



seit 1558

fMRI-Untersuchung von Sprachverarbeitungsprozessen bei der Lese-Rechtschreibstörung

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

doctor philosophiae (Dr. phil.)

vorgelegt dem Rat der Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Dipl.-Psych. Marc Ligges
geboren am 26. Januar 1972 in Wattenscheid

Gutachter

1. Prof. Dr. Eckart R. Straube
2. Prof. Dr. Bernhard Blanz

Tag des Kolloquiums: 11.11.2002

Danksagung

Hiermit möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. B. Blanz für die Bereitstellung des Projektes an der Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie des Universitätsklinikums Jena, die Betreuung der Dissertation und die wertvollen Anregungen und Diskussionen bedanken.

Bei Herrn Prof. Dr. E. R. Straube möchte ich mich für wichtige Hinweise und die Übernahme der Begutachtung dieser Dissertation bedanken.

Mein Dank gilt ganz besonders den Projektmitarbeitern Carolin Grünling, Petra Georgiewa, Carola Ortman, Evelyn Rothe und Ulrich Möller, die mir stets bei Problemen der Datenerhebung, Auswertung und Interpretation mit Rat und Tat zur Seite standen. Desweiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern des IDIR, Herrn Dr. Rzanny, Dr. Mentzel und den immer herzlichen und geduldigen MTA's Frau Loob, Frau Metzinger und Frau Lange für die Begleitung der MRT-Untersuchungen bedanken.

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern der Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie bedanken, die jederzeit für Fragen und Diskussionen offen waren. Ein ganz herzliches Dankeschön an Herrn Christian Balzer, der mir beim Probelesen dieser Arbeit gute Tips und Anregungen zukommen ließ.

Mein besonderer Dank gilt meiner Mutter, die mir in jeder Zeit Rückendeckung gegeben hat und natürlich auch meinem Vater, der diese Welt leider viel zu früh verlassen musste. Ein ganz besonders herzliches Dankeschön auch an meine (nicht nur!) Kollegin Carolin Grünling, ohne deren seelischen und moralischen Beistand es um einiges schwerer gefallen wäre.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Theorie | 2 |
| 2.1 | Klärung des Begriffes Lese-Rechtschreibstörung (LRS) | 2 |
| 2.2 | Definition und Diagnostische Kriterien | 2 |
| 2.2.1 | Definition gemäß medizinischer Klassifikationssysteme | 2 |
| 2.2.2 | Alternative Definitionsansätze | 3 |
| 2.3 | Prävalenz | 4 |
| 2.4 | Ursachenmodell der Lese-Rechtschreibstörung | 4 |
| 2.5 | Ungestörte Sprachverarbeitung | 7 |
| 2.5.1 | Phonologische Verarbeitung | 7 |
| 2.5.2 | Kognitive Modelle | 8 |
| 2.5.2.1 | Modelle des Leseprozesses | 8 |
| 2.5.2.2 | Modelle des Leseerwerbs | 10 |
| 2.5.3 | Hirnfunktionelle Befunde zur ungestörten Sprachverarbeitung | 12 |
| 2.5.3.1 | Zusammenfassung | 21 |
| 2.6 | Gestörte Sprachverarbeitung | 22 |
| 2.6.1 | Phonologische Defizithypothese | 22 |
| 2.6.2 | Lesemodelle bei LRS | 23 |
| 2.6.3 | Hirnfunktionelle Befunde zum gestörten Leseprozess | 23 |
| 2.7 | Ein neuronales Modell für das ungestörte und gestörte Lesen | 31 |
| 3 | Fragestellung | 34 |
| 4 | Methode | 38 |
| 4.1 | Verwendete Materialien | 38 |
| 4.1.1 | Diagnostik | 38 |
| 4.1.2 | Leseexperiment | 39 |
| 4.1.3 | fMRI-Experiment | 39 |
| 4.2 | Stichprobe | 42 |
| 4.3 | Messverfahren | 44 |
| 4.3.1 | Magnetresonanztomographie (MRT) | 44 |
| 4.3.2 | Funktionelle Magnetresonanztomographie | 45 |
| 4.3.3 | Vor- und Nachteile des fMRI | 46 |
| 4.3.4 | Design von fMRI-Experimenten | 47 |
| 4.4 | Versuchsplanung | 48 |
| 4.5 | Untersuchungssetting | 49 |
| 4.6 | Versuchsablauf | 50 |
| 4.6.1 | Erstkontakt Diagnostische Sitzung | 50 |
| 4.6.2 | Aufklärungsgespräch und Aufgabenerläuterung | 50 |
| 4.6.3 | Messung | 51 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.7 | Methoden zur Datenanalyse | 52 |
| 4.7.1 | Allgemeines zu fMRI-Daten und deren Auswertungsstrategie | 52 |
| 4.7.2 | Statistisches Parametrisches Mapping (SPM99)..... | 53 |
| 4.7.3 | Datenanalyse | 59 |
| 5 | Ergebnisse | 62 |
| 5.1 | Testdiagnostik..... | 62 |
| 5.2 | Wortlisten..... | 64 |
| 5.3 | ERTS-Daten | 66 |
| 5.4 | fMRI | 69 |
| 6 | Interpretation und Diskussion | 80 |
| 6.1 | Testdiagnostik..... | 80 |
| 6.2 | Wortlisten..... | 81 |
| 6.3 | ERTS | 82 |
| 6.4 | fMRI | 84 |
| 6.4.1 | Allgemeine Aussagen..... | 84 |
| 6.4.2 | Unterschiedliche Sprachverarbeitungsprozesse | 85 |
| 6.4.3 | Phonologisches Defizit..... | 87 |
| 6.4.4 | Lesestrategien (adressiert vs. assembliert) | 89 |
| 6.4.5 | Korrelation von fMRI- und Leistungsdaten..... | 90 |
| 6.4.6 | Entwicklungsaspekt..... | 93 |
| 6.5 | Zusammenführende Diskussion | 94 |
| 6.6 | Methodenkritische Anmerkungen | 97 |
| 6.6.1 | Allgemeine Anmerkungen | 97 |
| 6.6.2 | Kritik an der eigenen Studie | 98 |
| 6.7 | Ideen und Fragestellungen für zukünftige empirische Studien..... | 100 |
| 6.7.1 | Methodische und technische Weiterentwicklungen | 100 |
| 6.7.2 | Früherkennung, Frühförderung und Entwicklungsverlauf der LRS | 102 |
| 6.7.3 | Verbesserung von Therapiekonzepten und -evaluation | 103 |
| 6.7.4 | Unterschiedliche Sprachräume | 104 |
| 6.7.5 | Ideen für weiterführende Studien (Fragestellungen) | 104 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 106 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 107 |
| 9 | Abkürzungsverzeichnis | 118 |
| | Anhang | |

1 Einleitung

Die Thematik der Lese-Rechtschreibstörung (LRS) blickt auf eine nunmehr fast hundertjährige Forschungsgeschichte zurück. Die anfänglichen, vor allem klinischen Beobachtungen wurden sukzessive von empirischen Untersuchungen und Arbeiten erweitert. In den letzten 25 Jahren konnte aufgrund einer sehr aktiven interdisziplinären Forschung durch Ärzte, Psychologen und Pädagogen das Wissen über die LRS in vielen Bereichen deutlich erweitert werden.

Die Entwicklung immer leistungsfähigerer elektrophysiologischer und insbesondere non-invasiver bildgebender Verfahren wie der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRI) hat ein Wesentliches dazu beigetragen, das Grundlagenwissen über die cerebrale Repräsentation kognitiver Prozesse zu vertiefen. Gerade auch Erkenntnisse über die neurobiologischen Hintergründe psychiatrischer Störungsbilder haben von diesen neuen Forschungszugängen profitiert.

Die vorliegende Arbeit versucht durch die Nutzung des fMRI einen weiteren Beitrag zur Aufklärung von neuropsychologischen und neurophysiologischen Grundlagen der LRS zu liefern. Im Mittelpunkt steht dabei die phonologische Defizithypothese, die besagt, dass Personen mit einer LRS ein Defizit auf der Ebene der phonologischen Bewusstheit (einer Fähigkeit, Wörter in deren Klangstrukturen zu zergliedern) aufweisen. Im Folgenden sollen nun zunächst die theoretischen Grundlagen der gestörten sowie ungestörten Sprachverarbeitung herausgearbeitet werden.

2 Theorie

2.1 Klärung des Begriffes Lese-Rechtschreibstörung (LRS)

Wie in vielen anderen Forschungsbereichen auch besteht hinsichtlich der Lese-Rechtschreibstörung (LRS) das Problem der begrifflichen Definition. Bezeichnungen wie Legasthenie, Dyslexie, Lese-Rechtschreibstörung- bzw. - Schwierigkeiten werden häufig synonym oder aber zur deutlichen Abgrenzung voneinander verwendet. In der folgenden Arbeit soll in Anlehnung an standardisierte Klassifikationssystemen (siehe Abschnitt 2.2) die Abkürzung LRS als synonym für Lese-Rechtschreibstörung bzw. Legasthenie verwendet werden. Zur Benennung der in dieser vorliegenden Arbeit untersuchten Probanden sollen die Begriffe „Probanden mit LRS“ und für normallesende Probanden „Kontrollprobanden“ verwendet werden.

2.2 Definition und Diagnostische Kriterien

Definition wie auch Diagnostische Kriterien der LRS werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Neben den klassischen medizinischen Definitionen, die Basis fast aller Forschungsarbeiten sind, sind kognitionspsychologische Ansätze häufig vertreten.

2.2.1 Definition gemäß medizinischer Klassifikationssysteme

In Klassifikationssystemen psychischer Störungen, wie der International Classification of Diseases and Related Health Problems (**ICD-10**, WHO, 1992) und der vierten Version des Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (**DSM-IV**, APA, 1994) werden für die verschiedenen Entwicklungsstörungen bzw. Lernstörungen umfangreiche Kriterienkataloge aufgeführt.

Innerhalb der Kriterien beider Systeme, lassen sich Übereinstimmungen bei der Betrachtung der LRS finden. Beide Diagnosesysteme sehen als wichtigste Merkmale an, dass Kinder, die trotz hinreichender kognitiver Leistungsfähigkeit, regelmäßiger schulischer Förderung und genereller körperlicher und seelischer Gesundheit große Schwierigkeiten beim Erlernen des Lesens bzw. des Rechtschreibens haben. Nach den Kriterien des ICD-10 lassen sich zwei Störungsbilder (Untergruppen) unterscheiden: Einerseits die „Lese-Rechtschreibstörung“ (F81.0) und andererseits die „Isolierte Rechtschreibstörung“ (F81.1), deren Hauptmerkmal eine eindeutige Beeinträchtigung der Rechtschreibfähigkeiten, ohne dem Vorliegen einer umschriebenen Lesestörung, ist. Im DSM-IV werden die „Lesestörung“ (315.0) und die „Störung des schriftlichen Ausdrucks“ (315.2) als Subgruppen der

Lernstörungen eingeführt. Beide Manuale definieren die Störungen über eine Diskrepanz zwischen der Lese- und/oder Rechtschreibfertigkeit im Vergleich zu einer standardisiert bestimmten nonverbalen kognitiven Leistung, wobei bereits hier anzumerken ist, dass dieses Diskrepanzkriterium in letzter Zeit immer mehr in die Kritik geraten ist.

Gemäß ICD-10 ist dabei ein wesentliches Diagnostisches Kriterium, dass Schwierigkeiten beim Lesen- und Schreiben ab der ersten Konfrontation mit Schriftsprache auftreten müssen. Typische Erkennungsmerkmale sind hierbei Schwierigkeiten beim Leseverständnis, Beeinträchtigungen des flüssigen Lesens und/oder bei der Rechtschreibung. Die hieraus resultierenden schlechten Deutschnoten (besonders in Diktaten) stehen häufig im Gegensatz zu den übrigen schulischen Leistungen. Ein deutliches Signal ist zudem, dass trotz eines häufigen Übens keine wesentlichen Verbesserungen auftreten.

Im Gegensatz zu früheren Annahmen geht man heute nicht mehr von einem einheitlichen und diagnostisch kennzeichnenden Symptombild („legasthenietypische Fehler“) aus. Fehler wie Verwechslungen, Umstellungen und Auslassungen von Buchstaben (sog. Reversionen & Inversionen) treten genauso überproportional häufig auf wie andere Fehlerarten. Für einen Überblick über typische Lese- wie Rechtschreibfehler sei auf das ICD-10 verwiesen. Ein weiteres Merkmal ist laut ICD-10 der tendenzielle Rückgang von Leseproblemen im Zuge von Beübung und Lernfortschritten, wohingegen Rechtschreibprobleme bis ins hohe Erwachsenenalter persistieren. Komorbidität können Aktivitäts- und Aufmerksamkeitsstörungen, Anpassungsstörungen, Schulangst, Störungen des Sozialverhaltens und psychosomatische Symptome sein. Differentialdiagnostisch sind nach Poustka et al. (1999) der Verlust einer erworbenen Lesefertigkeit bzw. Rechtschreibfähigkeit aufgrund einer neurologischen Erkrankung, die erworbene Lese-Rechtschreibhemmung infolge emotionaler Störung oder andere psychiatrische Störungen und Probleme infolge von mangelnder schulischer Förderung, auszuschließen.

2.2.2 Alternative Definitionsansätze

Wegen der Kritik hinsichtlich der Verwendung des klassischen Diskrepanzkriteriums haben in den letzten Jahren vermehrt Regressionsansätze Beachtung gefunden. Anhand dieses Ansatzes wird auf der Basis des Alters und der kognitiven Leistungsfähigkeit des Kindes ein Erwartungswert hinsichtlich seiner Leseleistung (Lesealter) bzw. Rechtschreibleistung berechnet. Im Falle einer Abweichung der tatsächlich erbrachten von der erwarteten Leistung wird von dem Vorliegen einer LRS gesprochen. Der Vorteil des Regressionsmodells gegenüber dem einfachen IQ-Diskrepanzmodell liegt darin, dass Verzerrungen in den

Extrembereichen der Verteilung der Rechtschreib- oder Leseleistung vermieden werden (Schulte-Körne, 2001a).

Da das Erscheinungsbild der LRS jedoch sehr heterogen und definatorisch schwer zu fassen ist, und einige Studien den Zusammenhang zwischen LRS und IQ in Frage stellen (Shaywitz et al., 1992; Stanovich, 1988), wird der Diskrepanzansatz häufig kritisiert. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass lediglich Ausschlusskriterien und keine in der klinischen Praxis nutzbare positive Diagnostische Kriterien beschrieben werden (Snowling, 2000). Vor diesem Hintergrund nahm die „International Dyslexia Association“ 1994 neben den „klassischen“ Kriterien (s.o.) zudem ätiologische Aspekte (Defizite bei der phonologischen Verarbeitung und Dekodierfähigkeit) in ihre Definition der LRS mit auf. Trotz der dargestellten Kritik greifen die meisten Studien auf eine Form von Diskrepanzkriterium zurück. Obwohl wie oben beschrieben der Zusammenhang zwischen IQ und LRS empirisch nicht belegt ist, beziehen die meisten Studien lediglich Probanden mit mindestens durchschnittlich ausgeprägter kognitiver Leistungsvoraussetzung ($IQ \geq 85$) ein. Durch dieses Vorgehen beugt man gerade in wissenschaftlichen Untersuchung dem Problem vor, dass beobachtete Unterschiede zwischen Kontrollprobanden und Probanden mit LRS bei anderen Leistungsparametern auf Diskrepanzen in den kognitiven Leistungsvoraussetzungen zurückzuführen sind.

2.3 Prävalenz

Nach Warnke (2000, S. 132) liegt die Prävalenzrate für die LRS gemäß epidemiologischer Studien im deutschen Sprachraum bei 4-7%. Diese Zahl entspricht Ergebnissen aus dem englischen Sprachraum, die von 4-8% ausgehen (Lewis et al., 1992; Shaywitz et al., 1990). Wichtig ist auch, darauf hinzuweisen, dass die Prävalenzraten der LRS durch uneinheitliche Diagnostische Kriterien zu Stande kommen.

2.4 Ursachenmodell der Lese-Rechtschreibstörung

Im allgemeinen kann die LRS als eine sehr heterogene Störung angesehen werden, deren Ursachen multifaktoriell zu sehen sind. Gerade in den letzten 25 Jahren haben wissenschaftliche Erkenntnisse entscheidende Fortschritte zum Verständnis der LRS gebracht. Das in Abbildung 1 dargestellte Ursachenmodell stellt die Vielzahl an möglichen Verknüpfungen dar, die zur Entstehung einer LRS führen können.

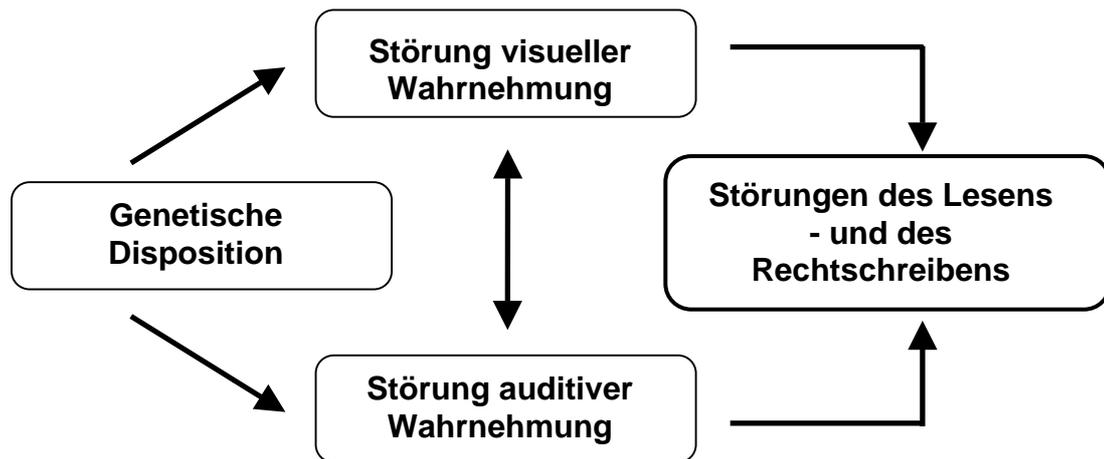


Abbildung 1: Ursachenmodell zur LRS (vgl. Schulte-Körne, 1999, S. 4).

