das Auftreten dieser Komponente. *Kongruente*, aber in überraschender Weise auftretende Satzendungen lösen ebenfalls eine N400 aus (van Petten und Kutas, 1990). Ebenso können nicht-sprachliche Stimuli eine N4-Komponente auslösen, vorausgesetzt, sie haben eine Bedeutung: Z.B. löst eine Strichzeichnung eine N400 aus, wenn sie nicht vereinbar mit dem semantischen Kontext ist, der durch eine zeitlich vorausgegangene Abfolge von Wörtern oder Strichzeichnungen erzeugt wurde (Ganis et al., 1996). Eine N400 wurde zudem bei Aufgaben mit unpassenden Gesichtern als Stimulusmaterial gefunden (Barrett et al., 1988). Darüberhinaus tritt ein N4-Effekt bei Paradigmen auf, bei welchen ein sinnhafter Satz unerwartet beendet wird (Bsp.: Die Rechnung wurde fällig *zum Ende der Sitzung*; anstelle von: *zum Ende des Monats*). Außerdem konnte sie auch unter weiteren Versuchsbedingungen repliziert werden: bspw. bei Experimenten mit semantischer Bahnung (sog. Priming). Durch Priming wird die Verarbeitung eines Reizes dadurch beeinflusst, dass ein vorausgehender Reiz bereits implizite Gedächtnisinhalte aktiviert hat und dadurch die Wortverarbeitung erleichtert ist (Bsp.: „In der Küche steht ein Tisch mit Stühlen.“ → das Wort *Tisch* bahnt semantisch das Wort *Stühle*). Holcomb und Neville (1990) berichteten von einem Priming-Effekt sowohl für visuelle als auch für auditive Reize: In zwei Paradigmen (mit jeweils visuellem oder auditivem Stimulusmaterial) wurden den

Vp Wortpaare bestehend aus einem Bahnungswort gefolgt von der gleichen Anzahl semantisch *kongruenter* Wörter, *inkongruenter* Wörter, Pseudowörter (z.B. einzelne Silben) oder Nichtwörter (nicht existent in der jeweiligen Sprache) präsentiert. In der visuellen und auditiven Modalität zeigte sich eine kleinere N4-Komponente für die zweiten Wörter, die einen semantischen Bezug zu den Bahnungswörtern hatten oder anders gesagt: Es zeigte sich eine größere N4-Komponente, wenn die zweiten Wörter nicht durch das erste Wort semantisch gebahnt worden sind. Die N4-Komponente kann also als Marker einer enttäuschten Erwartung beruhend auf semantischer Bahnung angesehen werden und zeigt somit die semantische Bewertung eines Wortes an (Kutas und Hillyard, 1989). In einer Übersichtsarbeit von Kutas und Federmeier (2011) wurde von einer N4-Komponente während Aufgaben berichtet, die sowohl die Verarbeitung geschriebener als auch gesprochener Sprache beinhalteten. Es ist nach wie vor unklar, ob die N400 einen lexikalischen oder post-lexikalischen (oder sogar beide) Verarbeitungsprozesse anzeigt (Hasko et al., 2013).

Die N400 ist charakterisiert durch einen monophasischen negativen Ausschlag mit einem Maximum zwischen 200-600 ms nach Stimulusonset und der größten Ausprägung über zentroparietalen Ableitorten mit einer leichten Lateralisierung zur rechten Hemisphäre (Kutas und Federmeier, 2011). Untersuchungen von split brain Patienten (Z.n. Callosotomie) haben allerdings ergeben, dass die N400 in der linken Hemisphäre generiert wird (Kutas et al., 1988). Ihre Amplitude variiert in Abhängigkeit davon, wie gut ein Wort in den Kontext eines Satzes passt: Es besteht eine umgekehrte Proportionalität zwischen der Erwartungswahrscheinlichkeit (*cloze probability*) und der Amplitudenhöhe der N400 (Kutas und Hillyard, 1984). Die Höhe der Amplitude spiegelt die Stärke des Aktivierungsprozesses im semantischen Lexikon wider (Rösler und Hahne, 1992). Die Latenz der N4-Komponente ist sehr stabil (Kutas und Federmeier, 2011).

In einer Reihe von Studien mit erwachsenen Dyslektikern und Kontrollprobanden wurden reduzierte N400-Amplituden in unterschiedlichen Versuchsaufbauten berichtet. Stelmack und Kollegen (1988) beobachteten eine schlechtere Worterkennungsleistung bei Probanden mit einer LRS und in diesem Zusammenhang eine Reduktion der N4-Komponente. Sie deuteten diesen Befund als ein Zeichen von Schwierigkeiten der Dyslektiker bei Abrufprozessen aus dem semantischen Langzeitgedächtnis. Andere Autoren konnten die abnorme Aktivierung der N400 nicht bestätigen (Neville et al., 1993; Rüsseler et al., 2003).

Johannes und Kollegen (1995) zeigten einen Unterschied der N4-Komponente zwischen gesunden und dyslektischen Lesern in Abhängigkeit von der Worthäufigkeit: Bei hochfrequenten Wörtern war die N400-Amplitude im Vergleich zu niedrigfrequenten Wörtern reduziert. Dieser Effekt zeigte sich bei Dyslektikern stärker ausgeprägt. Davon ausgehend vermuteten sie, dass die Reduktion der N400 bei Dyslektikern aus einer verstärkten semantischen Integration hochfrequenter Wörter resultiert. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, wie bereits in anderen Studien genannt (bspw. Landwehrmeyer et al., 1990), dass dadurch Defizite auf einer anderen Ebene der Wortverarbeitung ausgeglichen werden. Die widersprüchlichen bzw. nicht einheitlichen N400-Antworten unter den genannten Studien könnten auf eine Vielzahl von Faktoren zurückzuführen sein: Zu diesen gehören u.a. die eingesetzte Aufgabenart und den verwendeten Stimulustyp, die Präsentationsweise und Charakteristika der Stichproben bzw. die Stichprobengröße.

Die reduzierte Amplitude der N4-Komponente in der Gruppe der Dyslektiker bei der Worterkennungsaufgabe der ersten Studie deutet auf eine verringerte Aktivierung der zugrundeliegenden Verarbeitungsprozesse in Form einer möglichen semantischen Störung beim Wortlesen hin. Dies ließe sich gemäß der genannten Erkenntnisse durch eine Beeinträchtigung der Dyslektiker beim Abruf semantischen Gedächtnisinhalts erklären. Durch die Verhaltensdaten wurde bereits gezeigt, dass die Dyslektiker signifikant größere Schwierigkeiten bei der Klassifizierung korrekt und inkorrekt geschriebener Wörtern aufwiesen (erniedrigter d' im Vergleich zu der Kontrollgruppe). Die reduzierte N400-Amplitude bei den Dyslektikern ließe sich in Anlehnung an Johannes et al. (1995) möglicherweise auch dadurch erklären bzw. könnte sie dadurch beeinflusst worden sein, dass die präsentierten Wörter eher hochfrequent als niedrigfrequent waren und als Ausdruck des gesteigerten semantischen Integrationsprozesses von Wörtern mit hoher Frequenz zu einer geringeren Aktivierung und somit einer kleineren N400-Amplitude führten. Dies müsste in künftigen Studien mit einer anderen Auswahl an Wörtern als Stimulusmaterial überprüft werden. Allerdings fand Rugg (1984) keine Veränderung der N400 bei orthographischer Manipulation des Stimulusmaterials.

Dass sich das lokale Maximum der N400-Amplitude nicht wie klassischerweise beschrieben zentroparietal, sondern frontozentral darstellte, ist u.a. von Curran

(1999) beschrieben und in Verbindung mit der Registrierung von Vertrautem gebracht worden. Coch und Kollegen (2002) beschrieben eine Abhängigkeit des topographischen Amplitudenmaximums von der Art des Stimulusmaterials. Sie berichteten, dass bei Wortleseaufgaben eine frontal lokalisierte N4-Komponente evoziert wird. Um über die an der Entdeckung orthographischer Fehler beteiligten Hirnareale/Netzwerke eine genauere Aussage treffen zu können, sind funktionell-bildgebende Untersuchungsmethoden ergänzend von großer Bedeutung, da diese durch eine bessere örtliche Auflösung zugrundeliegende Aktivierungsmuster erheblich zuverlässiger lokalisieren können.

Zusammenfassend kann allgemein festgehalten werden, dass zwischen den beiden Gruppen eine ungleiche Ausprägung der N4-Komponente registriert wurde, die sich in Form einer reduzierten Amplitude in der Dyslexiegruppe zeigte. Vor den oben beschriebenen empirischen Befunden ist diese Beobachtung am ehesten auf eine veränderte Aktivierung (in Form einer Verringerung) der zugrundeliegenden Wortverarbeitungsprozesse im semantischen Langzeitgedächtnis zurückzuführen.

LPC

Es zeigten sich stimulationsabhängige Aktivierungsunterschiede in beiden Gruppen für die Komponente der späten Positivierung (LPC). Für die *CR*-Bedingung (correct rejection/korrekte Zurückweisung) zeigte sich über der zentroparietalen Elektrodenposition PZ ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor „Elektrodenposition“ sowie für den Faktor „Bedingung“. Der anschließende Einzelvergleich ergab einen Trend für den Gruppeneffekt. Zudem zeigte sich eine signifikante Interaktion „Elektrodenposition x Bedingung“. In den Topographien der Differenzwellen, berechnet im Zeitfenster 600-700 ms nach Stimulusonset, zeigte sich eine deutlich größere Beachtung der *CR*-Bedingung (correct rejection/korrekte Zurückweisung) bei den Kontrollprobanden in Form einer stark ausgeprägten zentroparietalen späten Positivierung. Zusammenfassend zeigten sich Aktivierungsunterschiede in beiden Gruppen bei der korrekten Klassifizierung von inkorrekt geschriebenen Wörtern (*CR*=correct rejection/korrekte Zurückweisung).