Genetische Disposition

Eine erhöhte Häufigkeit von Sprachproblemen bei Verwandten von LRS-Probanden kann als Hinweis auf eine genetische Disposition der LRS gewertet werden (Noterdaeme, 2000). Warnke (1999, S. 73) stellt anhand eines Familienstammbaumes den Erbgang der LRS sogar als dominant dar. Für die LRS ist eine Verbindung mit den Chromosom 6 und 15 nachgewiesen. Mehrere Unterabschnitte dieser Chromosomen sollen wiederum bei der Ausbildung einer LRS eine zentrale Rolle spielen (Childs & Finucci, 1984). Hinzu kommt, dass die genetische Prädisposition zusätzlich durch biologische und psychosoziale Risiken modifiziert wird (Überblick in Schulte-Körne, 2001b). Wie man aus Abbildung 1 erkennen kann werden des weiteren Störungen im visuellen- und auditorischen Informationsverarbeitungssystem postuliert.

Visuelles Informationsdefizit

In den letzten Jahren wurde vermehrt ein Ursachenmodell bezüglich neuroanatomischer Feinstrukturen des visuellen Verarbeitungssystems diskutiert. Grundlage dabei ist, dass an der Verarbeitung visueller Reize zwei unterschiedliche Systeme (magnozellulär und parvozellulär) beteiligt sind. Die beiden unterschiedlichen System sind dabei wie folgt an der Reizverarbeitung im visuellen Kortex beteiligt: Das magnozelluläre System dient der Verarbeitung schneller, kontrastarmer, bewegter oder flimmernder Reize, das parvozelluläre System verarbeitet dagegen stationäre bzw. langsame Reize mit hoher Orts- und Farbauflösung (vgl. Schulte-Körne, 1999). Bei der LRS scheint die (Dys-)Funktion des magnozellulären Systems eine zentrale Rolle zu spielen. So konnte bei Probanden mit LRS in histologischen Untersuchungen des *Corpus geniculatum laterale (CGL)*, das in magnozelluläre und parvozelluläre Schichten unterteilt ist, eine Verminderung der Zahl der Nervenzellen

im magnozellulären System festgestellt werden (Galaburda et al., 1985; Demb, 1999; Livingstone et al., 1991). Empirische Befunde zur LRS deuten auf ein visuelles Informationsverarbeitungsdefizit hin, wodurch Schwächen bei der Worterkennung und der Wortverarbeitung erklärt werden (Salmelin et al., 1996). Problematisch hinsichtlich dieses Ursachenmodells ist jedoch, dass in vielen Studien ein visuelles Wahrnehmungsdefizit als alleiniges Störungsmodell nicht bestätigt werden konnte (Warnke 1990, 1994).

Auditorisches Informationsdefizit

Sprache setzt sich aus einem sich schnell verändernden Strom von Lauteinheiten zusammen. Die Wahrnehmung und das Verständnis von Sprache erfordert demnach eine schnelle Diskriminationsfähigkeit dieser Lauteinheiten (Galaburda, 1993). Galaburda (1993) beschreibt diesbezüglich, dass bei Probanden mit LRS Abweichungen im auditorischen System vorliegen, die ursächlich für die Lese-Rechtschreibprobleme verantwortlich sein sollen. Ähnlich der Ergebnisse hinsichtlich des visuellen Defizits ist die Lage der empirischen Arbeiten hinsichtlich dieses Defizits äußerst heterogen. Häufig bestätigt sich ein derartiges Defizit lediglich bei der Diskrimination von sprachrelevantem Material und nicht bei der Differenzierung reinen Tonmaterials (Schulte-Körne et al., 1998).

Zusammenfassend scheinen für die Genese der LRS Schwierigkeiten bei der Sprachverarbeitung schwerwiegender als visuelle Defizite zu sein, da Defizite bei der visuellen Informationsverarbeitung lediglich in 5-10% der Fälle als Ursache der LRS angenommen werden (Warnke, 1999). Phonologische metalinguistische Fähigkeiten stellen eine entscheidende Voraussetzung für den Schriftspracherwerb dar. Nur wenn die phonologische Struktur der Schriftsprache richtig erfasst werden kann, ist das Kind zukünftig in der Lage, unbekanntes Wortmaterial über Graphem-Phonem-Zuordnungen zu erlesen. Vor diesem Hintergrund wird zunehmend in der aktuellen Forschungsliteratur zur gestörten Sprachverarbeitung als Kerndefizit ein Problem bei der phonologischen Kodierung bzw. ein Defizit im Rahmen der phonologischen Bewusstheit diskutiert (Frith, 1981, 1995; Snowling, 1981). Die theoretischen Hintergründe der phonologischen Bewusstheit sowie neurophysiologische Untersuchungen dazu werden in 2.5 erläutert. Zum besseren Verständnis der gestörten Sprachverarbeitung werden hierzu zunächst Grundlagen der ungestörten Sprachverarbeitung dargestellt.

2.5 Ungestörte Sprachverarbeitung

2.5.1 Phonologische Verarbeitung

Im Rahmen verschiedener metalinguistischer Fähigkeiten stellen die phonologische Bewusstheit, das phonologische Rekodieren beim Zugriff auf das semantische Lexikon und phonetisches Rekodieren im Arbeitsgedächtnis zentrale Aspekte des Leseprozesses dar.

Phonologische Bewusstheit

Das Konstrukt der phonologischen Bewusstheit bezeichnet die Fähigkeit lautliche Strukturen von Sprache und Schrift zu erkennen und mit diesen Strukturen zu operieren (vgl. Schulte-Körne, 1999, S.14). Zum besseren Verständnis der phonologischen Bewusstheit sollen zunächst verschiedene Einheiten der Sprache dargestellt werden: Ein **Phonem** wird als die kleinste lautliche Spracheinheit bezeichnet, aus denen Wörter aufgebaut sind. Phoneme wiederum werden in allen alphabetischen Schriften durch eine geringere Anzahl von **Graphemen** repräsentiert (Anderson, 1996, S. 53f). Hinsichtlich der Zuordnung der Grapheme zu den Phonemen gibt es deutliche Unterschiede in den verschiedenen Sprachräumen. Während der deutsche Sprachraum sehr stringente Graphem-Phonem-Zuordnungen aufweist, gibt es im Englischen weniger deutliche und häufig uneindeutige Zuordnungen. Die Untersuchung von phonologischer Bewusstheit geschieht meistens mit Aufgaben, bei denen Sprachelemente und Laute manipuliert werden müssen. Dies geschieht z.B. über so genannte Nonwörter, bei denen es sich in der Regel um aussprechbare unbekannte und sinnlose Wörter handelt.

Phonologisches Rekodieren beim Zugriff auf das semantische Lexikon

Ein Aspekt der phonologischen Verarbeitung betrifft das phonologische Rekodieren von schriftlich dargebotenem Stimulusmaterial. Diese Komponente phonologischer Informationsverarbeitung beschreibt die Fähigkeit, Grapheme in ihre lautsprachlichen Entsprechungen (Phoneme) zu rekodieren. Hierdurch wird der Zugriff auf lexikalische Gedächtniseinträge und somit der Bedeutung des Wortes ermöglicht. Im Verlauf des Schriftspracherwerbs nehmen auf der einen Seite die Kenntnisse über Buchstaben (Buchstabenkombinationen) stetig zu. In der Weise, wie die jeweiligen Buchstaben-Laut-Verbindungen erlernt und gefestigt werden (durch die innerliche Verknüpfung dieser „geschriebenen Symbole“ mit ihren lautsprachlichen Entsprechungen) wird ein immer schnellerer und automatisierter Zugriff auf das semantische Lexikon ermöglicht. Wichtig für den effizienten Zugriff

auf das Lexikon ist dabei, dass ganze Buchstabenkombinationen als „phonologische Codes“ abgespeichert sind und so einen stark automatisierten Zugriff ermöglichen. Gerade bei leseschwachen Kindern sollen diese phonologischen Codes schwach ausgeprägt sein, was im Vergleich zu Normallesenden zu Verzögerungen des Abrufs führt (Barth, 1999).

Phonetisches Rekodieren im Arbeitsgedächtnis

Ein weiterer Aspekt der phonologischen Verarbeitung stellt das phonetische Rekodieren im Arbeitsgedächtnis dar. Der Lese- und Schreibprozess erfordert immer das kurzfristige Abspeichern von Lauten und Lauteinheiten. Gerade für den Leseanfänger ist diese Komponente von großer Bedeutung, da er beim Erlesen eines Wortes jeden Buchstaben in das entsprechende Phonem dekodieren muss. Diese Information (Lautrepräsentanz) muss dann so lange im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden, bis alle Laute eines Wortes abgerufen wurden, um zu einem Wort zusammengefasst werden zu können. D.h. das Klangbild eines einzelnen Wortes kann nur dann erreicht werden, wenn das Kind ständig zwischen Wortklangbild und Einzellaut und Einzelbuchstaben und Wortbild hin und her wechselt.

Insgesamt kann die phonologische Verarbeitung (insbesondere die phonologische Bewusstheit) als wesentliche Voraussetzung für das Lesenlernen angesehen werden. Verschiedene Modelle zum ungestörten Leseprozess stellen diese Fähigkeiten wie folgt dar.

2.5.2 Kognitive Modelle

2.5.2.1 Modelle des Leseprozesses

Dual-Route-Modell

Einen wesentlichen Beitrag zu den Theorien der visuellen Wortverarbeitung beim Lesen lieferte Coltheart (1978) mit dem Zwei-Wege-Modell des Lesens, welches in den darauf folgenden Jahren modifiziert wurde (Coltheart, 1981; Paap & Noel, 1991; Seidenberg, 1985). Diese Theorie postuliert, dass der Leseprozess in Abhängigkeit vom Wortmaterial über zwei unabhängige, parallel laufende Prozesse erfolgt (vgl. Abbildung 2): Auf einem direkten, lexikalischen Weg werden Wörter direkt durch den Zugriff auf ihre Repräsentation im mentalen orthografischen Lexikon, in dem die phonologischen Charakteristika dieser häufig auftretenden Wörter gespeichert sind, erkannt („**adressierte**“ Verarbeitung/Phonologie). Flüssiges Lesen soll somit im Wesentlichen auf der Effektivität dieser Verarbeitungsstrecke basieren. Auf einem indirekten, phonologischen Weg kommen langsamere, kontrolliert ablaufende, orthografisch-phonologische Konvertierungsprozesse zum

Einsatz. Hierbei werden Wörter über sukzessive Graphem-Phonem-Zuordnungen („assemblierte“ Verarbeitung) erlesen. Somit ist der Leser in der Lage diese auszusprechen, auch wenn das gelesene Wort unbekannt ist.

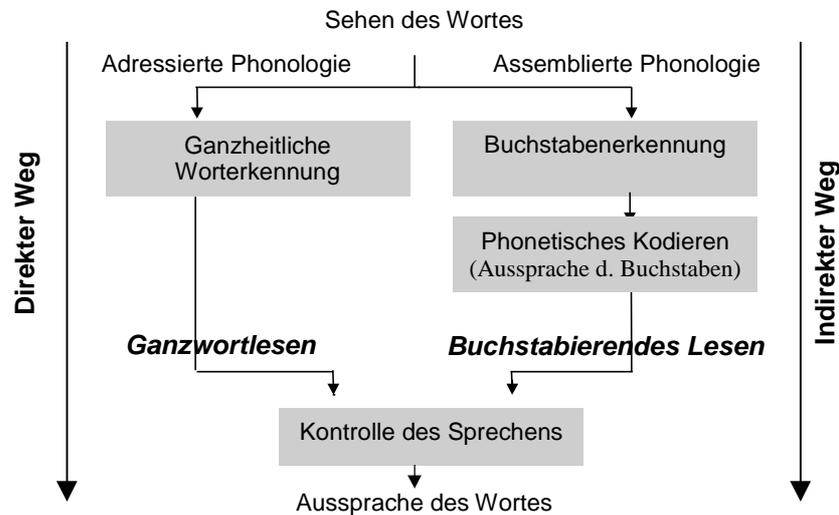


Abbildung 2: Duales Lesemodell (modifizierte Abbildung aus Paap & Noel, 1991).

Beim Leseerwerb spielt das Zwei-Wege-Modell eine wichtige Rolle. Da lesenlernende Kinder noch nicht viele Wörter kennen, nutzen sie den indirekten Weg über das phonologische Rekodieren, um die Bedeutung des Wortes abrufen zu können. Mit dem flüssigen (erwachsenen) Lesen tritt der direkte Weg in den Vordergrund, obwohl auch erfahrene Leser bei unbekanntem Wörtern den Prozess der phonologischen Rekodierung verwenden müssen (vgl. 2.5.1). Laut diesem Ansatz entwickeln Kinder somit ein visuelles Vokabular („Sichtvokabular“), welches sich mit der Zeit und der damit verbundenen Leseerfahrung immer mehr erweitert. Der Vorteil dieses visuellen Vokabulars liegt darin, dass ähnliche Wörter (horse, house) aber auch Nonwörter lesbar sind, ohne diese langsam rekodieren zu müssen (Beech & Awaida, 1992). Entsprechend häufig gelesene Wörter müssen somit nach und nach nicht mehr buchstabiert werden, sondern werden unmittelbar in ihrer Wortgestalt ganzheitlich erkannt. Jorm und Share (1983) vertreten die Ansicht, dass die indirekte Route vor allem beim Versagen der direkten Route aktiv wird. In seiner strikten Auslegung ist das Dual-Route-Modell oft kritisiert worden. So muss vor allem für das erwachsene Lesen die Zweiteilung in Frage gestellt werden.

Konnektionistische Modelle

Alternativmodelle zur Dual-Route-Theorie stellen konnektionistische Lesemodelle dar (Seidenberg, 1985; McClelland & Rumelhart, 1986). Ursprünglich sind es Modelle, die entwickelt wurden, um am Computer Sprache bzw. den Spracherwerb zu simulieren. So

erfolgt nach diesen Modellen das Lesen über ein einzelnes Verarbeitungssystem. Visuelle Worterkennung ist durch ein aus drei Ebenen bestehendem Netzwerk repräsentiert, das aus einer (1) *Input-Ebene* (in der Grapheme repräsentiert sind – *visuelle Merkmalsdetektoren*), (2) einer *mittleren* „*verborgenen*“ *Ebene* (indem die Verbindung zwischen Buchstaben und Klang repräsentiert ist – *Buchstabendetektoren*) und (3) einer *Output-Ebene* (in der Phoneme repräsentiert sind – *Klangeinheiten*) besteht. Die Verbindungen zwischen häufig kombinierten Graphem-Phonem-Kombinationen werden nach diesem Modell sukzessive verstärkt und „gewichtet“. Die Repräsentation eines Wortes erfolgt dann im Rahmen dieser Modellannahmen über eine jeweils wortspezifische Netzwerkstruktur aus den zum Wort gehörenden Graphem-Phonem-Verknüpfungen. Aber auch die konnektionistischen Modelle blieben nicht unkritisiert, da die Simulation am Computer an sich funktionierte aber die Frage der Übertragbarkeit auf den Menschen teilweise offen bleibt.

2.5.2.2 Modelle des Leseerwerbs

Neben der Frage unterschiedlicher Strategien beim Leseprozess beschäftigen sich viele Autoren mit der Frage der Entwicklung von Lese- und Rechtschreibfertigkeiten. Sie gehen davon aus, dass sich das Lesen- und Schreibenlernen als stufenweiser Entwicklungsprozess darstellt und Kinder somit beim Lesenlernen qualitativ unterschiedliche Phasen durchlaufen (Frith, 1985; Seymour & McGregor, 1984). Frith (1985), deren Dreiphasenmodell für das Lesen heute als Rahmenmodell für den Schrifterwerb gelten kann (Scheerer-Neumann, 1998, S. 34) beschreibt drei Entwicklungsabschnitte, die aufeinander aufbauen:

(1) Während der **logographischen Phase** lernen Kinder eine umschriebene Menge an Wörtern, die sie anhand besonderer visueller Charakteristika (Wortlänge oder Wortform) erkennen. Das bedeutet, dass zunächst rein visuelle Strategien verwendet werden, um ein bestimmtes Wort zu dessen Schriftbild, dessen phonologischer Form und schließlich dessen Bedeutung zuzuordnen. Laut Frith (1985) entsteht ein so genanntes „*sight vocabulary*“. Da aber nur für bereits bekannte Wörter spezifische visuelle Merkmale für die Worterkennung zur Verfügung stehen, führt diese Lesestrategie zu fehlerhaftem Lesen, wenn ein unbekanntes Wort ähnliche visuelle Merkmale aufweist wie ein bereits bekanntes Wort. Im Zuge der weiteren Entwicklung erreichen die Kinder die alphabetische Stufe.

(2) In der **alphabetischen Phase** lesen Kinder Wörter über erlernte Graphem-Phonem-Zuordnungen. In dieser Phase erfassen die Kinder, dass die Schrift aus Buchstaben und ihren lautlichen Entsprechungen besteht. Die Kinder entdecken das alphabetische Prinzip

und setzen ihre Kenntnis der Identität von Buchstaben und Phonemen sowie das Wissen um deren Zuordnung systematisch zum Erlesen der Wörter ein (Phase des buchstabenweise Erlesens). Auf diese Weise erlernen Kinder das phonologische Rekodieren. Frith (1985) sieht diese Phase als notwendige Durchgangsphase hin zu einem reiferen Lernen.

(3) In der **orthografischen Phase** lernen Kinder die Wortgestalten ganzheitlich zu erfassen (Ganzwortlesen). In diesem Stadium werden die Wörter direkt, also ohne phonologische Rekodierung erkannt. Beim Lesen können bereits Wörter in orthografischen Einheiten wie Morpheme, Silben oder häufig vorkommende Buchstabensequenzen erfasst werden. Aufgrund dieser Informationen können entsprechende Eintragungen im orthografischen Lexikon (mentale Speicherung der Buchstabenfolge vertrauter Wörter) aktiviert und die Wörter unter Ausnutzung der Redundanz der Schriftsprache ökonomisch erfasst werden. Das Dekodieren gelingt schneller und die Wortaussprachen nähern sich der normalen Aussprache. In dieser Phase geht es insbesondere darum, den Prozess des phonologischen Rekodierens so weit zu automatisieren, dass er keine Aufmerksamkeit mehr erfordert.

Die Begründung für die Darstellung des Schriftspracherwerbs in Stufen liegt für Frith (1985) in der Tatsache, dass die kognitive Entwicklung in Phasen (Stufen) und nicht kontinuierlich verläuft (Scheerer-Neumann, 1998, S. 33/34). Zentral für das Stufenmodell von Frith (1985) ist die Hervorhebung der aufeinander aufbauenden kindlichen Strategien des Schriftsprachzugangs. Der Eintritt in eine neue Phase geht mit dem Verschmelzen der alten und der neu erworbenen Strategie einher. Das Modell versucht somit darzustellen, wie sich in unterschiedlich langen, individuellen Entwicklungsverläufen Annäherungen an die Lesekompetenz ergeben. So können spezielle Störungen des Erwerbsprozesses als Übergangsprobleme von einer Stufe zur anderen aufgefasst werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die meisten Modelle große Übereinstimmungen hinsichtlich Graphem-Phonem-Zuordnungen und Existenz eines mentalen Lexikons aufweisen. Ein wesentliches Problem besteht aber in der Frage, ob die im englischen Sprachraum konzipierten Modelle auch auf den deutschsprachigen Raum übertragbar sind, da es zwischen der englischen und deutschen Schriftsprache erhebliche Unterschiede gibt (Klarheit der Graphem-Phonem-Zuordnung). Dies gilt jedoch für Modelle, die sowohl den Leseprozess als auch die Leseentwicklung beschreiben.

2.5.3 Hirnfunktionelle Befunde zur ungestörten Sprachverarbeitung

In den letzten Jahren konnte durch eine Vielzahl an Studien mit bildgebenden Verfahren (Positronen Emissions Tomographie - PET, fMRI) belegt werden, dass unterschiedliche funktionelle Aspekte der Sprachverarbeitung, wie frühe visuelle, phonologische und semantische Verarbeitungsschritte, in unterschiedlichen anatomischen Bereichen des Gehirns repräsentiert sind (Überblick in Posner et al., 1999; Grigorenko, 2001; Demonet & Thierry, 2001). Allgemein wurden in zahlreichen Studien zu Sprachverarbeitung immer wieder eine Reihe von Regionen genannt. Zur Orientierung wird für die folgenden Kapitel eine seitliche Ansicht des Gehirns (links) und die Einteilung der Gehirnregionen nach Brodmann (rechts) dargestellt.

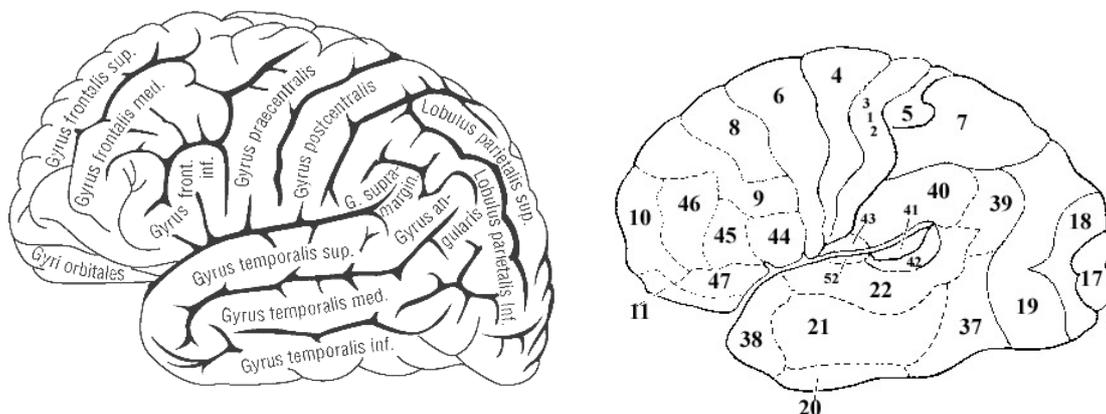
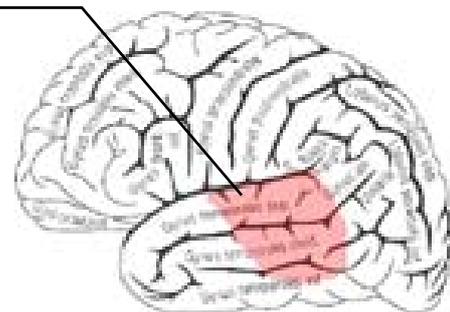


Abbildung 3: Links: Wesentliche Anatomische Lokalisationen; Rechts: Einteilung nach Brodmann (BA).

Studien zur ungestörten auditorischen Sprachverarbeitung

Temporaler Kortex (incl. Wernicke-Areal)

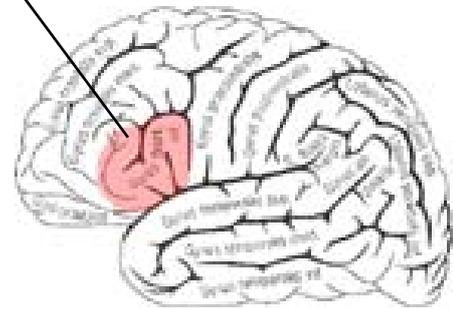
Im Rahmen einer PET-Studie konnte Burton et al. (2001) darlegen, dass der posterior superior temporale Gyrus eine wesentliche Rolle bei der auditorischen Sprachverarbeitung spielt. Ferner beobachteten Binder et al. (1995), dass der primär auditorische Kortex gleichartig auf nichtsprachliche und sprachliche auditorische Stimuli reagiert, wohingegen angrenzende Regionen im superior temporalen Kortex stärker auf sprachliche Klänge reagieren. Laut Demonet et al. (1992, 1994) ist ein Teil des linken superior temporalen Gyrus (Wernicke/BA22) an phonologischen Verknüpfungen und der Herstellung multi-silbischer Darstellungen beteiligt. So konnten die Autoren zeigen, dass eine einfache Phonementdeckungsaufgabe zu bilateralen Aktivierungen im superior tem-



poralen Gyrus führt, wohingegen bei komplexeren Aufgaben starke links-rechts-Asymmetrien beobachtet wurden. Die Regionen, die bei diesen phonologischen Prozessen involviert sind, sind nicht nur auf das Wernicke-Areal beschränkt, sondern verteilen sich ebenso in den medial und inferior temporalen Gyrus, vor allem dann, wenn lexikalisches Material inbegriffen ist. So kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass das Wernicke-Areal bei phonologischen und semantischen Operationen (z.B. Verbgenerierungsaufgaben) und dem lexikalischen Zugang beteiligt ist (Demonet et al., 1994; Demonet & Thierry, 2001).

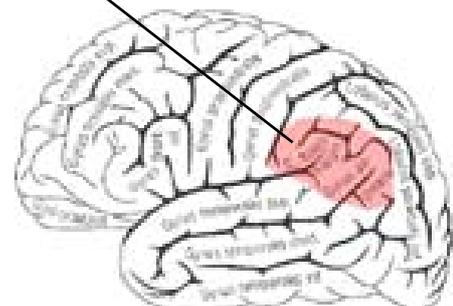
Inferior frontaler Kortex (incl. Broca-Areal)

Auf der Grundlage verschiedener Aphasiestudien konnte nachgewiesen werden, dass der *posteriore* Teil des linken inferior frontalen Gyrus (IFG) bei der Planung und Programmierung des Sprachoutputs eine wesentliche Rolle spielt. Der *inferiore* Teil des linken IFG (BA47) wurde eher mit semantischen Prozessen verbunden, da hier vor allem spezifische Aktivierungen bei Verbgenerierungsaufgaben beobachtet wurden (Demonet & Thierry, 2001). Der *superiore* Teil des Broca-Areals (BA44) wird mit phonetischer und phonologischer Verarbeitung assoziiert, vor allem bei Aufgaben, die nicht explizit eine laute Aussprache erfordern. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass im Broca-Areal Wörter (oder Nonwörter) „innerlich“ vorgesprochen werden um das gehörte Wort kurzfristig zu „lagern“. Schließlich wird das Wort wiederholt, bevor es z.B. ausgesprochen wird, was die Annahme eines sich hier befindenden verbalen Arbeitsgedächtnisses stützt. D.h. je schwieriger und weniger bekannt das dargebotene Wort ist, desto länger dauert dieser innerliche „Abrufprozess“ und desto stärker ist die Aktivierung des Broca-Areals (Demonet & Thierry, 2001).



Parietaler Kortex

Die Beteiligung der artikulatorischen Schleife und des Kurzzeitgedächtnisses bei phonologischen Prozessen scheint zu einer Aktivierung des inferioreren Teils des linken supramarginalen Gyrus zu führen (Binder et al., 1997a, 1997b; Paulesu et al.,



1993; Demonet & Thierry, 2001). Die Autoren gehen davon aus, dass Teile des parietalen Kortex bei kurzfristiger Speicherung von sprachlichen oder auditorischen Stimuli involviert sind.

Studien zu visuellen Aspekten der ungestörten Sprachverarbeitung

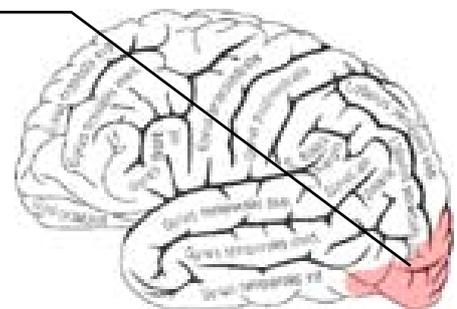
Laut Demonet und Thierry (2001) konnten Studien belegen, dass je nach in der Untersuchung verwendeten Paradigma und theoretischem Modell, beim Leseprozess eine Vielzahl an verschiedenen Arealen aktiviert ist. So beschreiben Fiez und Petersen (1998) den linken *occipito-temporalen Kortex* (BA18/19/37) und den linken *inferior frontalen Gyrus* (BA44/45/46/47) als zentrale Gebiete für die Verarbeitung visuell präsentierten Stimulusmaterials.

Occipito-temporaler Kortex

Die Verarbeitung einfacher Wörter führt nach Posner et al. (1999) zu Aktivierungen im primären visuellen Kortex. So konnten gerade bei der Betrachtung einfacher Wörter (im Vergleich zu einem Fixationspunkt) die stärksten Aktivierungen in den linken und rechten extrastriären visuellen Arealen beobachtet werden (Posner & Raichle, 1994).

Posner et al. (1999) stellten fest, dass die rechte Hemisphäre bei buchstabenähnlichen Zeichen („false fonts“) aktiviert ist. Diese Beobachtung konnte jedoch nicht eindeutig bei Wörtern oder Buchstaben gemacht werden. Demgegenüber scheinen linksseitig extrastriäre Aktivierungen spezifischer zu sein. So konnten Petersen et al. (1990) zeigen, dass neben einer Aktivierung in primären visuellen Kortextbereichen eine Aktivierung des linken medialen extrastriären visuellen Kortex bei Wörtern und Nonwörtern, jedoch nicht bei Konsonantenstrings, zu beobachten ist. Laut Cohen et al. (2000, 2002) hat diese Region die Aufgabe, die visuelle Wortform von Buchstaben und Grapheme zu erkennen. Die Spezifität dieser Aktivierung lässt die Schlussfolgerung zu, dass der medial extrastriäre Kortex für die visuelle Organisation von Buchstaben innerhalb der alphabetischen Sprache sensitiv ist und somit als „visuelle Wortformarea“ bezeichnet werden kann (Petersen et al., 1990; Pugh et al., 1996, 1997; Posner et al., 1999; gleichgesetzt mit lingualer Gyrus; Demonet & Thierry, 2001; gleichgesetzt mit fusiformer Gyrus, Cohen et al., 2002).

Über die exakte Lokalisation der „visuellen Wortformarea“ herrscht jedoch aufgrund widersprüchlicher Befunde noch Unklarheit. So gehen Weis et al. (2001) davon aus, dass bei



der Aktivierung eines einzelnen Wortes drei Verarbeitungsebenen eine Rolle spielen, bei denen konzeptuelles, lexikalisches und sublexikalisches Wissen einbezogen wird. Im Rahmen einer Studie mit ereigniskorreliertem fMRI (efMRI) sollten Probanden versuchen Homonyme (Wörter mit zwei Bedeutungen; z.B. „Schloss“) aus zwei präsentierten Wörtern zu bilden. Bei der erfolgreichen Synthese eines Homonyms ergaben sich bilaterale Aktivierungen im supramarginalen und angularen Gyrus. Die Autoren schlussfolgern, dass die erfolgreiche Lösung eines Homonyms den mehrfachen Zugang zum mentalen Lexikon erfordert und somit ein „Wortform-Wissen“ darstellt. Laut Weis et al. (2001) bestätigt die Aktivierung im supramarginalen und angularen Gyrus die Annahme, dass hier das Zentrum der geschriebenen Sprache und somit des „visuellen Wortformlexikons“ liegt (vgl. Menard et al., 1996).

Indefrey et al. (1997) sehen jedoch die dargestellten Aktivierungen und Interpretationen als kritisch und methodisch bedenklich. Sie gehen davon aus, dass die beobachteten Aktivierungen im linken medialen extrastriären Kortex von der Darbietungszeit und Länge der Stimuli abhängen (vgl. Howard et al., 1992). Im Rahmen einer fMRI-Studie sollte explizit der Einfluss der „Stringlänge“ auf die Aktivierung getestet werden. Hierbei sollten die Probanden Pseudowörter, einfache „false fonts“ und „false font“-Strings betrachten. Die Länge und Variation der „false font“-Strings wurde mit der Länge der Pseudowörter gematcht. Die Bedingungen und Kontraste sind im folgenden dargestellt:

| Bezeichnung (Kontrast) | Aktivierungsbedingung | | Kontrollbedingung |
|-------------------------------|----------------------------------|-----|----------------------------------|
| 1. „Maximaler Kontrast“ | Pseudowort (D E B A M) | vs. | Einfacher „false font“ (/P) |
| 2. „Ausschluss“ | Pseudowort (D E B A M) | vs. | „False font“-String (/P/P/P/P/P) |
| 3. „Isolierung“ | „False font“-String (/P/P/P/P/P) | vs. | Einfacher „false font“ (/P) |

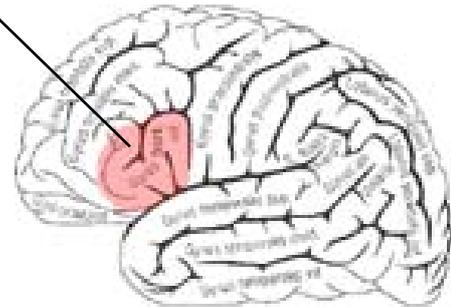
Die stärkste Aktivierung wurde beim „maximalen Kontrast“ im medialen occipitalen Kortex und in sprachverarbeitenden Arealen beobachtet. Diese beobachteten Aktivierungen zeigten sich jedoch nicht mehr, wenn die Aktivierung der Pseudowörter von den gleich langen „false font“-Strings abgezogen wurden. Da ein Vergleich der Pseudowörter gegen einfache „false fonts“ zu Aktivierungen im medial extrastriären Kortex führte und diese jedoch nicht mehr bei vergleichbarer Länge („Ausschluss“) beobachtet werden konnten, schlussfolgern die Autoren, dass Aktivierungsmuster im medial extrastriären Kortex nicht den lexikalischen Status der wortähnlichen Stimuli repräsentieren, sondern nur Ausdruck von unterschiedlicher Länge bzw. visueller Komplexität sei (vgl. Chertkow & Murtha, 1997).

Studien zu phonologischen Aspekten der ungestörten Sprachverarbeitung

In den letzten Jahren wurden zunehmend phonologische Verarbeitungsprozesse untersucht. So konnte gezeigt werden, dass eine anscheinend einfache Aufgabe des (lauten) Lesens einen komplexen Prozess darstellt und zu einer umfangreichen neuronalen Netzwerkaktivierung des Gehirns führt (Lassen et al., 1978; Grigorenko et al., 2001).

Links frontales Operculum/Broca

Obwohl das linke frontale Operculum nicht nur an visueller Wortverarbeitung beteiligt ist, scheint diese Region eine wesentliche Rolle beim Lesen und speziell beim Lesen niedrigfrequenter Nonwörter zu spielen. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass in dieser Region neben semantischen Prozessen (BA47) vor allem Übersetzungen vom Orthografischen zum Phonologischen eine Rolle spielen. Die Beteiligung des Broca-Areals bei der Produktion von Sprache konnte in zahlreichen Studien belegt werden. So konnten Warburton et al. (1996) zeigen, dass der linke inferior frontale Kortex bei stillen Wiederholungen von Nonwörtern aktiviert ist. Price et al. (1994, 1996) konnten belegen, dass Aktivierungen im linken inferior und mittleren frontalen Kortex beim lauten und leisen Lesen sowie einer lexikalischen Entscheidungsaufgabe visuell präsentierter Wörter und Nonwörter zu beobachten sind. Des Weiteren war bei der lexikalischen Entscheidungsaufgabe das supplementär motorische Areal (SMA) aktiviert. Aktivierungen in diesen Regionen lassen laut Price et al. (1994) vermuten, dass Probanden hierbei zum Lösen einer Aufgabe eine bestimmte phonologische Strategie nutzen und zwar indem sie Wörter und Nonwörter „innerlich aussprechen“. Somit basiert die Entscheidung eher auf dem phonologischen Klangbild des Stimulus als auf der visuellen Wortform.