Die LPC ist eine positive Komponente, die mit einer Latenz von 400-800 ms nach Stimulusonset auftritt und ihr Maximum über zentroparietalen Ableitpositionen mit einer leichten Linksbetonung hat (Finnigan et al., 2002).

Das Auftreten einer LPC wird allgemein mit Prozessen des episodischen Langzeitgedächtnisses bei der Wiedererkennung bzw. mit Reanalyisierungsprozessen in Verbindung gebracht (Johnson Jr., 1995). Sie wird zudem in Verbindung mit dem Worterkennungsgedächtnis (*word recognition memory*) gebracht (Review: Rugg und Curran, 2007). Weil die falsche Klassifizierung von bereits präsentierten Wörtern als neu und die von neuen Wörtern als bereits präsentiert keine LPC ausgelöst hat, wird sie als elektrophysiologisches Korrelat korrekt klassifizierter Wörter angesehen (Wilding et al., 1996). Dennoch ist anzumerken, dass bislang bezüglich der funktionellen Bedeutung kein wissenschaftlicher Konsens besteht (Rugg und Curran, 2002).

Es existiert eine Vielzahl an Studien, die auf die Verarbeitung orthographischer Fehler bei Erwachsenen abzielt (z.B. Vissers et al., 2006). Ein Effekt, der dabei mehrfach beschrieben wurde, ist das Auftreten einer späten positiven Komponente bei orthographischen Fehlern im Vergleich zu korrekt geschriebenen Wörtern.

Münste und Kollegen (1998) beobachteten in einer Studie, die auf die Verarbeitung von orthographischen Fehlern abzielte, eine vorwiegend über zentroparietalen Elektrodenpositionen auftretende deutliche Positivierung, die der Potentialausprägung bei groben semantischen und syntaktischen Fehlern ähnelte. Der eingesetzte Versuchsaufbau war dabei so konstruiert, dass in einer mehrere tausend Wörter langen Geschichte gelegentlich falsch geschriebene Wörter (Bsp.: „Behsen“ statt „Besen“) vorkamen, die durch den Kontext und durch die Art der Fehlschreibung offensichtlich und eindeutig zu erkennen waren. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Versuchsteilnehmer einen sehr effizienten Überwachungsmechanismus besitzen, der sogar feinste Fehlschreibungen detektieren kann. Darüberhinaus fand sich die beschriebene Positivierung auch bei syntaktischen und semantischen Fehlern, sodass geschlossen wurde, dass die späte Positivierung durch linguistische Regelverstöße unterschiedlicher Art ausgelöst wird (Münste et al., 1993; Münste et al., 1998).

Schulte-Körne und Kollegen (2004) fanden eine signifikant reduzierte LPC-Amplitude bei einem Versuchsaufbau mit Pseudowörtern in einer Dyslexiegruppe, wohingegen sich bei einem Paradigma mit Symbolen kein Unterschied der Amplitudenausprägung zwischen Dyslektikern und Kontrollprobanden zeigte. Dies wurde als spezielles Defizit bei der Wiedererkennung von Wörtern interpretiert

(*word recognition memory deficit*). Rüsseler und Kollegen (2003) beobachteten eine geringere Aktivierung der späten Positivierung im Zeitfenster 450-650 ms nach Stimulusonset für korrekt erkannte Wörter über der Elektrodenposition PZ bei Dyslektikern bzw. in der *CR*-Bedingung (korrekte Zurückweisung) eine signifikant größere LPC-Amplitude in der Kontrollgruppe.

In der vorliegenden Arbeit zeigte sich ebenso bei der korrekten Klassifizierung falsch geschriebener Wörter (*CR*=correct rejection/korrekte Zurückweisung) über der Elektrodenposition PZ eine deutlich kleinere Amplitude der späten Positivierung.

Vissers und Kollegen (2006) postulierten, dass die Amplitude der späten Positivierung die Aktivität eines Überwachungsprozesses bei der Sprachwahrnehmung auf der Wortebene repräsentiert, wenn ein ankommender Stimulus (z.B. ein falsch geschriebenes Wort) in Konflikt mit der eigenen Erwartung (d.h. der korrekten Schreibweise des Wortes) tritt. Sie fanden erwartungsgemäß eine späte Positivierung in einer Versuchsbedingung, in welcher ein bestimmtes Wort durch den konstruierten Kontext stark erwartet wurde, wohingegen in einer Bedingung mit einer nur niedrigen Erwartung (durch den vorgegebenen Kontext) diese Komponente nicht auftrat. Dies stützt die Annahme, dass die späte Positivierung als Indikator für einen Konflikt zwischen dem erwarteten (korrekt geschriebenen) und dem unerwarteten (falsch geschriebenen) Wort angesehen werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde das erwartete Wort eindeutig durch eine präzise Strichzeichnung vorgegeben, die unmittelbar vor dem entsprechenden Wort erschien. Demzufolge wurde eine späte Positivierung für die richtige Klassifizierung (als falsch geschrieben) eines inkorrekt geschriebenen Wortes erwartet. Es zeigte sich in der Tat eine späte Positivierung in der *CR*-Bedingung (correct rejection/korrekte Zurückweisung) korrekt identifizierter orthographischer Fehler in beiden Gruppen. Die Amplitude der späten Positivierung war in der Gruppe der Kontrollprobanden in der genannten Bedingung mit 7.3 μV im Gegensatz zu 4.1 μV in der *Hit*-Bedingung (Treffer) deutlich größer. Im Vergleich hierzu zeigte sich bei der Gruppe der Dyslexieprobanden eine deutlich kleinere Amplitude der späten Positivierung für die *CR*-Bedingung (correct rejection/korrekte Zurückweisung) mit 4.0 μV . In der *Hit*-Bedingung (Treffer) der Dyslektiker zeigte sich eine Amplitude von 3.1 μV .

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich Amplitudenunterschiede der späten Positivierung zwischen beiden Gruppen in der *CR*-Bedingung (correct rejection/korrekte Zurückweisung) zeigten. Die verringerte Amplitude in der Dyslexiegruppe ist möglicherweise ein Hinweis auf eine beeinträchtigte Worterkennungsleistung beim Abrufprozess aus dem Langzeitgedächtnis bzw. Ausdruck eines gestörten Überwachungsprozesses für orthographische Fehler. Die Tatsache, dass sich bei den Dyslektikern im Gegensatz zu den gesunden Kontrollprobanden nur ein marginaler Unterschied in der Amplitudenausprägung der späten Positivierung zwischen der *CR*- (correct rejection/korrekte Zurückweisung) und der *Hit*-Bedingung (Treffer) zeigte, ist als Hinweis für eine nur geringfügige Modulation der orthographischen Richtigkeit bei erwachsenen Dyslektikern zu werten. Wir schließen daraus, dass bei erwachsenen Dyslektikern im Gegensatz zu Gesunden ein gestörter Überwachungsmechanismus für orthographische Fehler vorliegt.

4.4 Vergleich der Versuchsaufbauten

Abschließend soll vergleichend auf die zwei neuartigen Versuchsaufbauten zur Untersuchung der orthographischen Fehlersensitivität beim Lesen bei erwachsenen Probanden mit und ohne Dyslexie eingegangen werden.

Zum Einsatz kam zum einen ein Paradigma mit visuellen Stimuli (Strichzeichnungen) und anschließender Wortpräsentation des zuvor präsentierten Objektes (1. Studie) und zum anderen ein Paradigma mit auditiven Stimuli (Wortdarbietung über Lautsprecherboxen) und anschließender Wortpräsentation Buchstabe für Buchstabe des vorgelesenen Wortes. In beiden Fällen hatte der Proband die Aufgabe durch einen Mausklick mit der rechten Hand anzugeben, ob das dargebotene Wort korrekt geschrieben wurde (durch einen linken Mausklick) oder nicht (rechter Mausklick).

Bezüglich der reliablen EKPs fiel auf, dass durch die ausreichende Anzahl an Trials in drei (sowohl korrekten als auch fehlerhaften) Bedingungen (*Hit*, *CR* und *FA*) in dem ersten Paradigma mit den visuellen Stimuli sowohl eine antwortbezogene als auch eine stimulusbezogene Analyse durchgeführt werden konnte. Dies ist besonders bei Fragestellungen, die auf antwortbezogene EKP-Komponenten abzielen (wie in diesem Fall die ERN) von großer Bedeutung. In dem zweiten Paradigma hingegen war eine Beurteilung der antwortbezogenen

Aktivität nicht möglich, da durch eine unzureichende Anzahl an Durchgängen in den beiden fehlerhaften Bedingungen (*FA*=false alarm/ falscher Alarm und *Miss*=verpasstes Signal) kein reliables EKP generiert werden konnte. Für die Generierung eines aussagefähigen EKP sind mind. zehn Trials notwendig. Jedoch ist anzumerken, dass weder im ersten noch im zweiten Paradigma die *Miss*-Bedingung (verpasstes Signal) in die Auswertung mit eingeschlossen werden konnte. Dies könnte bspw. durch eine Erhöhung der Anzahl der Einzelversuche erreicht werden. Allerdings dauerte jedes Paradigma bei insgesamt 300 Einzelversuchen in der 1. Studie und 200 Einzelversuchen in der 2. Studie bereits jeweils fast 25 Minuten, d.h. beide hintereinander insgesamt etwa 45 Minuten. Mit zunehmender Versuchsdauer nimmt die Aufmerksamkeit und die Konzentrationsfähigkeit der Probanden ab und die Artefakte durch z.B. Augenbewegungen nehmen zu, was wiederum einen Ausschluss der jeweiligen Trials zur Folge haben kann. Eine weitere Steigerung der Einzelversuchsanzahl und eine dadurch bedingte verlängerte Untersuchungszeit ist daher als kritisch anzusehen. Vielmehr ist die Weiterentwicklung eines der beiden Versuchsaufbauten mit einer gesteigerten Anzahl an Einzelversuchen sinnvoll.

Da die Einzelversuche in der ersten Studie mit einer Dauer von fünf Sekunden deutlich kürzer waren als die der zweiten Studie mit einer Dauer von acht Sekunden, ist der Unterschied in der Anzahl der Einzelversuche (300 vs. 200) bei etwa gleicher Gesamtdauer der einzelnen Studien zu erklären. Da grundsätzlich gilt, je mehr Durchgänge, desto besser das Signal/Rausch-Verhältnis, liegt auch hier der Vorteil beim Versuchsaufbau des ersten Paradigmas.

Zusammenfassend zeigte sich im Rahmen dieser Arbeit die bessere Eignung des ersten Versuchsaufbaus für die Generierung reliabler antwort- und stimulusbezogener EKPs. Dieser Aufbau bietet eine geeignete Basis für zukünftige Studien, die sowohl auf stimulus- als auch antwortbezogene Komponenten, die in Verbindung mit der Sprache gebracht werden, abzielen.

5 Zusammenfassung

Bei der konstitutionellen Dyslexie (LRS) handelt es sich um eine Teilleistungsstörung, d.h. eine isolierte Schwäche beschränkt auf den Bereich Lesen und Schreiben bei ansonsten normalem Leistungsniveau sowie IQ (Intelligenzquotient) und adäquater Beschulung. Ein alters- und bildungsentsprechender Leistungsgrad im Bereich Lesen und Schreiben wird nicht erreicht.

Die vorliegende Arbeit zielte darauf ab nachzuweisen, dass sich die ERN-Komponente (error-related negativity) in antwortbezogenen ereigniskorrelierten Potentialen (EKP) von Dyslektikern von gesunden Kontrollprobanden unterscheidet (nämlich im Vergleich reduziert ist), was als Hinweis für eine beeinträchtigte Fehlersensitivität gegenüber orthographischen Fehlern bei Dyslektikern gedeutet werden kann. Hierzu wurde die ERN-Komponente bei Dyslektikern und gesunden Kontrollprobanden untersucht und verglichen.

Es wurden insgesamt 29 Versuchspersonen mittels des Lückendiktats „Moselfahrt“ und des IQ-Tests (Wechsler-Intelligenztest für Erwachsene) untersucht. Bei Erfüllen des IQ-Diskrepanzkriteriums (erzielte Rechtschreibleistung $\geq 1,5$ Standardabweichungen unterhalb der Leistung, die bei vorliegendem IQ zu erwarten ist) erfolgte die Einteilung der Probanden in die Dyslexiegruppe. Nach Alter, Geschlecht, Händigkeit und Schulabschluss wurden parallelisierte Kontrollpersonen rekrutiert und getestet. In einer zweiten Sitzung wurde die EEG-Untersuchung mit den Worterkennungstestungen am PC der Studie 1 und 2 durchgeführt. In Studie 1 dienten eine Strichzeichnung und eine anschließende visuelle Wortpräsentation des entsprechenden Objektes als Stimulus. In Studie 2 erfolgte zunächst die akustische Wortdarbietung über Lautsprecherboxen mit folgender visueller Wortpräsentation Buchstabe für Buchstabe. Mithilfe der entsprechenden Responsetaste sollten die Probanden angeben, ob ein Wort richtig oder falsch geschrieben dargeboten wurde. In die Datenanalyse wurden insgesamt 16 zusätzlichen Probanden (9 Dyslektiker und 7 Kontrollprobanden), die in Magdeburg unter gleichen Bedingungen getestet wurden, aufgenommen. Schlussendlich bestand die Studienpopulation der 1. Studie aus 15 Probanden in der Dyslexiegruppe und 15 Probanden in der Kontrollgruppe, die der 2. Studie aus 16 Dyslexieprobanden und 17 Kontrollprobanden.

Erwartungsgemäß traten in den antwortbezogenen EKPs beider Gruppen ERN-Komponenten nach fehlerhafter Antwortgabe auf. Dies wurde als Zeichen eines auftretenden Antwortkonflikts interpretiert, welcher sowohl bei den Kontrollprobanden als auch bei den Dyslektikern bei der Kontrolle der Klassifizierung der Schreibweise auftrat. Die ERN-Komponente war bei den Dyslektikern in der *FA*-Bedingung (Falscher Alarm= ein falsch geschriebenes Wort wird inkorrekt als korrekt geschrieben angegeben) reduziert, was als elektrophysiologischer Beleg dafür gedeutet wird, dass bei Personen mit einer Dyslexie eine verminderte Fehlersensitivität für orthographische Fehler vorliegt. Darüberhinaus ergaben sich in den stimulusbezogenen EKPs beider Gruppen ungleiche Ausprägungen folgender sprachbezogener Komponenten: eine reduzierten Amplitude der N4-Komponente in der Dyslexiegruppe, die als Hinweis für eine verringerte Aktivierung der zugrundeliegenden Wortverarbeitungsprozesse im semantischen Langzeitgedächtnis gedeutet wird und eine verminderte Amplitude der späten Positivierung (LPC= late positive component) in der Dyslexiegruppe, welche als Hinweis für einen beeinträchtigten Überwachungsmechanismus für orthographische Fehler bei erwachsenen Dyslektikern interpretiert wird.

6 Literaturverzeichnis

- Baayen RH, Piepenbrock R, Gulikers L: The CELEX Lexical database [CD-ROM]. Philadelphia: University of Pennsylvania, Linguistic Data Consortium (1995)
- Baddeley A, Wilson BA: When implicit learning fails: amnesia and the problem of error elimination. *Neuropsychologia* 32: 53-94 (1994)
- Barrett SE, Rugg MD, Perrett DI: Event-related potentials and the matching of familiar and unfamiliar faces. *Neuropsychologia* 26.1: 105-117 (1988)
- Bentin S, Mouchetant-Rostaing Y, Giard MH, Echallier JF, Pernier J: ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution. *Journal of Cognitive Neuroscience* 11.3: 235-260 (1999)
- Berger H: Über das Elektroencephalogramm des Menschen. *Arch Psychiat Nervenkr* 87: 527-538 (1929)
- Bernstein PS, Scheffers MK, Coles MG: Where did I go wrong? A psychophysiological analysis of error detection. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*: 1312-1322 (1995)
- Bingmann D, Köhling R: Hirnfunktionen im Spiegel des EEG. In: Speckmann E-J, Hescheler J, Köhling R (Hrsg.): *Physiologie*. 5. Aufl., 253-257, Elsevier, München (2008)
- Birbaumer N, Schmidt RF: Untersuchung der Hirnaktivität des Menschen. In: Schmidt, RF, Schaible, H-G (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 5. Aufl., 353-362, Springer, Heidelberg (2006)
- Birbaumer N, Schmidt RF: Methoden der Biologischen Psychologie. In: Birbaumer N, Schmidt RF (Hrsg.): *Biologische Psychologie*. 7. Aufl., 478-480, Springer, Heidelberg (2010)
- Birbaumer N, Schmidt RF: Allgemeine Physiologie der Großhirnrinde. In: Schmidt, RF, Lang, F, Heckmann, M (Hrsg.): *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie*. 31. Aufl., 164-172, Springer, Heidelberg (2010)
- Bortz J, Lienert GA, Boehnke K: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Springer, Berlin (1990)
- Botvinick M, Nystrom LE, Fissell K, Carter CS, Cohen JD: Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 402.6758: 179-181 (1999)
- Brown JW, Braver TS: A computational model of risk, conflict, and individual difference effects in the anterior cingulate cortex. *Brain research* 1202: 99-108 (2008)