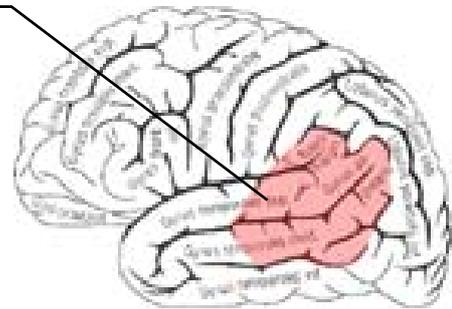


In einer fMRI-Untersuchung von Paulesu et al. (1997) sollten sechs Probanden phonematische und semantische Aufgaben bearbeiten. Die Ergebnisse für beide Aufgaben ergaben gemeinsame Aktivierungen im anterioren triangulären Teil des linken IFG (BA45) und im linken Thalamus. Die semantische Aufgabe ergab nur Aktivierungen im anterioren Teil von Broca, wohingegen die phonemische Aufgabe zudem noch den posterioren Teil (BA44/6) aktivierte, der mit artikulatorisch/phonologischen Prozessen assoziiert wird. Zusammenfassend sprechen die Ergebnisse laut Paulesu et al. (1997) dafür, dass der mehr anterior gelegene Teil des Broca-Areals in der Abfrage der Wortbedeutung und somit bei

Wort- und Verbgenerierung involviert ist, während der posteriore Teil dafür spezialisiert ist, den Zugang zu Wörtern über einen artikulatorischen Schlüssel (Code) zu erlangen.

Temporo-parietale Kortexareale

Ergebnisse aus Studien (z.B. Howard et al., 1992; Petersen et al., 1990; Shaywitz et al., 1995) lassen den Schluss zu, dass die inferior temporo-occipitale Region (BA37) in die Objekterkennung (Buchstaben & Wörter) involviert ist. Weitere PET-Studien konnten zeigen, dass Aktivierungen in der linken BA37 und dem linken angularen Gyrus mit der Leistung bei der Bearbeitung der Aufgabe (task performance) korrelieren (Grigorenko, 2001). Aufgaben mit einer phonologisch gesteigerten Anforderung (Reimaufgabe) führten zu Aktivierungen in temporo-parietalen Kortexarealen (Petersen et al., 1989). Dies führte zur Annahme, dass Strukturen im temporo-parietalen Kortex für das phonologische Enkodieren von Wörtern entscheidend sein könnten. Basierend auf der Annahme, dass phonologische Verarbeitungsprozesse verstärkt beim lauten Lesen (im Gegensatz zum stillen Lesen) involviert sind, konnten Bookheimer et al. (1995) gerade beim lauten Lesen Aktivierungen im superior-temporalen und inferior-parietalen Bereich nachweisen. Demonet et al. (1992, 1994) untersuchten die Verarbeitung phonologischer und semantischer Prozesse mittels eines auditorischen Phonemmonitoring Paradigmas. Hierbei ergaben sich beim direkten Vergleich der Aktivierungsmuster zwischen der Phonemaufgabe und einer Aufgabe zur lexiko-semantischen Verarbeitung Aktivierungsmuster im linken supramarginalen und angularen Gyrus (BA39/40) und im linken präfrontalen Gyrus (BA8/9). Diese Areale wurden daher eher mit einer lexiko-semantischen Verarbeitung in Zusammenhang gebracht. Die Phonemaufgabe führte dagegen zu Aktivierungen im linken temporalen Lappen (anteriore Bereich der Wernicke-Region & des superior temporalen Gyrus) sowie im Broca Areal (BA44/45). Diese Ergebnisse unterstützten Befunde, die Aktivierungen in BA44 bei leisem Phonemmonitoring beobachteten und dies als Beweis für eine spezifische phonologische Schleife ansahen. Shaywitz et al. (1995) beschrieben für eine Reimaufgabe eine maximale Aktivierung in anterioren temporalen Kortexbereichen. Aktivierungen im Wernicke-Areal (BA22/21) wurden hauptsächlich bei Aufgaben zum leisen Lesen beobachtet. Obwohl diese Ergebnisse die Rolle bei phonologischer Verarbeitung beschreiben, ist jedoch laut Demonet und Thierry (2001) noch immer unklar, ob diese links temporale Aktivierung mit



lexikalischen oder eher phonologischen Operationen in Verbindung steht. So sieht Price (1998) eine spezifische Rolle für die links occipito-temporalen Regionen und den linken supramarginalen Gyrus beim Zugang zum phonologischen Code aus dem visuellen Input.

Pugh et al. (1996) modellierten den ganzheitlichen Leseprozess als eine Vielzahl von visuellen, phonologischen und semantischen Prozessen (Slashpaarabgleich, Buchstabenaufgaben, Nonwortreimen & semantische Entscheidungsaufgaben). Auf diese Arbeitsgruppe um Pugh und Shaywitz sind im Wesentlichen die **hierarchischen Paradigmen** zur Sprachverarbeitung zurückzuführen, die einer Vielzahl an Studien zur ungestörten und gestörten Sprachverarbeitung als Grundlage dienen. In Studien, die auf diesen Paradigmen basierten, konnten frontale Regionen besonders mit phonologischen Prozessen assoziiert werden. Jedoch wurden keine eindeutigen Befunde für orthografische oder semantische Prozesse beobachtet. Laut Pugh et al. (1996) führen phonologische Prozesse zu starken Aktivierungen in frontalen und temporalen Regionen. Jedoch sind die Aktivierungen in frontalen Regionen (lateral orbital, präfrontal dorsolateral & IFG) am stärksten bei Reimaufgaben und geringer bei lexikalisch-semantischen Prozessen zu beobachten. Das heißt, nur wenn sich die Experimental- und Kontrollbedingung in einer phonologischen Dimension unterscheiden, kommt es zu starken Aktivierungsmustern in frontalen Regionen (Pugh et al., 1996). Dies gilt nicht nur für das Nonwortreimen, sondern auch für das Wortlesen. Dies widerspricht laut Pugh et al. (1996) eigentlich den Dual-Route-Theorien, die zwischen Nonwortlesen (assemblierter Phonologie) und Wortlesen (adressierter Phonologie) trennen. In Studien von Paulesu et al. (1993) wurden die Aktivierungen im IFG (BA44/45) mit Prozessen des Kurzzeitgedächtnisses in Verbindung gebracht. Pugh et al. (1996) vermuten, dass der IFG sowohl für die Umwandlung der Schrift in eine phonologische Repräsentation relevant ist als auch für die Übermittlung der Information ins Kurzzeitgedächtnis. Temporale Regionen scheinen laut Pugh et al. (1996) hingegen eher „multifunktionell“ zu sein. Insgesamt schlussfolgern die Autoren, dass die temporalen Regionen eine relevante Struktur für alle Verarbeitungsprozesse darstellen. Vor allem aber werden der mittlere und superior temporale Gyrus mit lexikalisch-semantischen Prozessen assoziiert. Lurito et al. (2000) betonen, dass Reimaufgaben eine „spezifischere“ Aktivierung hervorrufen als Wortflüssigkeitsaufgaben und somit für klinische Studien geeignet sind.

Sprachverarbeitung vs. Sprachproduktion

Das SMA, der anterior cinguläre Kortex, die Basalganglien, das Kleinhirn und der primär sensorische Kortex sind beim Sprachoutput involviert. Die meisten dieser Gebiete sind in die Planung und muskulären Koordination des Sprechens involviert. So wollten Buchsbaum et al. (2001) der Frage nachgehen, ob es unterschiedliche phonologische Systeme für Sprachverarbeitung und Sprachproduktion gibt. In einer fMRI-Studie mussten sieben Probanden Nonwörter anhören und innerlich vorsprechen. Die Ergebnisse zeigten für beide Aufgaben (Sprachverständnis und -Produktion) vorwiegend Aktivierungen in zwei Regionen des linken posterior superior temporalen Gyrus. Insgesamt schienen sich somit das neuronale Netz für die phonologische Verarbeitung der Sprachproduktion mit dem des Sprachverständnisses teilweise anatomisch zu überlappen. Weitere Ergebnisse deuten darauf hin, dass sowohl links frontale Regionen als auch die anteriore Insula eine größere Rolle bei der Sprachproduktion als beim Sprachverständnis spielen. Insgesamt decken sich die Ergebnisse mit denen von Indefrey und Levelt (2000), deren Annahme ist, dass der Zugang zum phonologischen Code durch den linken posterior superior temporalen Gyrus unterstützt wird, wohingegen Prozesse der Silbentrennung eher durch links frontale Strukturen generiert werden.

Studien zum internationalen Sprachvergleich

Studien zum Vergleich der Sprachverarbeitung in verschiedenen Sprachräumen zeigen, dass die Graphem-Phonem-Zuordnung entscheidenden Einfluss auf den Einsatz unterschiedlicher Lesestrategien hat (Paulesu et al., 2000). So zeichneten sich auf der Ebene von Verhaltensdaten italienische Studenten durch schnelleres Wort- und Nonwortlesen aus als Englische Studenten. In PET-Studien konnten allgemeine Netzwerke identifiziert werden, die bei beiden Sprachen aktiviert waren. Dieses System schloss den linken inferior frontalen und prämotorischen Kortex, sowie den superioren, medialen, inferioren temporalen und fusiformen Gyrus mit ein. Die Mehrheit der Gebiete der linken Hemisphäre war bei Nonwörtern stärker aktiviert als bei Wörtern. Italiener, die einem Sprachraum mit einer stringenten Graphem-Phonem-Zuordnung angehören, zeigten im linken superior-temporalen und inferior parietalem Kortex (Planum temporale) sowohl beim Wort- als auch beim Nonwortlesen stärkere Aktivierungen. Bei Engländern hingegen waren stärkere Aktivierungen in links frontalen (IFG) sowie posterior inferior temporalen Regionen während dem Nonwortlesen zu verzeichnen. Diese wurden mit Wortfindung während der beiden experimentellen Lese- und Benennungsaufgaben assoziiert.

Studien zur ungestörten Wortverarbeitung bei Kindern

Holland et al. (2001) untersuchten mittels einer Wortflüssigkeitsaufgabe 17 Kinder. Die akustisch dargebotene Aufgabe beinhaltete eine Serie von Substantiven, zu denen die Kinder Wörter generieren sollten (Zum Wort „ball“ die Wörter „kick“ & „hit“ ...). Die Kinder sollten sich die Wörter still merken und nicht aussprechen. Die fMRI-Ergebnisse zeigten laut Holland et al. (2001) typische Gebiete, die mit Sprachverarbeitung in Verbindung gebracht werden. Aktivierungen wurden alle in der linken Hemisphäre im Broca-Areal, Wernicke-Areal, dem Cingulum und dem dorsolateralen präfrontalen Kortex beschrieben. Eine Korrelation mit dem Alter ergab einen signifikanten Effekt im Broca-Areal. Die Autoren schlussfolgerten, dass die beobachteten aufgabenspezifischen und altersabhängigen Aktivierungen im linken IFG andeuten, dass die Entwicklung von aufgabenspezifischen kognitiven und linguistischen Fähigkeiten einer Lateralisierung unterliegen.

Modellgeleitete Studien (Dual-Route-Modell)

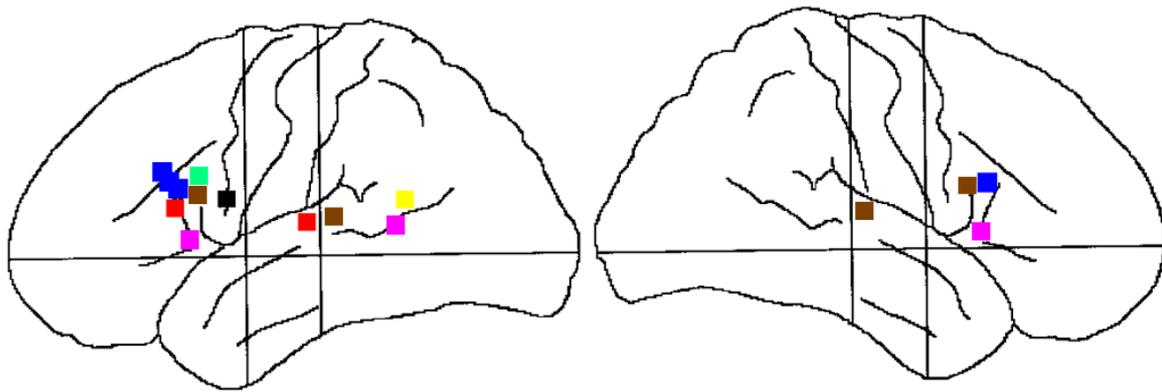
Fiebach et al. (2002) untersuchten Probanden, die lexikalische Entscheidungen bezogen auf hochfrequente und niedrigfrequente Wörter und Nonwörter treffen mussten. Mittels efMRI fanden die Autoren Hinweise für unterschiedliche funktionelle Beiträge verschiedener Gehirnregionen für den Zugriff auf das mentale Lexikon. Beim Vergleich der auftretenden Aktivierungen von Wörtern mit Nonwörtern konnten bilaterale Aktivierungen in occipito-temporalen Gehirnregionen (incl. fusiformer Gyrus) und im linken posterior mittleren temporalen Gyrus (MTG) beobachtet werden. Dieses bilaterale occipito-temporale Netzwerk ist an der „prälexikalischen“ Erkennung der visuellen Wortform beteiligt. Innerhalb des fusiformen Gyrus sind Zugriffscodes für den MTG abgespeichert. Innerhalb des MTG sollen semantische und phonologische Informationen repräsentiert sein. Die beobachteten Aktivierungen in occipito-temporalen Gehirnregionen für Wortlesen (>Nonwortlesen) überlagerten sich laut Fiebach et al. (2002) mit dem „ventralen Netzwerk“ für visuelle Objekterkennung (vgl. 2.7). Aktivierungen im linken IFG, der anterioren Insula und in subkortikalen Strukturen wurden durch die Wortfrequenz beeinflusst, was zu der Annahme führte, dass diese Gehirnregionen dann aktiviert sind wenn der lexikalische Zugriff erschwert ist. Niedrigfrequente Wörter und Nonwörter führten im Vergleich zu hochfrequenten Wörtern zu größeren Aktivierungen im superioren pars opercularis (BA44) des linken IFG, in der anterioren Insula, im Thalamus und im Nucleus Caudatus. Aktivierungen im pars triangularis (BA45) des linken IFG wurden nur für niedrigfrequente Wörter beobachtet. Somit scheinen der superioren pars opercularis (BA44) zusam-

men mit der anterioren Insula und subkortikalen Strukturen den lexikalischen Zugriff durch Graphem-Phonem-Konversion zu vermitteln, während der pars triangularis (BA45) an Mechanismen der lexikalischen Auswahl bzw. an Prozessen der semantischen Abfrage beteiligt ist. Insgesamt gehen Fiebach et al. (2002) davon aus, dass ihre Ergebnisse die Dual-Route-Modelle zur visuellen Wortverarbeitung stützen. Die beobachteten Aktivierungen in BA44 werden als assemblierte Route interpretiert, da der korrekte lexikalische Input nicht schnell genug identifiziert werden kann (auf der Basis der visuellen Wortformrepräsentation; adressiert).

In vier Einzelfallstudien untersuchten Simos et al. (2000) Epilepsiepatienten mittels präoperativer elektrokortikaler Stimulation. Hierbei handelte es sich um elektrische Reize mit denen die Funktion der kurzzeitig stimulierten Areale funktionsuntüchtig gemacht wurde. Die Autoren wollten mittels Nonwörtern (assemblierter Leseweg) und Wörtern (adressierter Leseweg) zwei funktionell-anatomisch verschiedene Lesewege differenzieren. Die Ergebnisse zeigten bei der elektrischen Stimulation des posterioren superior temporalen Gyrus eine selektive Beeinträchtigung des Nonwortlesens, während das Wortlesen nicht beeinträchtigt war. Simos et al. (2000) sahen dies als den Beweis dafür, dass es bei der LRS zu keiner Aktivierung des temporalen Gyrus kommen kann, da hier die assemblierte Strecke beeinträchtigt ist.

2.5.3.1 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann spekuliert werden, dass verschiedene phonologische Verarbeitungsschritte (adressiert und assembliert) funktionell-lokalisatorisch differenzierbar sind (siehe Abbildung 4). Aufgaben zur assemblierten phonologischen Verarbeitung führen in PET- oder fMRI-Studien an Erwachsenen zu Aktivierungen im Broca-Areal/prämotorischem Kortex (BA44/45/6: Paulesu et al., 1993; Demonet et al., 1994) und im superioren temporalen Gyrus/supramarginalen Gyrus (BA 40/22: Paulesu et al., 1993; Price et al., 1997). Aufgaben, die insbesondere adressierte phonologische Verarbeitung erfordern, führen zu Aktivierungen im linken frontalen Operculum und im linken inferior-posterioren temporalen Kortex (BA37; Bookheimer et al., 1995; Price & Friston, 1997).



- Reimen visuell präsentierter Wörter, PET (Petersen et al., 1988; Posner et al., 1988)
- Phonologisch ähnliche bzw. unterschiedliche Nonwörter in lexikalischer Entscheidungsaufgabe, neuronale Aktivität (Bechtereva et al., 1991)
- Auditorisches Phonemmonitoring, PET (Demonet et al., 1992)
- Graphem-Phonem-Transformation visuell präsentierter Buchstaben, PET (Sergent et al., 1992)
- Reimen akustisch präsentierter Silben, PET (Zatorre et al., 1992)
- Reimen visuell präsentierter Buchstaben, PET (Paulesu et al., 1993)
- Reimen visuell präsentierter Nonwörter, fMRI (Shaywitz et al., 1995)

Abbildung 4: Zusammenfassung ausgewählter Aktivierungen bei phonologischer Verarbeitung (vgl. Posner et al., 1999).

Die dargestellten Ergebnisse bilden einen experimentellen Zugang zur detaillierten Untersuchung cerebraler Repräsentation bei der LRS. Bisher liegen jedoch nur wenige Befunde mit bildgebenden Verfahren bei Kindern vor.