- Brügelmann H: Fehler vermeiden – oder aus Fehlern lernen? In: Bürgelmann H (Hrsg.): *ABC und Schriftsprache: Rätsel für Kinder, Lehrer und Forscher*. 21-31, Faude, Konstanz (1986)
- Brügelmann H, Brinkmann E: Freies Schreiben im Anfangsunterricht? *Eine kritische Übersicht über Befunde der Forschung*. Grundschulverband: Frankfurt → http://www.grundschulverband.de/fileadmin/grundschulverband/Download/Forschung/Zur_Leseforschung_Feb._07_.pdf [aktualisiert 2008] (2006)
- Brunswick N: What is dyslexia? In: Brunswick Nicola (Hrsg.): *Living with Dyslexia*, 15, The Rosen Publishing Group, Inc., New York (2011)
- Carter CS, Braver TS, Barch DM, Botvinick MM, Noll D, Cohen JD: Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science* 280.5364: 747–749 (1998)
- Coch D, Maron L, Wolf M, Holcomb PJ: Word and picture processing in children: An event-related potential study. *Developmental Neuropsychology* 22.1: 373-406 (2002)
- Coles MGH, Scheffers KM, Holroyd CB: Why is there an ERN/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing. *Biological psychology* 56.3: 173-189 (2001)
- Curran T: The electrophysiology of incidental and intentional retrieval: erp old/new effects in lexical decision and recognition memory. *Neuropsychologia* 37.7: 771-785 (1999)
- Deutsche Gesellschaft für Personalwesen Rechtschreibungstest (R-T). Göttingen: Hogrefe (1974)
- Dhar M, Been PH, Minderaa RB, Althaus M: Distinct information processing characteristics in dyslexia and ADHD during a covert orienting task: an event-related potential study. *Clin Neurophysiol.* 119: 2011–2025 (2008)
- Danielmeier C, Wessel JR, Steinhauser M: Modulation of the error-related negativity by response conflict. *Psychophysiology*, 46: 1288–1298 (2009)
- Dehaene S, Posner MI, Tucker DM: Localization of a Neural System for Error Detection and Compensation. *Psychological science*, 5.5: 303-305 (1994)
- Dilling H, Mombour W, Schmidt MH: F8 Entwicklungsstörungen. In: Dilling H, Mombour W, Schmidt MH (Hrsg.): *Internationale Klassifikation psychischer Störungen*. 7. Aufl., 283-300, Huber, Hogrefe AG, Bern (2010)
- Eriksen BA, Eriksen CW: Effects of noise letters upon identification of a target letter in a non-search task. *Perception & Psychophysics*, 16: 143–149 (1974)

- Falkenstein M, Hohnsbein J, Hoormann J, Blanke L: Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In: Brunia CHM, Gaillard AWK, Kok A (Hrsg.) *Psychophysiological Brain Research*. Tilburg University Press, Tilburg, 192-195 (1990)
- Falkenstein M, Hoormann J, Christ S, Hohnsbein J: ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biol Psychol*, 51.2: 87-107 (2000)
- Falkenstein M: ERP correlates of erroneous performance. In: Ullsperger N, Falkenstein M (Hrsg.): *Errors, Conflicts, and the Brain: Current Opinions on Performance Monitoring: Proceedings of the Conference Held in Dortmund, Germany, on July 3-5, 2003*. 5-8, Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences (2004)
- Galuschka K, Ise E, Krick K, Schulte-Körne G: Effectiveness of Treatment Approaches for Children and Adolescents with Reading Disabilities: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *PLoS ONE* 9.2: e89900. (2014)
- Ganis G, Kutas M, Sereno MI: The search for „common sense“: An electrophysiological study of the comprehension of words and pictures in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8: 89-106 (1996)
- Gasteiger-Klicpera B, Klicpera C, Schabmann A: Der Zusammenhang zwischen Lese-, Rechtschreib- und Verhaltensschwierigkeiten: Ergebnisse einer Längsschnittuntersuchung vom Kindergarten bis zur 4.Klasse Grundschule. In: *Kindheit und Entwicklung*, 15: 45-57 (2006)
- Gehring WJ, Coles MGH, Meyer DE, Donchin E: The error-related negativity: an event-related brain potential accompanying errors. *Psychophysiology* 27: 34 (1990)
- Gehring WJ, Goss B, Coles MGH, Meyer DE, Donchin E: A neural system for error detection and compensation. *Psychological science*, 4.6: 385-390 (1993)
- Gerloff C: Ereignis-korrelierte Potenziale (EKP). In: Stöhr M, Dichgans J, Buettner UW, Hess CW (Hrsg.) *Evozierte Potenziale*. 4. Aufl., 501-504, Springer, Heidelberg (2005)
- GNU PSPP: <http://www.gnu.org/software/pspp/> (2007)
- Green DM, Swets JA: *Signal Detection Theory and Psychophysics*, Wiley & Sons, Inc., New York (1966)
- Grigorenko EL: Developmental dyslexia: An update on genes, brains, and environments. *Journal of child psychology and psychiatry* 42.1: 91-125 (2001)
- Grimm T: Genetik der Legasthenie. In: *Sprache-Stimme-Gehör*, 35, 91-97, Thieme, Stuttgart (2011)

- Hammer A, Rautzenberg A, Heldmann M, Münte, TF: Challenging the error-likelihood model with a recognition paradigm: An electrophysiological study. *Biological psychology*, 88.2: 180-187 (2011)
- Hasko S, Groth K, Bruder J, Bartling J, Schulte-Körne G: The time course of reading processes in children with and without dyslexia: an ERP study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7: 55-73 (2013)
- Hohnsbein J, Falkenstein M, Hoormann J: Error processing in visual and auditory choice reaction tasks. *Journal of Psychophysiology*, 3: 320 (1989)
- Holcomb PJ, Neville, HJ: Auditory and visual semantic priming in lexical decision: a comparison using event-related potentials. *Language and cognitive processes* 5.4: 281-312 (1990)
- Holroyd CB, Dien J, Coles MGH: Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: Evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letters*, 242.2: 65-68 (1998)
- Holroyd CB, Coles MGH: The Neural Basis of Human Error Processing: Reinforcement Learning, Dopamine, and the Error-Related Negativity. *Psychological Review* 109.4: 679-709 (2002)
- Holroyd CB, Yeung N: Alcohol and error processing. *Trends in Neurosciences*, 26.8: 402-404 (2003)
- Hoppe M: Montagen. In: Ebner A, Deuschl G (Hrsg.): *EEG*. 2. Aufl., 18-25, Thieme, Stuttgart (2011)
- Horowitz-Kraus T, Breznitz T: Error Detection Mechanism for Words and Sentences: A comparison between readers with dyslexia and skilled readers. *International Journal of Disability, Development and Education* 58.1: 33-45 (2011)
- Horowitz-Kraus T: The Error Detection Mechanism Among Dyslexic and Skilled Readers: Characterization and Plasticity. *Reading, Writing, Mathematics and the Developing Brain: Listening to Many Voices*. Springer Netherlands, 113-130 (2012)
- http://www.kjp.med.uni-muenchen.de/download/leitlinie_lrs_kjp_langfassung.pdf
- Jasper HH: The ten-twenty electrode system of the International Federation. In: *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 10: 371-375 (1958)
- Jennings JR, Wood CC : The e-adjustment procedure for repeated measures analysis of variance. *Psychophysiology*, 13: 277-278 (1976)
- Jednoróg K, Marchewka A, Tacikowski P, Heim S, Grabowska A: Electrophysiological evidence for the magnocellular-dorsal pathway deficit in dyslexia. *Dev Sci*. 2011; 14: 873–880 (2011)

- Johannes S, Mangung GR, Kussmaul CL, Münte TF: Brain potentials in developmental dyslexia: differential effects of word frequency in human subjects. *Neuroscience letters* 195.3: 183-186 (1995)
- Johnson Jr R: Event-related potential insights into the neurobiology of memory systems. *Handbook of neuropsychology* 10: 135-135 (1995)
- Katusic SK, Colligan RC, Barbaresi WJ, Schaid DJ und Jacobsen SJ: Incidence of reading disability in a population-based birth cohort, 1976–1982, Rochester, Minn. *Mayo Clinic Proceedings*, 1081-1092, Elsevier (2001)
- Khader P, Heil M, Rösler F: Verfahren zur Registrierung elektrischer und magnetischer Hirnaktivität. In: Sturm W, Hermann M, Münte TF (Hrsg.): *Lehrbuch der Klinischen Neuropsychologie*, 2. Aufl., 262-270, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2009)
- Kutas M, Hillyard SA: Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207: 203–208 (1980)
- Kutas M, Hillyard SA: Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature* 307: 161-163 (1984)
- Kutas M, Hillyard SA, Gazzaniga MS: Processing of semantic anomaly by right and left hemispheres of commissurotomy patients. *Brain* 111: 553-576 (1988)
- Kutas M, Hillyard S: An electrophysiological probe of incidental semantic association. *Cognitive Neuroscience, Journal of* 1.1: 38-49 (1989)
- Kutas M, Federmeier KD: Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event related brain potential (ERP). *Annual review of psychology* 62: 621 (2011)
- Landwehrmeyer B, Gerling J, Wallesch C-W: Patterns of task-related slow brain potentials in dyslexia. *Archives of neurology* 47.7: 791-797 (1990)
- Lawrence MA: Easy analysis and visualization of factorial experiments (2013)
- Livingstone MS, Rosen GD, Drislane FW, Galaburda AM: Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 88,:7943-7947 (1991)
- Lopez-Calderon J, Luck SJ: ERPLAB: an open-source toolbox for the analysis of event-related potentials. *Front Hum Neurosci* 8: 213 (2014)
- Luck SJ: An Introduction to Event-Related Potentials and Their Neural Origins. In: Luck SJ (Hrsg.): *An introduction to the event-related potential technique*, 1-76, MIT press (2005)
- Luu P, Flaisch T, Tucker DM: Medial frontal cortex in action monitoring. *J. Neurosci.* 20: 464–469 (2000)