2.6 Gestörte Sprachverarbeitung

2.6.1 Phonologische Defizithypothese

Sowohl klinische Beobachtungen als auch empirische Befunde zeigen, dass die häufigsten Probleme bei Probanden mit LRS auf der Ebene der phonologischen Verarbeitung angesiedelt sind. Deswegen ist als Erklärungsansatz für die LRS die Annahme eines phonologischen Defizits heute weitgehendst akzeptiert (Frith, 1981; Frith et al., 1995a; Snowling, 1981; Temple, 2002; Übersicht in Snowling, 1991, Grigorenko, 2001; Shaywitz et al., 2001). Insgesamt scheinen Probanden mit LRS speziell bei Aufgaben Probleme zu haben, die eine phonologische Verarbeitung (wie Reimen, Silbenzählen, Nonwörter erlesen) erfordern (Temple, 2002). Von besonderer Bedeutung ist, dass ein Defizit der phonologischen Bewusstheit bereits im Vorschulalter erkennbar ist und als Prädiktor für die Ausbildung einer LRS im Schulalter genutzt werden kann (Schneider & Näslund, 1993).

2.6.2 Lesemodelle bei LRS

Bezüglich des in 2.5.2.1 beschriebenen Zwei-Wege-Modells beschreibt Wimmer (1996) in seinen Untersuchungen zum Leserwerb bei Kindern mit LRS eine Verbesserung des fehlerfreien lautgetreuen Lesens nach der Grundschulzeit, wobei die Lesegeschwindigkeit jedoch weiterhin hinter der normallesender Kinder zurückbleibt. Wimmer (1996) postuliert, dass der Zugriff auf das semantische Lexikon (direkter Weg; vgl. Abbildung 2) beeinträchtigt bzw. noch nicht ausgebildet ist. Jorm & Share (1983) postulieren, dass ein Teil der Kinder mit Leseschwierigkeiten Defizite auf der adressierten Strecke aufweisen und die Bedeutung von Wörtern ausschließlich auf indirekt-lexikalischem Weg zu erlangen versuchen. Empirische Befunde deuten somit darauf hin, dass bei Probanden mit LRS Strategien für die Benutzung beider Routen mangelhaft ausgebildet sind.

Bezogen auf das in 2.5.2.2 beschriebene Stufenmodell der Entwicklung des Lesens und Schreibens entsteht nach Frith (1985) eine LRS durch Übergangsprobleme von der logographischen in die alphabetische Stufe. So kann sich ein Kind in der logographischen Phase eine begrenzte Anzahl von Wörtern merken (z.B. „*McDonalds*“). Jedoch wird das ständige Speichern der Wörter zu schwer. Um Fortschritte erzielen zu können müsste das Kind in die alphabetische Phase vordringen. Wie bereits oben dargestellt erfordert dies den Erwerb der Graphem-Phonem-Korrespondenz-Regel. Laut Frith (1985) liegt das Hauptdefizit von Kindern mit einer LRS in der Unfähigkeit dieses Regelerwerbs. Zudem beschreibt Sie, dass die Entwicklung von Lese- und Schreibfertigkeiten in einer wechselseitigen Abhängigkeit stehen. Damit meint sie, wenn auf der Stufe der logographischen Ebene nicht zumindest rudimentäre Kenntnisse über die Graphem-Phonem-Korrespondenz vorliegen, ist auch kein Übertritt in die alphabetische Phase möglich. Sie stellt folglich fest, dass Kinder mit einer LRS bereits auf der Ebene der logographischen Stufe „stehen bleiben“.

2.6.3 Hirnfunktionelle Befunde zum gestörten Leseprozess

Laut Shaywitz et al. (2001) ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass es sich beim phonologischen Defizit um ein spezifisches „Teildefizit“ handelt. D.h. andere nichtphonologische Fähigkeiten, wie höhere kognitive und linguistische Funktionen (allgemeine Intelligenz, logisches Denkvermögen, Wortschatz & Satzbau) können als intakt betrachtet werden. Dies erklärt nach Shaywitz et al. (2001) den Widerspruch des gemeinsamen Auftretens einer durchschnittlichen oder sogar überdurchschnittlichen Intelligenz und größten Schwierigkeiten beim Lesen. In diesem Sinne blockiert dieses umschriebene Defizit einer

„untergeordneten“ linguistischen (phonologischen) Funktion den Zugang zu „höheren“ Prozessen und somit z.B. zu der Fähigkeit, den Sinn eines Texts zu erfassen. Experimentell sollte sich diese Beeinträchtigung insbesondere bei erhöhten Anforderungen an die phonologische Verarbeitung widerspiegeln. Von besonderem Interesse ist, ob auf kortikaler Ebene nachweisbare Korrelate für diese Schwächen vorliegen. Im einzelnen soll geklärt werden, welche phonologische Verarbeitungsstrategien (assemblierte Phonologie vs. adressierte Phonologie) bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mit einer LRS im Vergleich zu Kontrollprobanden betroffen sind. Eine besondere Betonung liegt dabei auf der Untersuchung inferior-frontaler (Broca-Areal & unmittelbare Umgebung) und posterior-temporalen Areale. Ausgehend von Befunden an Erwachsenen mit LRS (Paulesu et al. 1996; Shaywitz et al. 1998) wird ein dysfunktionales Zusammenwirken der beteiligten Sprachverarbeitungssysteme angenommen (Diskonnektionshypothese).

Studien zur gestörten auditorischen Sprachverarbeitung

Temple et al. (2000) untersuchten 10 Kontrollprobanden und 8 Probanden mit LRS mittels eines akustischen Stimulationsparadigmas im fMRI. Die Autoren gehen davon aus, dass das phonologische Defizit der LRS eine fundamentale Störung in der Verarbeitung und Integration von schnellen aufeinanderfolgenden und kurzen Signalen im ZNS widerspiegelt. Diesbezüglich ist bei Probanden mit LRS die Fähigkeit, akustische Reize zu unterscheiden, beeinträchtigt (wichtig für die Unterscheidung von Phonemen). Im Rahmen einer Tondiskriminationsaufgabe machten normale Leser weniger Fehler als Probanden mit LRS. Somit konnte eine leichte Reduktion der Diskriminationsfähigkeit bei Probanden mit LRS gezeigt werden. Bei den fMRI-Analysen zeigten Kontrollprobanden bei schnellen Stimuli stärkere Aktivierungen als bei langsamen Stimuli in linken präfrontalen Regionen (BA46/10/9). Im Gruppenvergleich konnte für schnell wechselnde Stimuli eine Minderaktivierung im linken präfrontalen Kortex, dem mittleren und superior frontalen Gyrus (BA46/10/9) bei Probanden mit LRS dargestellt werden. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der linke präfrontale Kortex bei nichtsprachlichen hochfrequenten akustischen Stimuli eine wichtige Rolle spielt. Das Fehlen der Aktivierung bei Probanden mit LRS zeigt laut Temple et al. (2001) die zentrale Rolle dieser Region beim Sprachverständnis und beim Lesen (Überblick in Temple, 2002).

Studien zu visuellen Aspekten der gestörten Sprachverarbeitung

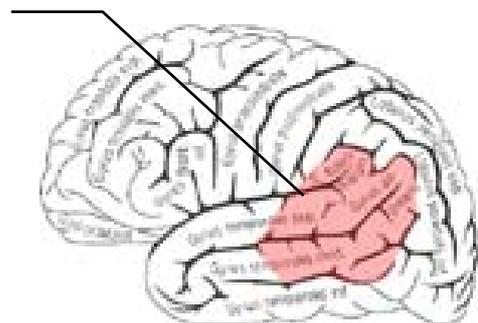
Eden et al. (1996) untersuchten die Rolle der visuellen Verarbeitung bei der LRS, indem sie ihren Probanden bewegliche Stimuli präsentierten. Diese Stimuli führten zu Aktivierungen in visuellen Regionen (V5) bei Kontrollprobanden, jedoch nicht bei Probanden mit LRS. Nichtbewegliche Stimuli führten hingegen zu vergleichbaren Aktivierungen in V1/V2 und im extrastriären Kortex bei beiden Gruppen (vgl. Vanni et al., 1997). Diese „Inaktivierung“ wurde als Marker für Abweichungen der Hirnfunktionen interpretiert, die bei komplexen Systemen des Lesens und Schreibens involviert sind. In einer Untersuchung von Demb et al. (1998) wurden 3 Probanden mit LRS mittels einer visuellen Geschwindigkeits-Diskriminationsaufgabe untersucht. Hierbei zeigten Probanden mit LRS im Vergleich zu den Kontrollen reduzierte Aktivierungen im primären visuellen und extrastriären Kortex.

Studien zu phonologischen Aspekten der gestörten Sprachverarbeitung

In einer der ersten PET-Studien zur LRS verglichen Gross-Glenn et al. (1991) 11 Probanden mit LRS mit 14 Kontrollprobanden. Die Probanden mussten hochfrequente visuell dargebotene Wörter laut Lesen. Probanden mit LRS zeigten eine Asymmetrie der Aktivierung sowohl im Bereich des präfrontalen (rechts > links) als auch des lingualen Gyrus (links > rechts). Die Ergebnisse demonstrieren laut Gross-Glenn und Mitarbeitern, dass Probanden mit LRS bei solchen Aufgaben andere Gehirnregionen aktivieren als normallesende Probanden.

Unterbrechung / Kompensation (temporo-parietal)

Laut Temple (2002) konnten in Studien zur phonologischen Verarbeitung bei Erwachsenen trotz experimenteller Unterschiede (PET oder fMRI, Ausmaß der Störung, Paradigma) übereinstimmend eine Reduktion oder das Fehlen von Aktivierungen im linken temporo-parietalen Kortex bei Erwachsenen mit LRS nachgewiesen werden (Überblick siehe Abb. 5).



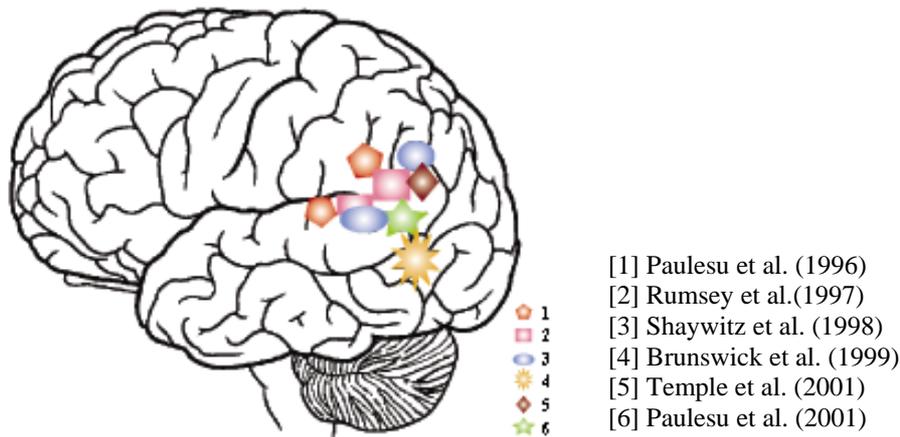


Abbildung 5: Neuronale Unterbrechung bei phonologischer Verarbeitung bei Probanden mit LRS. Modifizierte Abbildung aus Temple (2002).

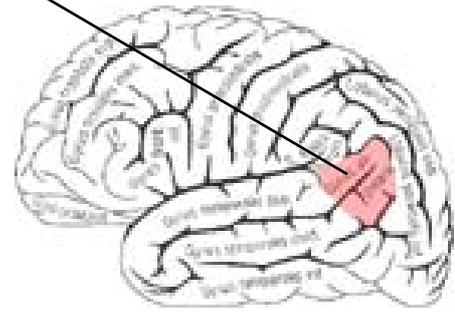
Im Rahmen einer PET-Untersuchung von Rumsey et al. (1992) sollten 14 Probanden mit LRS akustisch präsentierte Wörter reimen. Sie zeigten hierbei verminderte Aktivierungen in linken temporo-parietalen Regionen (angularer Gyrus). In einer weiteren Studie von Rumsey et al. (1994) wurden die Aspekte syntaktischer Sprachverarbeitung bei 15 Männern mit LRS und 18 Kontrollen verglichen. Probanden mit LRS zeigten bei syntaktischer Sprachverarbeitung eine verminderte Aktivierung in der Umgebung des angularen/supramarginalen Gyrus, wohingegen keine Unterschiede zwischen Kontrollprobanden und Probanden mit LRS in mittleren und anterioren temporalen sowie inferior frontalen Bereichen der linken Hemisphäre beobachtet wurden. Die Autoren schlussfolgern, dass es sich bei der LRS im Wesentlichen um eine fokale Störung handle, die temporo-parietale Bereiche einschlieÙe. Als Kernstörung werden Schwierigkeiten der phonologischen Dekodierung von Sprache vermutet. Diese anfänglichen Untersuchungen wurden auf lesebezogene Aufgaben erweitert, indem die phonologische Verarbeitung von visuell präsentem Material getestet wurde. So untersuchten Paulesu et al. (1996) fünf Probanden mit LRS und Kontrollen mittels einer Reim- und Gedächtnisaufgabe mit visuell dargebotenen Buchstaben. Kontrollprobanden aktivierten bei der einfachen Buchstaben-Reimaufgabe den linken IFG (BA44/6) und den posterior superior temporalen Gyrus (BA21/22), wohingegen Probanden mit LRS nur links frontal (BA44) und nicht links temporo-parietal aktivierten. Bei der Gedächtnisaufgabe zeigten Probanden mit LRS geringere Aktivierungen als Kontrollen im linken temporo-parietalen Kortex (supramarginaler Gyrus, BA40). Diese unabhängigen Aktivierungen der posterioren und anterioren Sprachareale unterstützten laut Paulesu et al. (1996) die Annahme, dass die Repräsentationen von assemblierter und adressierter Phonologie funktionell und anatomisch getrennt lokalisiert sind. Im Vergleich zu Kontrollprobanden waren bei Probanden mit LRS diese Gebiete jedoch bei keiner der

Aufgaben aktiviert. Die Autoren interpretierten dies als Problem einer funktionellen Unterbrechung (engl. „*disruption*“) zwischen anterioren und posterioren Sprachregionen. Diese Annahme wurde durch Befunde einer Minderaktivierung in der linken Insula, die normalerweise als „Brücke“ zwischen dem Broca-Areal, superior-temporalen und inferior-parietalen Kortex agiert, unterstützt.

Weitere Studien versuchten, diese Ergebnissen zu replizieren und zu erweitern. So untersuchten Rumsey et al. (1997) phonologische (im Vergleich zu orthografischer) Verarbeitung visuell präsentierter Stimuli. 17 Probanden mit LRS und 14 Kontrollen sollten niederfrequente Wörter und Nonwörter aussprechen und eine lexikalische Entscheidungsaufgabe lösen. Im Vergleich zu den Kontrollen zeigten Probanden mit LRS bei phonologischen Aufgaben reduzierte Aktivierungen in linken temporo-parietalen Regionen (superior temporaler Gyrus & inferior parietaler Kortex, BA39/40). Shaywitz et al. (1998, 2001) lieferten weitere fMRI-Befunde. So zeigten Probanden mit LRS verminderte Aktivierungen in temporo-parietalen Regionen (posteriorer STG & angularer Gyrus) beim Buchstaben- und Nonwortreimen. Interessanterweise „bewegten“ sich mit Zunahme der Aufgabenschwierigkeit bei den Kontrollprobanden die Aktivierungen von occipital nach temporo-parietal (Occipitallappen → Gyrus angularis → Wernicke-Areal). Bei Probanden mit LRS konnte nur eine gesteigerte Aktivierungen IFG (Broca) beobachtet werden, was von den Autoren als Befund einer reduzierten Aktivierung in temporo-parietalen Regionen bei Probanden mit LRS interpretiert wird. Zudem gehen Sie davon aus, dass Probanden mit LRS eine permanente Überaktivierung des Frontallappens zeigen, was als dauerhafte Überforderung interpretiert wird. Brunswick et al. (1999) konnten in einer PET-Untersuchung reduzierte links temporale und temporo-parietale Aktivierungen bei Probanden mit LRS während expliziter (laut Lesen) und impliziter (Merkmalsentdeckung) phonologischer Verarbeitung von Wörtern und Nonwörtern beobachten. Reduzierte Aktivierungen im linken posterior inferior temporalen Lappen (BA37, Wernicke, „Wernicke´s Wortschatz“) konnte ebenso bei diesen Probanden in beiden Aufgaben beobachtet werden. Den Befund, dass Probanden mit LRS beim Lesen eine stärkere Aktivierung im prämotorischen Areal von Broca (BA6/44) zeigten, interpretieren sie als Kompensationsstrategie (unter Einsatz von sublexikalischen Strategien).