- Luu P, Tucker DM: Regulating action: alternating activation of midline frontal and motor cortical networks. *Clin Neurophysiol* 112.7: 1295-306 (2001)
- Luu P, Tucker DM, Makeig S: Frontal midline theta and the error-related negativity: neurophysiological mechanisms of action regulation. *Clin Neurophysiol*. 115.8: 1821-35 (2004)
- Mahé G, Doignon-Camus N, Dufour A, Bonnefond A: Conflict control processing in adults with developmental dyslexia: An event related potentials study. *Clinical Neurophysiology* 125.1: 69-76 (2014)
- Makeig, S, Jung, Bell AJ, Jung T-P, Sejnowski TJ: Independent component analysis of electroencephalographic data. In: Touretzky D, Mozer M, Hasselmo M (Hrsg.): *Advances in Neural Information Processing Systems 8*. MIT Press Cambridge MA145-151 (1996)
- Masaki H, Tanaka H, Takasawa N, Yamazaki K: Error-related brain potentials elicited by vocal error. *NeuroReport*, 12.9: 1851-1855 (2001)
- Metzler-Baddeley C, and Snowden JS: Brief report: Errorless versus errorful learning as a memory rehabilitation approach in Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 27.8: 1070-1079 (2005)
- Miltner M, Braun CH, Coles MGH: Event-Related Brain Potentials Following Incorrect Feedback in a Time-Estimation Task: Evidence for a „Generic“ Neural System for Error Detection. *J Cog Neurosci*. 9.6: 788-798 (1997)
- Miltner M, Brauer J, Coles MGH: Parallel brain activity for self-generated and observed errors. In: Ullsperger M, Falkenstein M (Hrsg.): *Errors, Conflicts, and the Brain: Current Opinions on Performance Monitoring: Proceedings of the Conference Held in Dortmund, Germany, on July 3-5, 2003*. 124-128, Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences (2004)
- Münter TF, Heinze H-J, Mangun GR: Dissociation of brain activity related to syntactic and semantic aspects of language. *Journal of Cognitive Neuroscience* 5.3: 335-344 (1993)
- Münter TF, Heinze H-J, Matzke M, Wieringa BM, Johannes S: Brain potentials and syntactic violations revisited: No evidence for specificity of the syntactic positive shift. *Neuropsychologia* 36.3: 217-226 (1998)
- Neville HJ, Coffey S, Holcomb PJ, Tallal P: The neurobiology of sensory and language processing in language-impaired children. *Journal of Cognitive Neuroscience* 5.2: 235-253 (1993)
- Scheffers MK, Coles MG: Performance monitoring in a confusing world: error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors. *Journal of experimental psychology, human perception, and performance*, 26.1: 141-151 (2000)

- Moscovitch M: Confabulation and the frontal systems: Strategic versus associative retrieval in neuropsychological theories of memory, *Varieties of Memory and Consciousness: Essays in Honour of Endel Tulving*, 133-160 (1989)
- Nagarajan S, Mahncke H, Salz T, Tallal P, Roberts T, Merzenich M: Cortical auditory signal processing in poor readers. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96.11: 6483-6488 (1999)
- Nessler D, Mecklinger A: ERP correlates of true and false recognition after different retention delays: stimulus- and response-related processes. *Psychophysiology* 40: 146-149 (2003)
- Nieuwenhuis S, Ridderinkhof KR, Blom J, Band GP, Kok A: Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology* 38.5: 752-760 (2001)
- Nübel H: Fehler sind Fenster auf den Lernprozeß. Schülertexte als Grundlage für individuelle Fehlerkonzepte. *Grundschulmagazin* 13, 7-8: 15-18 (1998)
- Pape H-C: Wachheit und Schlaf: Rhythmen des Gehirns im Muster des Elektroenzephalogramms. In: Pape H-C, Kurtz A, Silbernagl S (Hrsg.): *Physiologie*. 7. Aufl., 924-927, Thieme, Stuttgart (2014)
- Picton TW, Lins OG, Scherg M: The recording and analysis of event-related potentials. In: Boller F, Grafman J (Hrsg.): *Handbook of Neuropsychology* 10: 3-4, Elsevier Sciences Ltd (1995)
- R Core Team. R: A Language And Environment For Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; <http://www.R-project.org/> (2014)
- Ramus F, Rosen S, Dakin SC, Day BL, Castelotte JM, White S, Frith U: Theories of developmental dyslexia: Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain* 126.4: 841-865 (2003)
- Rösler F: Hirnelektrische Potentiale: Operationen, Phänomene, Begriffe. In: Albert D, Pawlik K, Stampf K-H, Strobe W (Hrsg.): *Lehr- und Forschungstexte Psychologie*, Springer-Verlag, Heidelberg (1982)
- Rösler F, Hahne A: Hirnelektrische Korrelate des Sprachverstehens: Zur psycholinguistischen Bedeutung der N400-Komponente im EEG. *Sprache & Kognition* 11.3: 149-161 (1992)
- Rodriguez-Fornells A, Kofidis C, Münte TF: An electrophysiological study of errorless learning. *Cognitive Brain Research* 19: 160-173 (2004)
- Rüsseler J, Probst S, Johannes S, Münte TF: Recognition memory for unfamiliar faces does not differ for adult normal and dyslexic readers: an event-related brain potential study. *J Clin Exp Neuropsychol* 25: 815-829 (2003)
- Rüsseler J, Becker P, Sönke J, Münte TF: Semantic, syntactic, and phonological processing of written words in adult developmental dyslexic readers: an event-related brain potential study. *BMC neuroscience* 8.1: 52 (2007)

- Rugg, MD: Event-related potentials in phonological matching tasks." *Brain and language* 23.2: 225-240 (1984)
- Rugg MD: Event-related brain potentials dissociate repetition effects of high-and low-frequency words. *Memory & Cognition* 18.4: 367-379 (1990)
- Rugg MD, Curran T: Event-related potentials and recognition memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 11: 251-257 (2007)
- Rumsey JM, Andreason P, Zametkin AJ, Aquino T, King AC, Hamburger SD, Pikus A, Rapoport JL, Cohen RM: Failure to activate the left temporoparietal cortex in dyslexia: An oxygen 15 positron emission tomographic study. *Archives of Neurology* 49.5: 527 (1992)
- Scheffers MK, Humphrey DG, Stanny RR, Kramer AF, Coles MGH: Error-related processing during a period of extended wakefulness. *Psychophysiology*, 36: 149-157 (1999)
- Schlüter S, Jokeit H: Dyslexie - neurobiologische Grundlagen. *Psychiatrie und Neurologie* 2: 17-22 (2007)
- Schulte-Körne G, Deimel W, Müller K, Gutenbrunner C, Remschmidt H: Familial Aggregation of Spelling Disability. In: *J. Child Psychol. Psychiat.* 37.7: 817-822 (1996)
- Schulte-Körne G: Neurobiologie und Genetik der Lese-Rechtschreibstörung (Legasthenie). In: Schulte-Körne G: *Legasthenie: Zum aktuellen Stand der Ursachenforschung, der diagnostischen Methoden und der Förderkonzepte*, 13-43, Winkler, Bochum (2002)
- Schulte-Körne G, Remschmidt H: Legasthenie-Symptomatik, Diagnostik, Ursachen, Verlauf und Behandlung. *Deutsches Ärzteblatt* 100.7 (2003)
- Schulte-Körne G, Deimel W, Bartling J, Remschmidt H: Neurophysiological correlates of word recognition in dyslexia. *Journal of Neural Transmission* 111.7: 971-984 (2004)
- Schulte-Körne G: The prevention, diagnosis, and treatment of dyslexia. *Dtsch Arztebl Int*; 107.41: 718-27 (2010)
- Shaywitz SE, Shaywitz BA, Fletcher JM, Escobar MD: Prevalence of reading disability in boys and girls. *JAMA* 264.8: 998-1002 (1990)
- Skottun BC: On the conflicting support for the magnocellular-deficit theory of dyslexia. Response to Stein, Talcott and Walsh. *Trends Cogn Sci.* 4.6: 211-212 (2000)
- Stein J, Walsh V: To see but not to read: The magnocellular theory of dyslexia. *Trends in neurosciences* 20.4: 147-152 (1997)
- Stein J, Richardson AJ, Fowler MS: Monocular occlusion can improve binocular control and reading in dyslexics. *Brain* 123.1: 164-170 (2000)

- Stevenson J, Fredman G: The Social Environmental Correlates of Reading Ability. *J. Child Psychol. Psychiat* 31.5: 681-698 (1990)
- Stöhr M: Physiologie und Pathophysiologie der Impulsweiterleitung. In: Stöhr M, Dichgans J, Buettner UW, Hess CW (Hrsg.): *Evozierte Potenziale*. 4.Aufl., 2, Springer, Berlin (2005)
- Tallal P, Miller S, Fitch RH: Neurobiological basis of speech: a case for the preeminence of temporal processing. *Ann N Y Acad Sci.*; 682: 27-47 (1993)
- Terrace HS: Extinction of a discriminative operant following discrimination learning with and without errors. *J Exp Anal Behav*; 12.4: 571–582 (1969)
- The dyslexia handbook 2013*, British dyslexia Association
- Van Petten C, Kutas M: Interactions between sentence context and word frequency in event-related brain potentials. *Memory & Cognition* 18.4, 380-393 (1990)
- Vidal F, T Hasbroucq, J Grapperon, M Bonne: Is the 'error negativity' specific to errors?. *Biological psychology* 51.2: 109-128 (2000)
- Vissers CTW, Chwilla, DJ, Kolk HH: Monitoring in language perception: The effect of misspellings of words in highly constrained sentences. *Brain Research*, 1106.1: 150-163 (2006)
- von Suchodoletz W: Spannungsfeld zwischen etablierten und alternativen Behandlungsverfahren. In von Suchodoletz W (Hrsg.): *Therapie der Lese-Rechtschreib-Störung (LRS)*, 2. Aufl., 15-16, Kohlhammer GmbH, Stuttgart (2006)
- Warnke A, Hemminger U, Roth E: In welchem Alter werden Lese-Rechtschreibschwierigkeiten sichtbar? In: Warnke A, Hemminger U, Roth E (Hrsg.): *Ratgeber Lese-Rechtschreibstörungen: Informationen für Betroffene, Eltern, Lehrer und Erzieher*, 6, Hogrefe, Göttingen (2003)
- Warnke A, Hemminger U, Plume E: Umschriebene Lese-Rechtschreibstörung. In: Döpfner U, Lehmkuhl G, Petermann F (Hrsg.): *Lehrbuch der Klinischen Kinderpsychologie und-psychotherapie*, 1-5, Hogrefe, Göttingen (2004)
- Wechsler D: Intelligence defined and undefined: A relativistic appraisal. *American Psychologist* 30.2: 135-139 (1975)
- Wellach I: Anatomische Grundlagen. In: Wellach I (Hrsg.): *Praxisbuch EEG*. 2. Aufl., 34-35, Thieme, Stuttgart (2011)
- Wilding E, Rugg MD: An event-related potential study of recognition memory with and without retrieval of source. *Brain* 119: 889–905 (1996)
- Willcutt EG, Pennington BF: Psychiatric comorbidity in children and adolescents with reading disability. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 41.8: 1039-1048 (2000)