Gyrus angularis

In einer PET-Studie zum lauten Lesen von Wörtern und Nonwörter von Horwitz et al. (1998) zeigten Kontrollprobanden beim Lesen eine funktionelle Verbindung (Korrelation) zwischen dem linken angularen Gyrus und extrastriären occipitalen sowie temporalen Regionen. Im Gegensatz hierzu konnten bei Probanden mit LRS keine Korrelationen in diesen Regionen gezeigt werden, was laut Horwitz et al. (1998) als Störung der funktionellen Konnektivität zwischen dem angularen Gyrus und anderen Regionen bei Probanden mit LRS interpretiert werden kann. Pugh et al. (2000b) stellten neben den dargestellten Ergebnissen von Horwitz et al. (1998) zudem fest, dass bei Aufgaben, die keine phonologische Verarbeitung benötigen, eine starke funktionelle Konnektivität für Probanden mit LRS und Kontrollen zu beobachten war. Dies spricht laut Pugh et al. (2000b) gegen eine globale Defizithypothese bei der LRS, da eine funktionelle Unterbrechung in linkshemisphärischen posterioren Systemen nur bei Anforderungen an orthografisch-phonologische Prozesse (phonologische Verarbeitung) festgestellt wurde. Rumsey et al. (1999) konnten bei Kontrollprobanden eine hohe positive Korrelation der Aktivität im Bereich des angularen Gyrus mit der Aufgabenschwierigkeit der Leseaufgabe zeigen. Bei Probanden mit LRS hingegen zeigte sich eine hoch negative Korrelation. Die Autoren schlussfolgerten, dass eine hohe Anstrengung angeblich keine entsprechende Leistungszunahme zur Folge hat, sondern diese eher sogar behindert. Vergleicht man die dargestellten Befunde mit der Forschungsliteratur erkennt man, dass Studien zu Alexie (erworbene Unfähigkeit des Lesens) neuroanatomische Läsionen im angularen Gyrus aufdeckten. So ist es laut Shaywitz et al. (2001) keine Überraschung, dass sowohl die erworbenen als auch die entwickelten Störungen des Lesens, Unterbrechungen (strukturell bzw. funktionell) innerhalb derselben neuroanatomischen Struktur, aufweisen. Hieraus resultiert die Unfähigkeit, visuelle dargebotene Buchstaben in eine phonologische Struktur umzuwandeln. Zusammenfassend schlussfolgern Shaywitz et al. (2001), dass für das Lesen Teile der posterioren Regionen (angularer und supramarginaler Gyrus) funktionell bedeutsam sind. Die beobachtete Unterbrechung (Trennung) des posterioren Lesesystems bei Probanden mit LRS führe zum Versuch, dies zu kompensieren, indem in ein ergänzendes System, z.B. anteriore Bereiche (IFG) und in rechts posteriore Regionen, verlagert wird. Die anterioren Strukturen (entscheidend bei der Artikulation) würden dem Probanden mit LRS helfen, eine Aufmerksamkeit für die Klangstruktur des Wortes zu entwickeln, indem er das Wort



innerlich nachspricht. Dieser Vorgang ermöglicht es dem Probanden mit LRS zu lesen. Dies geschieht jedoch deutlich langsamer und weniger effizient, als wenn das schnelle occipito-temporale Wortidentifikationssystem involviert wäre. Die posterioren Bereiche, z.B. die rechten occipito-temporalen Gebiete, könnten von Probanden mit LRS genutzt werden, um die visuelle Musterwiedererkennung zu unterstützen und um das beeinträchtigte Wortanalyse-System in linken posterioren Gebieten zu kompensieren. Die Verlagerung in unterstützende neuronale Systeme mag Probanden mit LRS das Lesen erleichtern, sie führt aber nie zu einem flüssigen und automatischen Wortlesen. Die Kompensation bleibt also in der Regel insuffizient. Grigorenko et al. (2001) sehen in den Aktivierungen in links frontalen Bereichen weniger eine Kompensationsstrategie, als vielmehr die Zuhilfenahme einer alternativen anatomischen Route für das Lesen (vgl. 2.5.2.1). Laut Temple (2002) deuten diese Studien an, dass eine „Minderaktivierung“ von links temporo-parietalen Antworten entscheidend für die Entwicklungsdyslexie ist. Dennoch ist es schwer zu beantworten, wie sich diese an Erwachsenen dargestellten Befunde über die Lebenszeit darstellen. Ob es sich dabei um einen grundsätzlichen oder kausalen Zusammenhang zwischen „Kompensation“ und/oder „funktioneller Unterbrechung“ handelt, müssen weitere Untersuchungen an Kindern und Jugendlichen zeigen (Temple, 2002).

Studien zur gestörten Wortverarbeitung bei Kindern

Unter der Annahme eines phonologischen Defizits verfolgten Temple et al. (2001) die Frage, ob eine in der Literatur beschriebene normale (Hyper-) Aktivität in links frontalen Regionen und eine fehlende (Hypo-) Aktivität in links temporo-parietalen Regionen bei erwachsenen Probanden mit LRS, Ausdruck einer funktionellen und/oder strukturellen Diskonnektivität dieser beiden Regionen sei. Untersucht wurden Kinder mit und ohne LRS, die eine Buchstabenreimaufgabe durchführen sollten. Im fMRI zeigten die Kontrollkinder beim Buchstabenreimen Aktivierungen im linken IFG (BA 44/6), im linken temporo-parietalen Kortex (BA39) und im superior-frontalen Gyrus, vergleichbar mit Befunden bei Erwachsenen. Kinder mit LRS zeigten, ebenso vergleichbar mit Befunden an erwachsenen Probanden mit LRS, Aktivierungen im linken IFG (BA44) und in der linken Insula, jedoch keine signifikante links temporo-parietale Aktivierung. Da Kinder mit LRS schlechter reimten und keine temporo-parietale Aktivierungen zeigten, folgerten Temple et al. (2001), dass es einen Zusammenhang dieser phonologischen Prozesse mit der Leseleistung gibt (sign. Korr. mit Leseleistung, temporo-parietale Regionen nur bei Reimaufgabe aktiviert). Entsprechend Befunden bei Erwachsenen schlussfolgerten die Autoren, dass

links temporo-parietale Funktionsdefizite für die Entwicklung einer Lesestörung fundamental seien. Georgiewa et al. (1999) untersuchten Kinder mit einer LRS im Vergleich zu normallesenden Kindern während der Durchführung von vier verschiedenen Aufgaben: (1) passives Betrachten von letter strings (Kontrollbedingung), (2) passives lesen von Nonwörtern, (3) passives Lesen von Wörtern und (4) einer phonologischen Transformationsaufgabe. Beim Gruppenvergleich zeigten sich signifikante Unterschiede in der Aktivierung um das Broca-Areal und in linken temporalen Regionen für Nonwortlesen und der phonologischen Transformationsaufgabe. Insgesamt belegen die Ergebnisse nach Temple (2002), dass die beobachteten Ergebnisse an Erwachsenen keinen Kompensationsprozess, sondern eine grundsätzliche Störung der LRS widerspiegeln.

Kulturunterschiede bei der Wortverarbeitung gesunder Leser vs. LRS

Die Problematik vieler Studien liegt darin, dass sie vorwiegend aus dem englischen Sprachraum stammen. Jedoch unterscheidet sich laut Paulesu et al. (2001) z.B. die Graphem-Phonem-Zuordnung im Italienischen vom Englischen und Französischen. Da Prävalenzschätzungen der LRS in verschiedenen Ländern von der spezifischen Orthografie der jeweiligen Länder abhängig zu sein scheinen, wurden - in Anlehnung an die Untersuchung von Paulesu et al. (2000) - Probanden mit LRS aus drei verschiedenen Ländern untersucht. Hierbei lösten italienische Probanden mit LRS Leseaufgaben besser als Englische und Französische. Jedoch waren, unabhängig von der Nationalität, die Probanden mit LRS bei Lese- und phonologischen Aufgaben immer deutlicher beeinträchtigt als normallesende Kontrollen. Diese Befunde unterstreichen nicht nur die Annahme, dass es sich bei der LRS um ein phonologisches Defizit handelt, sondern vielmehr, dass dieses Defizit unabhängig von der Orthografie ist. Die PET-Ergebnisse zum expliziten und impliziten Lesen unterstützen nach Meinung der Autoren die psychologischen Befunde. So zeigten alle Probanden mit LRS (unabhängig vom Herkunftsland) reduzierte Aktivierungen im linken medialen temporalen Gyrus, im linken inferioren und superioren temporalen Gyrus und im linken medial-occipitalen Gyrus. Es wurde zudem untersucht, ob es spezifische orthografische Effekte in der LRS-Gruppe gibt. In der Vorgängerstudie (Paulesu et al., 2000) konnte gezeigt werden, dass normallesende Italiener größere Aktivierungen im linken superior temporalen Gyrus hatten (was mit Verarbeitung von Phonemen verbunden wurde). Im Vergleich dazu (besonders für Nonwörter) hatten normallesende englische Probanden größere Aktivierungen im linken posterior inferior temporalen Gyrus (Gebiete, die mit Wortabfrage und Wortwiedererkennung assoziiert wurden). Diese Ergebnisse konnten auch für

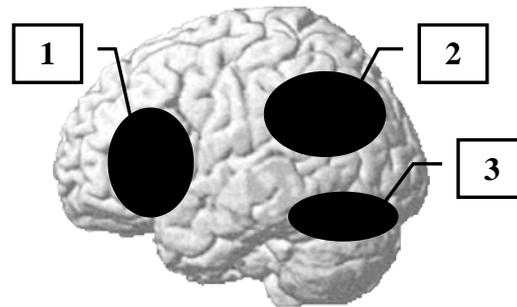
französische Leser bestätigt werden. Wenn jedoch die Probanden mit LRS in Abhängigkeit von der Muttersprache verglichen wurden, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass Probanden mit LRS ein weniger ausgebildetes Lesesystem besitzen, welches nicht in der Lage ist, sich an feine spezifische Anforderungen der eigenen Orthografie anzupassen. In allen drei Sprachgruppen erwiesen sich die reduzierten Aktivierungen der Probanden mit LRS (linker medialer, inferiorer & superiorer temporaler Kortex sowie medialer occipitaler Gyrus) als robustes Merkmal für Wortlesen.

Diese Ergebnisse stützen den Befund einer universellen neuroanatomischen Grundlage für die LRS (Paulesu et al., 2001, Temple, 2002). Die Autoren schlussfolgern, dass die LRS eine universale Basis im Gehirn hat und durch ein einheitliches neurokognitives Defizit erklärbar sei.

2.7 Ein neuronales Modell für das ungestörte und gestörte Lesen

Annahmen zu den involvierten neuronalen Netzwerken (Netzwerkannahmen)

Vergleicht man die Vielzahl an Studien zur ungestörten Sprachverarbeitung, so stellt man laut Pugh et al. (2000a) und Grigorenko et al. (2001) folgende tendenzielle Gemeinsamkeiten fest: Visuell präsentierte Wörter und Nonwörter scheinen vorwiegend zu Aktivierungen in drei Netzwerken („Lesesystemen“) der linken Hemisphäre zu führen. Diese setzen sich aus einem dorsalen (temporo-parietalen), ventralen (occipito-temporalen) und anterioren Netzwerk zusammen. Detailliert beschrieben umschließt das ventrale Netzwerk laterale extrastriäre und links inferiore occipito-temporale Regionen, das dorsale Netzwerk den angularen, supramarginalen, superioren temporalen Gyrus (Wernicke) sowie den inferiore Temporallappen und das anteriore Netzwerk das Broca-Areal im IFG (siehe Abbildung 6).



| <u>Zu 1: Anteriore Region</u> | <u>Zu 2: Temporo-Parietale (Dorsale) Region</u> | <u>Zu 3: Occipito-Temporale (Ventrale) Region</u> |
|--|--|--|
| <p>Befunde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nonwortlesen > Wortlesen - Sensitiv für Zusammensetzung vom orthografischen zum phonologischen Abbild <p>LRS vs. KG:</p> <ul style="list-style-type: none"> - LRS>KG bei Wort- & Nonwortlesen <p>Hypothetisierte Funktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Feine Artikulationsumschlüsselung (z.B. Output-Phonologie) | <p>Befunde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nonwortlesen > Wortlesen - Erhöhte Aktivierung b. phonologischen Analysen - Relativ späte Antwort - Verringerte Aktivierung bei schneller Präsentationsrate <p>LRS vs. KG:</p> <ul style="list-style-type: none"> - KG>LRS bei Wort- & Nonwortlesen <p>Hypothetisierte Funktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analyse von orthografischen, phonologischen & lexikalisch-semantischen Dimensionen | <p>Befunde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wortlesen > Nonwortlesen - Konsistente Aktivierung über alle Aufgaben - Frühe Antwort (150-180 msec) - Erhöhte Aktivierung b. schneller Präsentationsrate - Aktivierung nimmt mit Alter zu & kann Lesefähigkeit vorhersagen <p>LRS vs. KG:</p> <ul style="list-style-type: none"> - KG>LRS bei Wort- & Nonwortlesen <p>Hypothetisierte Funktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Linguistisch strukturiertes Gedächtnis-basiertes Wortidentifikationssystem (Wortformarea) |

Abbildung 6: Modifizierter Überblick aus Pugh et al. (2000a).

Netzwerkannahmen bei Probanden mit LRS und normallesenden Probanden

fMRI-Studien zur Untersuchung phonologischer Sprachverarbeitungsprozesse bei Probanden mit und ohne LRS weisen übereinstimmend auf folgende Befunde hin: (1) Im Vergleich zu normallesenden Probanden weisen Probanden mit LRS zu einer geringeren Aktivierung in linken dorsalen (temporo-parietalen) und linken ventralen (occipito-temporalen) Regionen auf, zum anderen aber sind (2) ausgeprägtere Aktivierungen in rechts posterioren und inferior frontalen Regionen (IFG) zu verzeichnen (Grigorenko, 2001; Temple, 2002, Pugh et al., 2000a).

Netzwerkannahmen bei normallesenden Probanden

Befunde zur ungestörten Sprachverarbeitung zeigen, dass das ventrale Netzwerk mit Aktivierungen bei Wortleseaufgaben assoziiert ist. Somit scheint das ventrale Netzwerk als „Signaldifferenzierer“ bei der Verarbeitung von Wörtern, Nonwörtern und nichtsprachlichem visuellen Material zu dienen. Das ventrale Netzwerk bildet die Grundlage für die Verarbeitung linguistischer Strukturen und des Gedächtnis basierten Erinnerungssystems. Einige Forscher betrachten das dorsale Netzwerk als wesentlichen Bestandteil bei der Verbindung von der visuellen Repräsentationen des Geschriebenen zu phonologischen Strukturen. D.h., diese Regionen sind an der Verarbeitung von orthografischen, phonologischen,

morphologischen und lexikalisch-semantischen Aspekten von Wörtern beteiligt. Laut Pugh et al. (2000a) spiegelt die Aktivierung der dorsalen Regionen bei Nonwörtern und niedrigfrequenten Wörtern die Analyse von Graphem-Phonem-Zuordnungen und die Integration von phonologischen und lexikalisch-semantischen Merkmalen wieder. Die Komponenten des anterioren Lesesystems werden mit phonemischen Artikulationsprozessen, stillem Lesen und Benennungsaufgaben assoziiert (Pugh et al., 1996, 1997; Shaywitz et al., 1998). Wesentlich ist jedoch, dass die Aktivität (Organisation) der verschiedenen Netzwerke aufeinander abgestimmt ist (Pugh et al., 2000a). Insofern ist das ventrale auf das dorsale Netzwerk abgestimmt, indem das dorsale Netzwerk für die Analyse der Information und das ventrale Netzwerk für die Erinnerung zuständig ist. Die Funktion des anterioren Lesesystems läuft parallel zum dorsalen Netzwerk.

Netzwerkannahmen bei Probanden mit LRS

Insgesamt scheint es sich bei Probanden mit LRS so darzustellen, dass beide ventrale und dorsale Netzwerke des posterioren Lesesystems gestört sind (Gross-Glenn et al., 1991; Salmelin et al., 1996; Rumsey et al., 1992, 1997; Shaywitz et al., 1998; Pugh et al., 2000b). Des weiteren konnten Komponenten des dorsalen Netzwerks als Schlüsselgebiete für Lese- und Schreibstörungen identifiziert werden. Außerdem scheint das anteriore Lesesystem stärker von Probanden mit LRS als von normallesenden Probanden genutzt zu werden. Da laut Pugh et al. (2000a) gezeigt werden konnte, dass normallesende Probanden das dorsale Netzwerk bei Nonwörtern und niedrigfrequenten Wörtern und zudem ventrale Gebiete während der Bearbeitung von hochfrequenten Wörtern aktivieren, wird diese fehlende Aktivierung und die Überaktivierung der Probanden mit LRS in anterioren Regionen als Spiegelung einer „Kompensation“ interpretiert. D.h. erwachsene Probanden mit LRS kompensieren die fehlenden Aktivierungen in dorsalen und ventralen Regionen durch eine Überaktivierung der anterioren Areale (Salmelin et al., 1996; Rumsey et al., 1997; Shaywitz et al., 1998; Brunswick et al., 1999).

3 Fragestellung

Trotz angesichts der in den Abschnitten 2.5.3, 2.6.3 und 2.7 dargestellten Befundlage zur ungestörten und gestörten Sprachverarbeitung bleibt es weiterhin unklar, welche Bedeutung den verschiedenen Ebenen der phonologischen Verarbeitung für den Erwerb und die Verarbeitung von Sprache, und folgerichtig auch der LRS, zukommt. Obwohl in den letzten Jahren hirnfunktionelle Untersuchungen zur LRS zugenommen haben, betreffen diese doch fast ausschließlich erwachsene Probanden. Zudem liegen kaum Veröffentlichungen aus dem deutschen Sprachraum vor. Aufgrund der verschiedenen Graphem-Phonem-Zuordnungen des angloamerikanischen und des deutschen Sprachraums stellt sich jedoch die Frage, inwieweit die angloamerikanischen Forschungsergebnisse auf den deutschen Sprachraum übertragen werden können (Krehnke, 2001). Insbesondere nach Untersuchungen von Paulesu et al. (2000, 2001) stellt sich die Frage, inwiefern die Modellvorstellungen zur Sprachverarbeitung und –entwicklung (Coltheart, 1978, 1981; Frith, 1985; Seidenberg, 1985; McClelland & Rumelhart, 1986) übertragbar sind.

Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit ist die Frage, wie und auf welcher Ebene sich Probanden mit LRS von normallesenden Probanden unterscheiden und inwiefern die Hypothese eines phonologischen Defizits neuropsychologisch und mittels fMRI nachweisbar ist. Das Innovative dieser Arbeit liegt darin, dass erstmalig Kinder, Jugendliche und Erwachsene mit und ohne LRS mit derselben Methode und demselben Paradigma untersucht werden. Trotz der zusammenführenden Befunde und Modellannahmen von Pugh et al. (2000a, vgl. 2.7) liegt der originelle Ansatz dieser vorliegenden Studie darin, dass ein breites Altersspektrum untersucht werden kann. Dadurch, dass damit die grundlegenden Defizite der LRS an Probanden in unterschiedlichen Altersgruppen in unterschiedlichen Stadien des Schriftspracherwerbs bzw. dem Umgang mit Schriftsprache untersucht werden, soll wesentliches zum besseren Verständnis der Ursachen und des Entwicklungsverlaufes der LRS beigetragen werden.

Aus dem derzeitigen Stand der Forschung (vgl. Pugh et al., 1996) und eigenen Vorarbeiten (vgl. Georgiewa et al., 1999) wurde ein Paradigma entwickelt, das die Differenzierung zwischen verschiedenen Stufen der Wortverarbeitung ermöglichte (vgl. 4.1.3). Dieses Paradigma bestand aus fünf Versuchsbedingungen (Slashpaarabgleich, Buchstabenabgleich, Wortlesen, Nonwortlesen, Nonwortreimen). Die Fragestellungen der vorliegenden Arbeit sind in folgende Fragekomplexe untergliedert:

Fragekomplex 1: Unterschiedliche Sprachverarbeitungsprozesse

- Lassen sich auf der Ebene von Sprachverarbeitungsprozessen neuropsychologisch und mittels fMRI unterschiedliche Formen der Muster- und Wortverarbeitung von einander abgrenzen?

In einem ersten Schritt soll bei Kontrollprobanden und Probanden mit LRS überprüft werden, wie sich unterschiedliche Stufen der Sprachverarbeitung [Buchstabenabgleich (BSL) → Wortlesen (WL) → Nonwortlesen (NWL) → Nonwortreimen (NWR)] neuropsychologisch und hirnfunktionell ausprägen. Im Rahmen der während der fMRI-Untersuchung erhobenen neuropsychologischen Daten (ERTS-Daten) soll überprüft werden, ob Kontrollprobanden und Probanden mit LRS die Aufgaben mit erhöhter phonologischer Anforderung (NWL, NWR) langsamer und mit mehr Fehlern lösen als Aufgaben mit einer geringeren phonologischen Anforderung (WL). So sollen im Rahmen der fMRI-Aktivierungen laut Literatur (vgl. 2.5.3) Aufgaben mit erhöhter phonologischer Anforderung (NWL, NWR) zu ausgeprägteren Aktivierungen im linken inferioren frontalen Kortex (BA44/45/6) und/oder posterior-temporalen Kortex im Vergleich zu allen anderen Bedingungen führen, wobei die Aktivierung beim Nonwortreimen (höchste phonologische Anforderung) am ausgeprägtesten sein soll. Das Wortlesen soll zu Aktivierungen im linken medialen und superioren temporalen Gyrus führen.

Fragekomplex 2: Überprüfung der phonologischen Defizithypothese

- Sind Unterschiede zwischen Kontrollprobanden und Probanden mit LRS auf der Ebene neuropsychologischer und neurophysiologischer Daten zu beobachten?

Basierend auf der Grundannahme eines phonologischen Defizits bei Probanden mit LRS ist zu klären, welcher Bereich der phonologischen Verarbeitung (BS, WL, NL, NWR) bei Probanden mit LRS im Vergleich zu normallesenden Probanden beeinträchtigt ist. So sollen Probanden mit LRS bis auf die Ruhebedingung (Musterabgleich) alle Aufgaben langsamer und/oder mit mehr Fehlern als die Kontrollprobanden bewältigen. Zudem wird erwartet, dass mit steigender phonologischer Anforderung (WL→NWL→NWR) die Leistungsunterschiede (Reaktionszeit, Fehler) zwischen Probanden mit LRS und Kontrollprobanden immer größer werden. Bezüglich der fMRI-Daten wird davon ausgegangen, dass in allen Bedingungen Aktivierungsunterschiede zwischen Probanden mit LRS und Kontrollprobanden zu verzeichnen sind. Zudem sollen mit steigender phonologischer Anforderung

die Aktivierungsunterschiede zwischen Probanden mit LRS und Kontrollprobanden zu nehmen.

Fragekomplex 3: Verschiedene Lesestrategien (adressiert vs. assembliert)

- Können unterschiedliche Lesestrategien (adressiert vs. assembliert) nachgewiesen werden (ERTS-Daten, Wortlisten, fMRI) und unterscheiden sich diesbezüglich Kontrollprobanden von Probanden mit LRS?

Dieser Fragekomplex bezieht sich auf die Differenzierbarkeit zweier unterschiedlicher Lesestrategien (assemblierte vs. adressierte Verarbeitung, vgl. 2.5.2.1) mittels neuropsychologischer Daten und fMRI. Zudem geht es um die Frage der Übertragbarkeit der im englischen Sprachraum diskutierten Lesestrategien auf den deutschen Sprachraum. Der hypothetisierte Ansatz hierbei beruht auf der Annahme, dass beim Lesen verschiedener Stimuli die adressierte und assemblierte Verarbeitung unterschiedlich stark beteiligt ist. So sollen Probanden mit LRS das Lesen und Reimen von Nonwörtern langsamer und/oder mit mehr Fehlern als das Lesen von Wörtern bewältigen (Störung der assemblierten Phonologie). Dies gilt auch für normallesende Probanden, wobei dieser Unterschied geringer sein soll als bei Probanden mit LRS. Sollte eine derartige Differenzierung möglich sein, sollte es anhand der fMRI-Daten möglich sein, unterschiedliche Sprachverarbeitungsnetzwerke für assemblierte und adressierte Verarbeitung und Unterschiede zwischen Kontrollprobanden und Probanden mit LRS aufzudecken. So sollen Aufgaben mit vorrangig assemblierter Verarbeitung (Nonwortlesen, Nonwortreimen) vor allem zu Aktivierungen links inferior-frontaler und/oder posterior-temporalen Kortexareale führen. Aufgaben mit vorrangig adressierter Verarbeitung (Wortlesen) hingegen sollen zu Aktivierungen occipito-temporalen Kortexareale und/oder der Wernicke-Region führen.

Fragekomplex 4: Leseentwicklung

- Stellt sich das phonologische Defizit über die unterschiedlichen Altersgruppen hinweg (neuropsychologisch) qualitativ anders dar und sind diese Unterschiede auch mittels fMRI abbildbar?

Es soll der Frage nachgegangen werden, ob bei Probanden mit und ohne LRS altersgruppenabhängige Veränderungen von Lesefertigkeiten anhand neuropsychologischer Daten und hirnhysiologischer Aktivierungen (fMRI) zu beobachten sind und ob hierbei unterschiedliche „Entwicklungsverläufe“ zwischen Probanden mit LRS und Kontrollprobanden zu beobachten sind. Auf der Ebene des fMRI soll untersucht werden, ob eine allgemeine Zunahme bzw. Abnahme der Aktivierungsintensitäten und/oder eine altersspezifische Modulation von Netzwerkaktivierungen vom Kindes- zum Jugend- und Erwachsenenalter nachweisbar sind. Da es auf neuropsychologischer Ebene Befunde für Probanden mit LRS gibt, dass diese annähernd vergleichbare Leseleistungen wie erwachsene Kontrollprobanden erbringen können, ist zum einen zu vermuten, dass Probanden mit LRS im Zuge ihrer Leseentwicklung über irgendeine Form von Kompensationsmechanismus verfügen müssen, um ihre vormals defizitäre Leistung auszugleichen. Da zudem anhand von fMRI-Befunden (vgl. 2.6.3 & 2.7) bei Probanden mit LRS frontale Überaktivierungen im Vergleich zu Kontrollprobanden festzustellen sind, könnten diese Befunde dahingehend interpretiert werden, dass zwischen beiden Befunden ein funktioneller Zusammenhang dahingehend besteht, dass der auf Verhaltensebene beobachtete Kompensationseffekt sein hirnhysiologisches Korrelat in diesen frontalen Überaktivierungen haben könnte. Da Studien bis dato meist keine Kinder- und Jugendlichen untersucht haben, liegen derzeit noch keine empirischen Erkenntnisse darüber vor, ob diese Kompensationshypothese gerechtfertigt ist. Vor diesem Hintergrund soll (mit explizit explorativem Charakter!!) untersucht werden, wie sich derartige LRS-spezifische Aktivierungsmuster über den Vergleich von verschiedenen Altersgruppen darstellen.

4 Methode

Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über Materialien, Stichprobe, Untersuchung und Auswertung gegeben werden.

4.1 Verwendete Materialien

4.1.1 Diagnostik

Da die LRS über ein Diskrepanzkriterium zwischen allgemeiner intellektueller Fertigkeit, Rechtschreibleistung und Leseleistung definiert wird (vgl. 2.2), wurden zur Überprüfung der Ein- und Ausschlusskriterien folgende Verfahren eingesetzt:

Tabelle 1 Neuropsychologische Testbatterie.

| Zu testendes Merkmal | Testverfahren | <Referenzen> | Alters- / Klassenstufe |
|--|--|---|------------------------|
| 1. Formallogisch-abstraktes Denkvermögen (Sprachfreie Erfassung des allgemeinen Intelligenzpotentials) | 1.a Standard Progressive Matrices | Raven (1998); Heller, Kratzmeier & Lengfelder (1998) | 6 - 80 Jahre |
| | 1.b Advanced Progressive Matrices | | |
| 2. Rechtschreibfertigkeit | 2.a Weingartener Grundwortschatz Rechtschreibtest (WRT 2+, 3+) | Birkel (1994a; 1994b) | 2. - 4. Klasse |
| | 2.b Westermann-Rechtschreibtest (WRT 4/5; 6+) | Rathenow (1980a); Rathenow, Vöge & Laupenmühlen (1980b) | 4. - 8. Klasse |
| | 2.c Rechtschreibungstest (RT) | Jäger (1974) | 13 Jahre - Erw. |
| 3. Lesefertigkeit | 3. Zürcher Lesetest (ZLT) | Linder & Grisseman (1998) | 2. - 6. Klasse |
| 4. Aufmerksamkeit | 4. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test (d2) | Brickenkamp (1994) | 9 - 60 Jahre |

In allen Testverfahren wurden die Rohwerte in Alters- bzw. Klassennormen und diese wiederum in IQ-Werte umgerechnet. Um sowohl Leistungsüber- als auch Unterschätzungen in Extremfällen zu verhindern wurde beim d2-Test der *Konzentrationsleistungswert (KL)* berechnet. Um Deckeneffekte beim „Standard Progressive Matrices Test“ zu vermeiden wurde für Studenten der „Advanced Progressive Matrices Test“ verwendet. Die Leseleistung im ZLT wurde mittels Messung der Leseflüssigkeit (Zeit) und Lesegenauigkeit (Fehler) untersucht. Problematisch ist jedoch, dass sich die Prozentrangnormen nur auf die Klassenstufen 2 bis 6 beziehen. Da aber im deutschsprachigen Raum keine entsprechenden Testverfahren zur Erfassung der Lesefertigkeiten von Jugendlichen und Erwachsenen existieren, wurde der ZLT unabhängig vom Alter für alle Probanden angewendet.

4.1.2 Leseexperiment

Das Fehlen eines geeigneten Lesetests für Jugendliche und Erwachsene und die Problematik der mangelnden Normierung im ZLT führte dazu, dass allen Probanden zusätzlich Listen zum lauten Lesen vorgegeben wurden. Im Vordergrund stand hierbei, die phonologischen Fähigkeiten differenzierter zu überprüfen. Es wurden je nach Alter verschiedene Listen mit dreisilbigen Wörtern (z.B. Weihnachten, Geschichte) und Nonwörtern (z.B. Klukedal, Abhungir) zum lauten Vorlesen vorgegeben. Zusätzlich wurden weitere Listen vorgegeben, bei denen die Probanden die Aufgabe hatten, vorgegebene Wörtern „umzubauen“. Erfasst wurden jeweils Fehler und Lesezeiten. Die Listen und Aufgaben der spezifischen Altersstufen sind im Anhang A dargestellt.

4.1.3 fMRI-Experiment

Um das in Abschnitt 2.6.1 dargestellte Defizit der phonologischen Bewusstheit bei der LRS zu untersuchen musste für die fMRI-Untersuchung ein geeignetes Stimulusmaterial implementiert werden. Hierzu wurde in Anlehnung an die Arbeitsgruppe um Shaywitz ein Stufenmodell mit steigender phonologischer Anforderung erstellt, mit dem Ziel, verschiedene Sprachverarbeitungsmechanismen bei normallesenden Probanden und Probanden mit LRS gezielt anzusprechen. Um dies zu realisieren wurden fünf verschiedene Aufgaben zusammengestellt, die rein visuelle, orthografische und phonologische Kodierungen ansprechen sollten.

(A) Da für die fMRI-Untersuchung eine Kontrollbedingung (Baseline für die elementare visuelle Verarbeitung) notwendig ist, wurde nach einer Aufgabe gesucht, die sowohl für Kontrollprobanden als auch Probanden mit LRS gleich schwer zu lösen ist. Diese Aufgabe sollte zudem keine orthografischen oder phonologischen oder semantischen Anforderungen an die Probanden stellen. In diesem Sinne wurde ein einfacher Musterabgleich als sinnvoll betrachtet. Für den Musterabgleich (Slashes, *SL*) wurden zunächst Folgen von Schrägstrichen gebildet, deren Merkmale jenen der Wörter ähnelten: i) Länge vier bis zehn Zeichen, ii) beide Muster eines Paares konnten unterschiedliche Länge besitzen, iii) die Neigung der Striche innerhalb eines Musters variierte. Erste Voruntersuchungen (vgl. Tabelle 2) zeigten jedoch, dass die Anforderungen hierbei offenbar über eine elementare visuelle Verarbeitung hinausgingen. Daher wurde die Aufgabe vereinfacht und das Stimulusmaterial modifiziert: i) Beschränkung auf 4 bis 6 Zeichen, ii) identische Länge für beide

Muster jedes Paares, iii) gleiche Neigung der Schrägstriche innerhalb eines Musters (vgl. Anhang B).

(B) Um eine visuelle und orthografische Verarbeitung anzuregen, wurden Musterpaare aus Konsonanten gebildet (Buchstabenabgleich, *BS*). Diese sollten sich nur geringfügig, entweder in einem Buchstaben oder in der Positionen eines Buchstabens innerhalb eines Musters, unterscheiden. Der Proband sollte ausschließlich Buchstaben als vertraute Einheiten wahrnehmen (vgl. Anhang B). Um keine phonologischen Anforderungen an den Probanden zu stellen, wurden nur Konsonanten verwendet.

(C) Die Aufgabe des Wortlesens sollte die (adressierte) phonologische Verarbeitung anregen (Ganzwortlesen, vgl. 2.5.2.1). Für das Wortlesen (*WL*) wurde vom Grundwortschatz der 3. Klasse ausgegangen, wobei nur ein- bis dreisilbige Wörter Berücksichtigung fanden. Bei der Zusammenstellung der Wortpaare wurde außerdem darauf geachtet, dass sich die Wortpaare formal ähnelten (vgl. Anhang B). Ergebnisse aus eigenen Vorstudien (vgl. Georgiewa et al., 1999) wiesen darauf hin, dass assemblierte und adressierte phonologische Verarbeitungsstrategien mit dem dort verwendeten Paradigma hirnfunktionell nicht eindeutig trennbar waren. Als eine Ursache wurde eine zu hohe Schwierigkeit des verwendeten Stimulationsmaterials für das Wortlesen vermutet. Deshalb wurden im hier vorgestellten Paradigma ausschließlich hochfrequente Wörter (Ortmann, 1976) aus dem Wortschatz von Grundschulern (3. Klasse, mündlich; Pregel, 1987) als Stimuli eingesetzt.

(D) Als gesteigerte (assemblierte) phonologische Anforderung wurde das Nonwortlesen verwendet. Das Stimulusmaterial für das Nonwortlesen (*NWL*) wurde nach den folgenden Kriterien erarbeitet: i) Länge: eine bis drei Silben und formale Ähnlichkeit der Nonwortpaare bezüglich Länge und Buchstabenzusammensetzung (analog zu C), ii) Vermeidung von Assoziationen mit Wörtern der deutschen Sprache; auf dieses Kriterium wurde sorgfältig geachtet, um eine Aktivierung adressierter phonologischer Verarbeitung (wie bei C) zu vermeiden (vgl. Anhang B).

(E) Analog der bei D genannten Kriterien wurde das Stimulusmaterial zum Nonwortreimen (*NWR*) erarbeitet, mit dem Unterschied, dass identische bzw. differente Endreime gebildet wurden (vgl. Anhang B). Diese Aufgabe sollte die schwierigste Anforderung an die Probanden darstellen.

In einem Vorexperiment sollte abgeklärt werden, ob die erwartete schlechteste Gruppe (Kinder mit LRS) überfordert und die erwartete beste Gruppe (Kontrollerwachsene) unterfordert sein würde. Dazu wurde das Stimulationsmaterial zunächst an 32 Probanden aus diesen zwei Altersgruppen erprobt. Im Rahmen dieses Vorexperiments mussten die Probanden Stimuluspaare miteinander vergleichen bzw. reimen. Ziel war es, Fehlerraten und Reaktionszeiten zu bestimmen, um auf dieser Grundlage ein für alle drei Altersstufen praktikables Stimulationsregime für die fMRI-Untersuchung zu finden. Die Ergebnisse des Vorexperiments sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Reaktionszeiten und Fehler für die Aufgaben.

| | | SL | BS | WL | NWL | NWR |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Zeit (s) | LK | 2.161 | 2.547 | 1.969 | 2.403 | 3.131 |
| | KE | 1.417 | 1.708 | 1.059 | 1.439 | 1.437 |
| Fehler (∅) | LK | 2.133 | 4 | 1.867 | 2 | 4.267 |
| | KE | 1 | 3.765 | 0.529 | 0.75 | 1.235 |

Anmerkung: (SL) Slashpaarabgleich; (BS) Buchstabenabgleich; (WL) Wortlesen; (NWL) Nonwortlesen; & (NWR) Nonwortreimen. LK: Kinder mit LRS; KE: Kontrollerwachsene.