- Wöhrle JC: Neurophysiologische Diagnostik. In: Berlit P (Hrsg.): *Klinische Neurologie*. 2. Aufl., 80, Springer, Heidelberg (2006)
- Yeung N, Botvinick MM, Cohen JD: The neural basis of error detection: conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychol Rev.*; 111: 931–959 (2004)
- Zschocke S: Entstehungsmechanismen des EEG. In: Zschocke, S (Hrsg.): *Klinische Elektroenzephalographie*. 2. Aufl., 3-4, Springer, Heidelberg (2002)

Anhang

Abb. 28: Rechtschreibtest „Moselfahrt“:
Typisches Beispiel für einen Dyslexieprobanden

Moselfahrt

Nach einer ziemlich langen Wanderung kamen Anna und Jan müde und in ihrem
 | Äußeren etwas verwahrlost auf der Marienburg an. Sie baten die Herbergseltern
 || um Quartier und Essen, das ihnen prompt serviert wurde. Es war weite
 | lange, bis sie endlich gesättigt waren. Nach dem Essen gingen sie eilends
 | hinaus, um den überwältigend schönen Anblick der Burg und ihrer Umgebung
intensiv zu genießen.

Die Marienburg liegt nämlich auf einer mehrmarmigen Landzunge zwischen
 | den zwei engsten Moselschleifen. Früher war sie eine der bedeutendsten und
 | wahrscheinlich auch zur Verteidigung geeigneten Festungen.
 || Selbst in den Karolingischen Tagen des dreißig^{dreißigjährigen} Krieges
 || konnten ihr die ungelähmten angreifenden Feinde nichts ernstliches
 anhaben. So wurde die Burg mit ihrer wertvollen Bibliothek und ihren berühmten
Gemälden vollständig erhalten. Während die Moseldörfer der Umgebung in
 | Brandstätten verwandelt wurden und ihre wehrlosen Bewohner zu meist
 schon tot waren, hatten sich die Soldaten beim Aufstehen der Feinde
 auf die Burg zurückgezogen. Sie blieben dort unbehelligt und konnten sich

unversort mit ihren Verwandten in Sicherheit wiegen.

Heute ist den städtisch anmutenden Orten am Fuße der Burg nichts mehr von dem

anzen zumerk was in jener Zeit mit ihren verheerenden Folgen passierte.

Die beiden waren zum ersten Mal hier. Auf dem Rückweg zu ihrem Zimmer betrachteten sie

interessiert, wenn auch zugleich etwas irritiert, die überall in den Gängen

aufgehängten alten Waffen. Der Burgverwalter hatte in ihrer Abwesenheit sein

Wegelöschen getan, das Gästezimmer behaglich herzurichten. Anna und Jan gingen

schmerzhaft zu Bett. Doch sollte es wiedererwartend

eine unruhige Nacht werden. Anstatt zu schlafen, schreckten sie Nachts

auf und lauschten äußerst einem unheimlichen Geräusch. Es wurde ihnen

Angst und Bange. Sie glaubten sich schmälich betrogen und in

tödlicher Gefahr. Sie verfielen in einen

unerwidrigen Streit darüber, wer von ihnen die Idee hatte, hier zu zirkeln.

Das hatte bösen zur Folge und hätte fast zu einem endgültigen Bruch

geführt. Erst nachdem sie bemerkt hatten, dass jenes Geräusch von einem fortwährend

knarrenden Fensterlades herrührte, schliefen sie allmählich ein.

Bitte umblättern und auf der Rückseite weiter arbeiten.

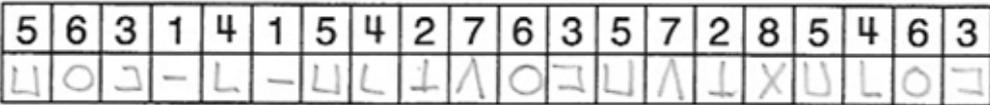
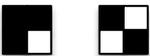
Am Morgen fühlten sie sich durch ihren nächtlichen Disput sehr

unausgeschlafen, und sie verschlüßelten sich, von nun an besser zusammenzuhalten.

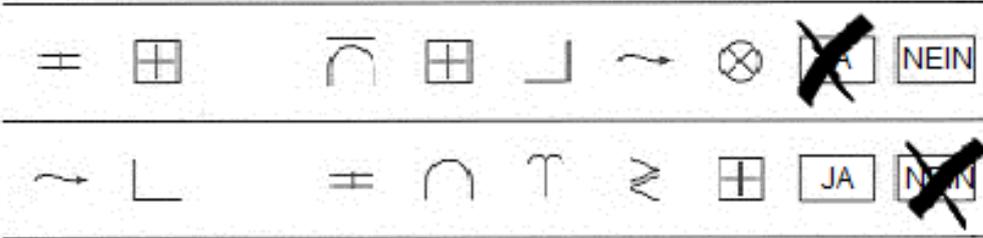
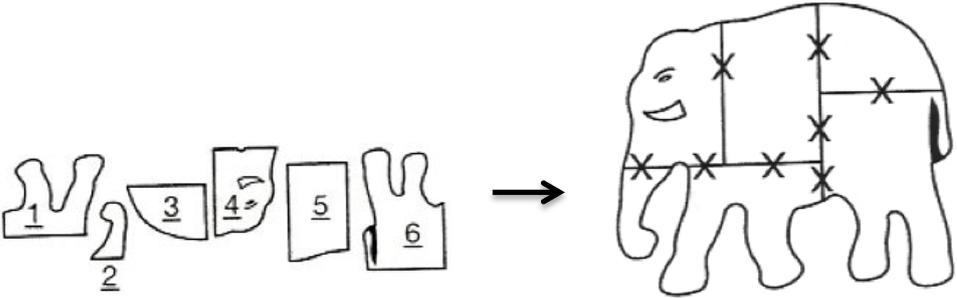
Später erfuhren sie, dass man sie unvergesslich aufgenommen habe. Da waren

sie vollends versöhnt und wanderten froh weiter.

Abb. 29: Darstellung der Untertests des WIE

Untertest	Inhalt/Aufgabe
1. Bilder- ergänzen	Der Versuchsperson wird ein Spiralblock mit einer Serie von farbigen Abbildungen von Gegenständen und Alltagssituationen vorgelegt. In jeder Abbildung fehlt ein wichtiges Detail, welches der Proband innerhalb von 60 Sekunden identifizieren und nennen soll.
2. Wortschatz- Test	<p>Hierbei werden Karteikarten mit einem geschriebenen Wort vorgelegt. Der Versuchsleiter liest das Wort laut vor und der Proband wird gebeten dieses mitzulesen und anschließend zu erklären.</p> <p>Bsp.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frühstück → „morgendliche Mahlzeit“ • erzeugen → „herstellen“
3. Zahlen- Symbol- Test	<p>Bei diesem Subtest wird ein Aufgabenblatt mit einer Serie von Zahlen vorgelegt, wobei jede Zahl mit einem bestimmten abstrakten Symbol gepaart ist. Unter die Ziffer, soll das entsprechende Symbol eingetragen werden, wobei sich an einem vorgegebenen Zuordnungsschlüssel gehalten werden muss. Insgesamt stehen für die Bearbeitung dieser Aufgabe 120 Sekunden zur Verfügung. Die Beurteilung erfolgt nach der Anzahl korrekt eingetragener Symbole in der vorgegebenen Zeit.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div> <p style="text-align: center; font-size: small;">oben: vorgegebener Zuordnungsschlüssel, unten: entsprechend ausgefüllte Reihe</p>
4. Gemeinsam- keitenfinden	<p>Der Untersucher liest Wortpaare vor, bei denen der Versuchsteilnehmer die Gemeinsamkeit angeben soll.</p> <p>Bsp.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klavier – Trommel → „Musikinstrumente“ • Auge – Ohr → „Sinnesorgane“
5. Mosaik-Test	<p>Es werden geometrische Muster entweder mithilfe von Würfeln oder Zeichnungen aus einem Spiralblock präsentiert, die anschließend mit zweifarbigen Würfeln (schwarz und weiß) nachgebaut werden sollen.</p> <p>Bsp.:</p> <div style="text-align: center;">  </div>
6. Rechne- risches	Es wird eine Serie von Rechenaufgaben vorgegeben, die im Kopf gelöst (d.h. ohne Hilfsmittel) und mündlich beantwortet werden sollen.

Denken	<p>Bsp.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • „Wie viel beträgt der Durchschnitt der Ziffern 10, 5 und 15?“ → „10“ • „Ein Auto benötigt 8 Liter Benzin auf 100 km. Der Fahrer tankt 40 Liter und fährt 300 km. Wie viel Liter sind noch im Tank?“ → „16 Liter“
7. Matrizen-Test	<p>Der Versuchsperson wird hierbei eine unvollständige Abfolge von geometrischen Mustern vorgelegt. Das Konstruktionsprinzip muss erkannt und durch die Auswahl eines von fünf vorgegebenen Mustern vervollständigt werden.</p>
8. Zahlen-nachsprechen	<p>Es werden Zahlenfolgen mit aufsteigender Länge vorgelesen, die zu Anfang in derselben Reihenfolge und im zweiten Teil rückwärts wiedergegeben werden sollen.</p> <p>Bsp.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 6-4-3-9 → „6-4-3-9“ • 3-2-7-9 → „9-7-2-3“
9. Allgemeines Wissen	<p>Dieser Untertest enthält Wissensfragen zu bedeutenden Ereignissen, Orten oder Persönlichkeiten.</p> <p>Bsp.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auf welchem Kontinent liegt Brasilien? → „Südamerika“ • Wer schrieb ‚Hamlet‘? → „Shakespeare“
10. Bilder-ordnen	<p>Der Untersuchungsleiter legt dem Probanden ungeordnet eine Bilderserie vor, die in der richtigen Reihenfolge eine Geschichte erzählt. Der Proband soll diese in eine logisch richtige Reihenfolge bringen.</p>
11. Allgemeines Verständnis	<p>Es folgt erneut eine Reihe von Fragen, mit denen geprüft werden soll, ob der Proband alltägliche Probleme lösen kann und ihm soziale Normen verständlich sind.</p> <p>Bsp.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • „Warum leihen sich manche Leute Geld lieber bei einer Bank als bei einem guten Freund?“ → Allgemein: Hinweis auf Belastungen der Freundschaft oder spezifische Vorteile eines Bankdarlehens. • „Wozu braucht man für die Ausübung mancher Berufe eine staatliche Zulassung?“ → Allgemein: Um die Öffentlichkeit zu schützen und sicherzustellen, dass manche Tätigkeiten nur von qualifizierten Personen ausgeübt werden.
12. Symbolsuche	<p>Dem Proband wird ein Aufgabenblatt vorgelegt, auf dem gepaarte Gruppen von abstrakten Symbolen enthalten sind. Er soll vergleichen, ob beide Gruppen ein gleiches Symbol enthalten und das durch Ankreuzen</p>

	<p>von „Ja“ oder „Nein“ angeben.</p> <p>Bsp.:</p> <hr/> 
<p>13. Buchstaben- Zahlen-Folge</p>	<p>Der Versuchsleiter liest gemischte Buchstaben- und Zahlenfolgen in aufsteigender Länge vor, die der Versuchsteilnehmer anschließend nach (a) Zahlen in aufsteigender Reihenfolge und (b) Buchstaben in alphabetischer Reihenfolge wiedergeben soll.</p> <p>Bsp.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • T-9-A-3 → „3-9-A-T“ • 8-D-6-G-1 → „1-6-8-D-G“
<p>14. Figurenlegen</p>	<p>In dem letzten Untertest soll der Proband Figurenpuzzles zusammensetzen. Ihm werden Puzzleteile ungeordnet vorgelegt, die in einer begrenzten Zeit zu einer sinnvollen Figur zusammengelegt werden sollen.</p> <p>Bsp.:</p>  <p>links: Wie der Proband die Einzelteile vorgelegt bekommt, rechts: richtige Lösung mit markierten Schnittpunkten, die der Punkteanzahl entsprechen</p>

Tab. 7: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Reaktionszeiten der ersten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	28	4,90	0,04	*
Antworttyp	3	84	29,78	<0,001	*
Gruppe*Antworttyp	3	84	0,34	0,80	

DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 8: Ergebnisse des Mauchly-Test zur Prüfung der Sphärizitätsannahme

Effekt	W	p	p<0,05
Antworttyp	0,1369106	<0,001	*
Gruppe*Antworttyp	0,1369106	<0,001	*

W=Mauchly-W, p=p-Wert.

Tab. 9: Sphärizitätskorrektur nach Greenhouse-Geisser

Effekt	GGe	p[GG]	p[GG]<0,05
Antworttyp	0,4718439	<0,001	*
Gruppe*Antworttyp	0,4718439	0,64	

GGe=Epsilon, p[GG]=korrigierter p-Wert.

Tab. 10: Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die N2-Komponente der ersten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	28	4,08e-08	1,0	
Bedingung	2	56	3,03	0,06	
Elektrodenposition	2	56	4,61	0,01	*
Gruppe*Bedingung	2	56	0,27	0,762	
Gruppe*Elektrode	2	56	7,74	0,001	*
Bedingung*					
Elektrodenposition	4	112	1,17	0,33	
Gruppe*Bedingung*					
Elektrodenposition	4	112	0,18	0,95	

DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 11: Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA für die N4-Komponente über FZ der ersten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	28	4,60	0,04	*
Bedingung	2	56	2,12	0,13	
Gruppe*Bedingung	2	56	0,07	0,94	

DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 12: Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die LPC der ersten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	28	1,80	0,19	
Bedingung	2	56	11,33	<0,001	*
Elektrode	2	56	8,65	<0,001	*
Gruppe*Bedingung	2	56	0,69	0,505	
Gruppe*Elektrode	2	56	0,51	0,60	
Bedingung*Elektrode	4	112	4,27	0,003	*
Gruppe*Bedingung*Elektrode	4	112	0,95	0,44	

DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 13a), b), c): Ergebnisse der t-Tests für unabhängige Stichproben zum Gruppenvergleich pro Bedingung der LPC-Komponente der ersten Studie

a) Gruppenvergleich „Hit“

	M	t	dF	p
DYS (n=15)	2,953			
KON (n=15)	4,361	-1,20	28	0,24

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

b) Gruppenvergleich „CR“

	M	t	dF	p
DYS (n=15)	4,073			
KON (n=15)	7,229	-1,87	26,97	0,07

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

c) Gruppenvergleich „FA“

	M	t	dF	p
DYS (n=15)	1,672			
KON (n=15)	3,794	-1,44	26,31	0,16

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Tab. 14a), b), c), d), e), f): Ergebnisse der t-Tests für abhängige Stichproben zum Vergleich der Bedingungen pro Gruppe der LPC-Komponente der ersten Studie

a) Dyslexiegruppe: Hit vs. CR (n=15)

	M	t	dF	p
	1,112	2,63	14	0,02

Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

b) Dyslexiegruppe: FA vs. CR (n=15)

	M	t	dF	p
	2,401	3,21	14	0,006

FA=false alarm/ falscher Alarm, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

c) Dyslexiegruppe: Hit vs. FA (n=15)

M	t	dF	p
-1,281	-2,03	14	0,06

Hit=Treffer, FA=false alarm/ falscher Alarm, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

d) Kontrollgruppe: Hit vs. CR (n=15)

M	t	dF	p
2,868	3,94	14	0,001

Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

e) Kontrollgruppe: FA vs. CR (n=15)

M	t	dF	p
3,434	5,01	14	<0,001

FA=false alarm/ falscher Alarm, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

f) Kontrollgruppe: Hit vs. FA (n=15)

M	t	dF	p
-0,567	-0,80	14	0,44

Hit=Treffer, FA=false alarm/ falscher Alarm, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Tab. 15: Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die ERN der ersten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	28	0,25	0,62	
Bedingung	2	56	8,65	<0,001	*
Elektrode	1	28	6,91	0,014	*
Gruppe*Bedingung	2	56	6,09	0,004	*
Gruppe*Elektrode	1	28	0,14	0,71	
Bedingung*Elektrode	2	56	0,10	0,91	
Gruppe*Bedingung*Elektrode	2	56	0,16	0,86	

DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 16: Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die Negativierung 260-320 ms poststimulus über den zentralen Elektrodenpositionen FZ, CZ und PZ der zweiten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	31	2,38	0,13	
Bedingung	1	31	16,00	<0,001	*
Elektrode	2	62	1,91	0,16	
Gruppe*Bedingung	1	31	9,57	0,004	*
Gruppe*Elektrode	2	62	1,78	0,18	
Bedingung*Elektrode	2	62	1,52	0,23	
Gruppe*Bedingung*Elektrode	2	62	1,88	0,16	

DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 17: Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die Negativierung 260-320 ms poststimulus über den parasagittalen Elektrodenpositionen F, FC, C, CP, P, PO der zweiten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	31	3,97	0,05	
Bedingung	1	31	25,98	<0,001	*
Hemisphäre	1	31	16,95	<0,001	*
Ap	5	155	0,88	0,94	
Gruppe*Bedingung	1	31	9,31	0,005	*
Gruppe*Hemisphäre	1	31	0,01	0,93	
Gruppe*Ap	5	155	4,73	<0,001	*
Bedingung*Hemisphäre	1	31	7,31	0,01	*
Bedingung*Ap	5	155	3,47	0,005	*
Hemisphäre* Ap	5	155	22,26	<0,001	*
Gruppe*Bedingung*Hemisphäre	1	31	0,67	0,42	
Gruppe*Bedingung*Ap	5	155	6,13	<0,001	*
Gruppe*Hemisphäre*Ap	5	155	0,17	0,97	
Bedingung*Hemisphäre*Ap	5	155	2,75	0,02	*
Gruppe*Bedingung*Hemisphäre*Ap	5	155	0,51	0,77	

Ap=anterior-posteriore Elektrodenpositionen, DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 18a), b), c), d): Ergebnisse der t-Tests für unabhängige Stichproben zum Gruppenvergleich pro Bedingung der Negativierung 260-320 ms poststimulus der zweiten Studie

**a) Gruppenvergleich „CR“ links
Elektrodenposition F**

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,154			
KON (n=17)	-1,891	2,99	31	0,005

CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0.468			
KON (n=17)	-2,024	3,15	31	0,009

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,498			
KON (n=17)	-2,094	2,99	31	0,004

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,490			
KON (n=17)	-1,695	2,63	31	0,013

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,409			
KON (n=17)	-0,751	0,77	31	0,447

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,381			
KON (n=17)	-0,076	-0,77	31	0,450

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

**b) Gruppenvergleich „CR“ rechts
Elektrodenposition F**

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,322			
KON (n=17)	-2,030	2,83	31	0,008

CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,557			
KON (n=17)	-2,332	3,20	31	0,003

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,838			
KON (n=17)	-2,411	3,14	31	0,004

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,818			
KON (n=17)	-2,064	2,51	31	0,018

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-1,160			
KON (n=17)	-1,643	1,17	31	0,251

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-1,578			
KON (n=17)	-1,615	0,07	31	0,942

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

**c) Gruppenvergleich „Hit“ links
Elektrodenposition F**

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,066			
KON (n=17)	-0,131	0,30	31	0,768

Hit=Treffer, DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,236			
KON (n=17)	-0,125	-0,41	31	0,688

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,115			
KON (n=17)	0,034	-0,78	31	0,439

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,228			
KON (n=17)	0,065	-1,17	31	0,251

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,046			
KON (n=17)	0,136	-0,77	31	0,447

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	0,018			
KON (n=17)	0,142	-0,63	31	0,537

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

**d) Gruppenvergleich „Hit“ rechts
Elektrodenposition F**

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,083			
KON (n=17)	-0,139	0,24	31	0,812

Hit=Treffer, DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,185			
KON (n=17)	-0,078	-0,41	31	0,684

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,221			
KON (n=17)	1,958e-17	-0,97	31	0,342

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,429			
KON (n=17)	-0,011	-1,37	31	0,180

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,580			
KON (n=17)	-0,275	0,85	31	0,403

DYS=Dyslexiegruppe, KON=Kontrollgruppe, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO

	M	t	dF	p
DYS (n=16)	-0,693			
KON (n=17)	-0,396	-0,79	31	0,437

DYS=Dyslektiker, KON=Kontrollen, n=Anzahl, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Tab. 19a), b), c), d): Ergebnisse der t-Tests für abhängige Stichproben zum Vergleich der Bedingungen pro Gruppe der Negativierung 260-320 ms poststimulus der zweiten Studie

**a) Dyslexiegruppe: Hit vs. CR links (n=16)
Elektrodenposition F**

M	t	dF	p
-0,088	-0,22	15	0,83

Hit=Treffer, CR=correct rejection/ korrekte Zurückweisung, n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC (n=16)

M	t	dF	p
-0,232	-0,65	15	0,53

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C (n=16)

M	t	dF	p
-0,382	-1,08	15	0,29

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP (n=16)

M	t	dF	p
-0,263	-1,44	15	0,17

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P (n=16)

M	t	dF	p
-0,363	-1,84	15	0,09

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO (n=16)

M	t	dF	p
-0,399	-1,73	15	0,11

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

**b) Dyslexiegruppe: Hit vs. CR rechts (n=16)
Elektrodenposition F**

M	t	dF	p
-0,239	-0,54	15	0,60

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC (n=16)

M	t	dF	p
-0,272	-1,03	15	0,32

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C (n=16)

M	t	dF	p
-0,617	-1,68	15	0,11

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP (n=16)

M	t	dF	p
-0,389	-1,08	15	0,30

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P (n=16)

M	t	dF	p
-0,58	-1,85	15	0,08

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO (n=16)

M	t	dF	p
-0,885	-2,76	15	0,01

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

**c) Kontrollgruppe: Hit vs. CR links (n=17)
Elektrodenposition F**

M	t	dF	p
-1,760	-4,01	15	0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC (n=17)

M	t	dF	p
-1,898	-4,61	15	<0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C (n=17)

M	t	dF	p
-2,127	-5,70	15	<0.001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP (n=17)

M	t	dF	p
-1,76	-4,57	15	<0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P (n=17)

M	t	dF	p
-0,887	-2,16	15	0,05

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO (n=17)

M	t	dF	p
-0,218	-0,61	15	0,55

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

d) Kontrollgruppe: Hit vs. CR rechts (n=17)**Elektrodenposition F**

M	t	dF	p
-1,891	-4,48	15	<0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition FC (n=17)

M	t	dF	p
-2,254	-5,89	15	<0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition C (n=17)

M	t	dF	p
-2,411	-6,25	15	<0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition CP (n=17)

M	t	dF	p
-2,052	-4,86	15	<0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition P (n=17)

M	t	dF	p
-1,368	-3,84	15	0,001

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Elektrodenposition PO (n=17)

M	t	dF	p
-1,219	-3,71	15	0,002

n=Anzahl, M=Mittelwert, t=Prüfgröße, dF=Freiheitsgrad, p=p-Wert.

Tab. 20: Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die Negativierung 260-320 ms poststimulus über den lateralen Elektrodenpositionen F, FC, CP, T und P der zweiten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	31	14,73	<0,001	*
Bedingung	1	31	55,28	<0,001	*
Hemisphäre	1	31	0,01	0,94	
Ap	4	124	19,29	0,001	*
Gruppe*Bedingung	1	31	13,13	0,001	*
Gruppe*Hemisphäre	1	31	0,15	0,71	
Gruppe*Ap	4	124	2,26	0,07	
Bedingung*Hemisphäre	1	31	0,16	0,61	
Bedingung*Ap	4	124	0,47	0,76	
Hemisphäre*Ap	4	124	3,35	0,01	*
Gruppe*Bedingung*Hemisphäre	1	31	0,42	0,52	
Gruppe*Bedingung*Ap	4	124	2,20	0,07	
Gruppe*Hemisphäre*Ap	4	124	0,65	0,63	
Bedingung*Hemisphäre*Ap	4	124	3,28	0,01	*
Gruppe*Bedingung*Hemisphäre*Ap	4	124	1,64	0,17	

Ap=anterior-posteriore Elektrodenpositionen, DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Tab. 21: Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA für die LPC-Komponente über den zentralen Elektrodenpositionen FZ, CZ und PZ der zweiten Studie

Effekt	DFn	DFd	F	p	p<0,05
Gruppe	1	31	0,71	0,41	
Bedingung	1	31	86,40	<0,001	*
Elektrode	2	62	7,97	<0,001	*
Gruppe*Bedingung	1	31	1,53	0,23	
Gruppe*Elektrode	2	62	1,53	0,23	
Bedingung*Elektrode	2	62	19,75	<0,001	*
Gruppe*Bedingung*Elektrode	2	62	3,59	0,03	*

DFn=Freiheitsgrad des Zählers, DFd=Freiheitsgrad des Nenners, F=F-Wert, p=p-Wert.

Danksagungen

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Th. F. Münte für die Überlassung des interessanten Themas sowie die Unterstützung und Anregungen während der Erstellung der Arbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Marcus Heldmann, der mich während der gesamten Arbeit unterstützt hat und mir mit seiner Hilfe jederzeit zur Verfügung stand.

Danke auch an meine Kollegin Swetlana Puppe für die angenehme Zusammenarbeit, die sich zeitgleich mit Kindern der zweiten Klassen und deren Hirnströmen beschäftigt hat.

Meinen Dank möchte ich auch an Susanne Schellbach richten, die uns in die Handhabung der Ausrüstung eingeführt hat.

Danke auch an Dipl. Ing. Christian Erdmann, dass wir an dir das korrekte Anbringen der EEG-Haube üben durften.

Ein Dankeschön auch an Dr. Dieter Haffner für die statistische Beratung.

An dieser Stelle bedanke ich mich besonders bei meinen Eltern, die mir mein Studium überhaupt ermöglicht haben und mich auch weiterhin bedingungslos unterstützen.

Ein von Herzen kommendes Dankeschön auch an Dr. Moritz Ueberschaer für die unendlich große Unterstützung in jeder Hinsicht.

Zu guter Letzt danke ich allen Versuchsteilnehmern und Freunden, die an dieser Studie teilgenommen haben.

Publikationen

Paper

Heldmann M, Breitkopf K, Gerth I, Effenberg AO, Mühlpforte N, Münte TF: Brain potentials indicate impaired sensitivity towards orthographic errors in adult dyslexics. *Submitted, date of submission 04.11.2016*

Vortrag

40. Tagung Psychologie und Gehirn (Lübeck 19.-21. Juni 2014), Vortrag im Rahmen der Session *Neuropsychology of developmental dyslexia - The potential impact of error monitoring on the maintenance of dyslexia*