Aufgrund dieser Resultate wurde festgelegt, dass jedes Stimuluspaar so lange präsentiert wurde, bis der Proband seinen Entscheidungsprozess in der Regel abgeschlossen hatte (der entsprechende Tastendruck löst die Präsentation des nächsten Stimuluspaares aus; nach einem als Obergrenze festgelegten Zeitfenster von 5 Sekunden erfolgte die Präsentation des nächsten Stimuluspaares automatisch). Aufgrund der Darbietung der einzelnen Stimuli in Form einer Entscheidungsaufgabe wurde die Erfassung von Leistungsdaten wie Reaktionszeit und Fehlerrate ermöglicht. Für jede der Bedingungen B - E wurden 180 Aufgabenpaare erarbeitet, jeweils zur Hälfte identisch bzw. different. Innerhalb der einzelnen Bedingungen (A – E) erfolgte die Präsentation der Aufgabenpaare bezüglich des Kriteriums identisch bzw. different in randomisierter Abfolge, interindividuell jedoch konstant. Die visuelle Stimulation und die Auswertung der Reaktionen der Probanden auf die Stimuli wurden mit dem Experimental Run Time System (ERTS®) realisiert. Im folgenden wird das Stufenmodell mit steigender phonologischer Anforderung dargestellt:

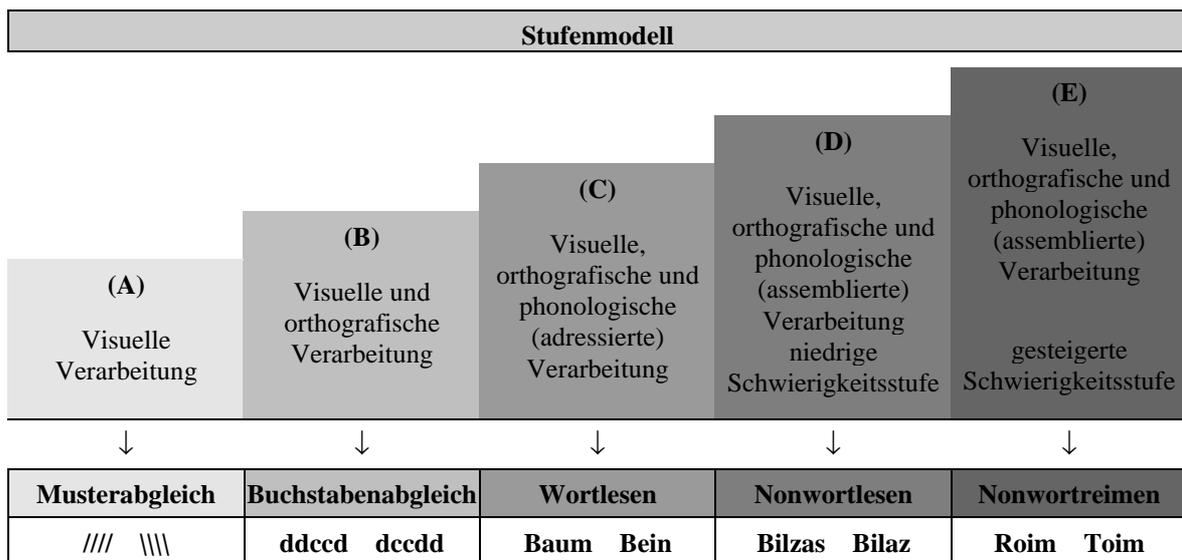


Abbildung 7: Stufenmodell mit steigender phonologischer Anforderung.

4.2 Stichprobe

Zur Untersuchung des phonologischen Defizits sollten Probanden mit einer LRS im Vergleich zu normallesenden Probanden herangezogen werden. Für die Stichprobe wurden somit aus drei Altersstufen Kinder (2.-5. Klasse), Jugendliche (6.-9. Klasse) und Erwachsene untersucht. Die drei aus Probanden mit LRS bestehenden Gruppen wurden mit Kontrollgruppen altersgerecht Lesender, nach Alter und nonverbalem IQ, parallelisiert. Zur Rekrutierung der Stichprobe (n=134) wurde eine umfassende Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt (Medien; Informationsblätter; Vorträge; Kontakte zu Selbsthilfegruppen, therapeutischen Institutionen, Schulämtern, Jugendämter usw.). Außerdem bot die Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie des Universitätsklinikums Jena ein kostenloses Förderprogramm für alle Probanden mit LRS an. Diese Maßnahmen förderten die Rekrutierungsmöglichkeiten und die Motivation für eine Teilnahme an der Studie. Der Untersuchungsansatz wurde der Ethikkommission der Friedrich-Schiller-Universität Jena vorgelegt und genehmigt.

Das in dieser Studie festgelegte Kriterium einer LRS legte als Definition eine eindeutig unterdurchschnittliche Leseleistung bei durchschnittlicher bis überdurchschnittlicher allgemeiner kognitiver Leistungsfähigkeit voraus. Das Selektionskriterium für die Aufnahme von Probanden mit einer LRS in die jeweilige Untersuchungsgruppe wurde folgendermaßen festgelegt:

Einschlusskriterien für Probanden mit LRS

- a) Eine mindestens durchschnittliche nonverbale Intelligenz ($IQ \geq 85$)
- b) Eine Rechtschreibleistung unter einem Prozentrang von 15 ($IQ \leq 85$)
- c) Mindestens 1,5 Standardabweichungen Diskrepanz (ca. 22,5 IQ-Punkte) zwischen aktueller Rechtschreibleistung und dem nonverbalen IQ. Für Erwachsene wurde das Diskrepanzkriterium auf 2 Standardabweichungen erhöht
- d) Zusätzliches Kriterium (vor allem für Kinder und Jugendliche): Mindestens eine Standardabweichung Diskrepanz zwischen der aktuellen Leseleistung und dem nonverbalen IQ
- e) Anamnestisch gesicherte Lese- bzw. Rechtschreibschwierigkeiten (positive Anamnese)

Einschlusskriterien für Probanden ohne LRS

- a) Eine mindestens durchschnittliche nonverbale Intelligenz ($IQ \geq 85$)
- b) Maximal eine Standardabweichung Diskrepanz zwischen aktueller Rechtschreibleistung und dem nonverbalen IQ
- c) Maximal eine Standardabweichung Diskrepanz zwischen der aktuellen Leseleistung und dem nonverbalen IQ

Ausschlusskriterien

Ausgeschlossen wurden Probanden mit einer unkorrigierbaren Beeinträchtigung des Sehens und Hörens, Linkshändigkeit, eine bilinguale Erziehung und alle schweren neurologischen und psychiatrischen Störungen (insbesondere Hyperkinetisches Syndrom, Dissoziale Störung mit Hypermotorik, Depressionen).

Die Ein- bzw. Ausschlusskriterien wurden mit der im Abschnitt 4.1.1 dargestellten Testbatterie überprüft. Die Mittelwerte der Tests sind in Tabelle 3 zusammengefasst:

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Testverfahren für alle Probanden.

| | LK (22) | | KK (21) | | LJ (18) | | KJ (24) | | LE (22) | | KE (27) | |
|-------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | ♀=7; ♂=15 | ♀=9 ♂=12 | ♀=3 ♂=15 | ♀=12 ♂=12 | ♀=8 ♂=14 | ♀=12 ♂=15 | M | SD | M | SD | M | SD |
| Alter | 10,4 | 0,9 | 10,6 | 0,9 | 13,8 | 1,6 | 13,5 | 1,4 | 27,0 | 9,4 | 25,3 | 5,2 |
| NV-IQ | 108,8 | 15,1 | 110,3 | 16,1 | 100,5 | 14,2 | 103,0 | 12,0 | 100,2 | 11,9 | 106,6 | 15,9 |
| RT-IQ | 70,7 | 9,2 | 105,7 | 11,8 | 67,2 | 13,9 | 99,7 | 12,0 | 63,8 | 11,0 | 104,1 | 13,9 |
| ZLT-F (IQ) | 77,4 | 10,8 | 100,0 | 7,0 | 82,2 | 14,5 | 103,1 | 6,0 | 97,9 | 10,4 | 109,8 | 3,8 |
| ZLT-Z (IQ) | 71,3 | 8,7 | 103,8 | 9,4 | 83,3 | 15,3 | 108,5 | 7,0 | 101,1 | 10,0 | 111,5 | 2,8 |
| KL | 57,3 | 28,4 | 77,9 | 16,5 | 44,6 | 25,3 | 81,8 | 18,0 | 61,1 | 26,6 | 77,9 | 20,3 |

Anmerkung: (M) Mittelwert, (SD) Standardabweichung.

4.3 Messverfahren

4.3.1 Magnetresonanztomographie (MRT)

Grundlage der MRT-Methode ist die Magnetisierbarkeit des Untersuchungsgegenstandes (in diesem Fall des menschlichen Körpers). Dafür müssen die Atomkerne des zu untersuchenden Gewebes ein magnetisches Moment besitzen. Atomkerne mit ungerader Nukleonenzahl erfüllen diese Kriterium, wobei der Wasserstoffatomkern (^1H) das größte magnetische Moment besitzt. Der Vorteil liegt hierbei in der großen natürlichen Häufigkeit des Wasserstoffatomkerns im Menschen (Reiser & Semmler, 1997, Kap. 2).

Der MR-Tomographie liegt somit ein einfaches physikalisches Resonanzphänomen zugrunde. Im feldfreien Raum (außerhalb des Magnetfeldes) sind die magnetischen Momente einer Probe (Körper) ungeordnet. Bringt man jedoch diese Probe in ein äußeres homogenes Magnetfeld, so nehmen die magnetischen Momente der Atomkerne einen geordneten Zustand an und richten sich „parallel“ oder „antiparallel“ zum äußeren Magnetfeld aus. Dieser Gleichgewichtszustand kann durch ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld, das senkrecht zum äußeren Magnetfeld eingestrahlt wird, gestört werden. Diese Frequenz nennt man Resonanzfrequenz oder auch Larmorfrequenz. Nach Wegfallen dieses Impulses können die Protonen in ihre ursprüngliche Position zurückkehren. Diese Rückkehr wird als Relaxation bezeichnet. Die Zeit, die die Protonen benötigen, um in ihre Ruhestellung zurückzukehren ist abhängig von dem Dichtegrad der Wassermoleküle in den verschiedenen Gewebearten. So können Protonen in einem flüssigen Milieu ihre Rotationsachse leichter ändern als Protonen in einer festen Molekülumgebung. Die Zeitkonstante, mit der diese Relaxation beschrieben werden kann, wird als longitudinale Relaxationszeit (T1) bezeichnet. Da die Rückkehr der Protonen in ihre Ausgangslage auch von der Abstoßung der Dipole untereinander beeinflusst wird, wird die Relaxation noch durch eine zweite Konstante (transversale Relaxationszeit, T2) beschrieben. Bei der Relaxation senden die Protonen aufgrund der Bewegung ihres elektromagnetischen Moments in dem Magnetfeld eine Hochfrequenzstrahlung in Form einer elektromagnetischen Schwingung im Megahertz-Bereich aus (Echo). Diese Schwingungen können mit einer Spule empfangen werden, die zuvor die Radiofrequenzimpulse zur Ablenkung der Protonen ausgesendet hat (Hildebrandt, 1998, S. 941).

Der Computer rekonstruiert schließlich aus den elektromagnetischen Schwingungen, an welcher Stelle im Raum sich wie viele der Atome befinden und setzt aus diesen Informationen ein zwei- oder dreidimensionales Bild der untersuchten Schicht zusammen. In der

Regel werden Schichten von 1-10 mm Dicke untersucht, die sich aus kleinen Quadern (Voxel = Volumen x Element) zusammensetzen. Ihre Höhe entspricht der Schichtdicke, die Summe ihrer Kantenlängen der Größe der Bildmatrix. Für jedes Voxel wird bei der MRT die Signalintensität bestimmt. Dem jeweils gefundenen Messwert aus einem Voxel wird auf einen Monitor oder Filmträger im entsprechenden Bildpunkt (Pixel = Picture x Element) ein Grauwert oder eine Farbe zugeordnet. Je nach Anregungs- und Aufnahmeverfahren können somit wasser- oder fettreiche Gewebe als helle Flächen, wasserstoffarme Gewebe sowie Blutgefäße als dunkle Flächen dargestellt werden. Die Deutlichkeit des Bildes hängt dabei zu allererst von der Dichte der Protonen ab, kann aber auch durch die lokale Umgebung der Wassermoleküle beeinflusst werden. Zudem ist die Auflösung des Bildes durch thermisches Rauschen und die Dämpfung durch die Leitfähigkeit des menschlichen Körpers begrenzt. Bei der MRT stehen eine Vielzahl verschiedener Messsequenzen mit unterschiedlicher Aussagekraft der Bilder zur Verfügung. Grundsätzlich können zweidimensionale und dreidimensionale Messungen durchgeführt werden.

Eine wesentliche Verbesserung der zeitlichen und örtlichen Auflösung erfuhr die Magnetresonanztomographie durch eine neue, zeitsparendere Methode der Signalauslesung in Form des Echo-Planar-Imaging (EPI; Stehling et al., 1991). Mit EPI-fähigen MR-Systemen lassen sich komplette Bildakquisitionen nach einer einzigen Hochfrequenzanregung auslesen. Durch dieses Verfahren ist eine zeitliche Auflösung in einem Bereich von 100 ms möglich geworden. Die starken Gradientensysteme ermöglichen zusätzlich die Bildakquisition mit sehr kurzen TE-Zeiten (Echozeit). Dies hat eine vorteilhafte Auswirkung auf die Bildqualität in der MRT. Die MRT gestattet so auf sicherem Wege eine örtlich und zeitlich hochaufgelöste Bildgebung, die frei von den Strahlenbelastungen arbeitet.

4.3.2 Funktionelle Magnetresonanztomographie

Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT \cong Technik; fMRI \cong Bildgebung) ist die Anwendung von MR-Techniken zur Untersuchung der cerebralen Physiologie unter Beibehaltung der anatomischen Darstellung. Sie basiert auf schnellen Bilddarstellungstechniken des MRTs mittels Gradientenechosequenzen und dient insbesondere der nicht-invasiven Darstellung im Gehirn ablaufender neuronaler Prozesse.

Das Prinzip dieser Methode nutzt die Tatsache, dass die magnetische Eigenschaft des Blutes durch dessen Sauerstoffgehalt beeinflusst wird und so zu einer unterschiedlichen Signalgebung im fMRT genutzt werden kann. Bei der Untersuchung von Gehirnfunktionen geht man von der Annahme aus, dass aktivierte Neuronen bzw. Neuronenverbände ver-

stärkten Energiebedarf aufweisen, der durch Membrandepolarisationen und die Synthese von Neurotransmittern entsteht. Dies führt zu einem Anstieg des lokalen cerebralen Glukoseverbrauchs und somit auch zu einem Anstieg des regionalen cerebralen Blutflusses (rCBF), wodurch die Zufuhr von sauerstoffreichem arteriellem Blut gesteigert wird. Da dadurch jedoch die Sauerstoffzufuhr überproportional größer als der Sauerstoffverbrauch wird, resultiert dies in einem Überschuss an oxygeniertem Hämoglobin im venösen Abflussgebiet. Da sich die magnetischen Eigenschaften und damit die Signalgebung des Blutes mit dem Gehalt an oxygeniertem bzw. deoxygeniertem Hämoglobin ändern, verhält sich das Blut im fMRI wie ein endogenes Kontrastmittel, da das Eisen im Desoxyhämoglobin aufgrund des fehlenden Sauerstoffatoms zu einer paramagnetischen Substanz wird. Bei einem hohen Anteil an deoxygeniertem Hämoglobin wird aufgrund seiner paramagnetischen Eigenschaften in der Umgebung der Gefäße ein lokaler Magnetfeldgradient induziert, der bei geeigneter Auswahl der Messequenz, z.B. einer entsprechenden EPI-Sequenz, zu einer lokalen Signalminderung führt. Steigt der Anteil von oxygeniertem Hämoglobin im Blut an, nimmt dieser so genannte Suszeptibilitätseffekt ab. Dies führt zu einem Anstieg des Messsignals. Dieser Zusammenhang wird als „Blood Oxygenation Level-Dependent contrast“ (BOLD-Kontrast) bezeichnet. Mit zunehmender Feldstärke des Magnetresonanztomographen nimmt dieser Effekt zu, so dass funktionelle magnetresonanztomographische Untersuchungen lediglich in MRT-Geräten ab einer Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla realisierbar sind.

4.3.3 Vor- und Nachteile des fMRI

Ein großer Vorteil des fMRI liegt darin, dass gleichzeitig Morphologie und funktionale Prozesse gemessen und dargestellt werden können und keine belastenden Materialien wie Kontrastmittel oder Radionuklide erforderlich sind. Zudem besteht die Möglichkeit, eine einzelne Person problemlos und risikolos mehrfach untersuchen zu können, was gerade für die Forschung ein wichtiger Aspekt ist. Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung wird so die genaue Lokalisation der kortikalen und subkortikalen Gebiete möglich, die an der Bearbeitung spezifischer Aufgaben beteiligt sind.

Die Nachteile liegen darin, dass es sich trotz aller Entwicklungen um eine sehr anspruchsvolle und komplexe Technik handelt. So kann die Frage nach der Lokalisation einzelner Aktivierungen nicht immer einfach beantwortet werden. Gerade bei kognitiven Experimenten sind die Signalunterschiede, welche die Änderung der Sauerstoffkonzentration im Blut auslösen, extrem klein (2-3%) und müssen in den gewonnenen Bildern mit statisti-

schen Methoden detektiert werden. Bezüglich der Untersuchung von kognitiven Paradigmen sei hier bereits darauf hingewiesen, dass die beobachtbaren Signaldifferenzen im allgemeinen sehr gering sind. Jedoch können auch diese feinen Signalunterschiede anhand geeigneter statistischer Auswerteverfahren dargestellt werden. Als Folge daraus ist das Resultat einer solcher Analyse auf Wahrscheinlichkeitsaussagen begrenzt und nicht immer einfach zu deuten. Inwiefern man direkt von der regionalen Änderung des Metabolismus auch wirklich auf neuronale Aktivität schließen darf, ist noch nicht restlos geklärt. So ist zum Beispiel offensichtlich, dass die Oxygenierungsunterschiede durch den Blutfluss vom eigentlichen Ort des Geschehens weggeschwemmt und in venöse Sammelgefäße verlagert werden. Die räumliche Ausdehnung der Aktivität wird somit oft überschätzt. Erfasst wird immer nur die Änderung zwischen zwei Aktivierungszuständen im Gehirn. Diese Zustände müssen daher genau definiert und mittels eines gezielten Reizes kontrolliert ausgelöst werden.

4.3.4 Design von fMRI-Experimenten

Um eine bestimmte Gehirnregion selektiv zu aktivieren, muss ein geeignetes Aktivierungsparadigma gewählt werden. Sowohl Paradigma als auch Messzeit hängen im Wesentlichen vom Alter des Gerätes ab und müssen je nach dessen Qualität variiert werden. Bei der Wahl der Reizdauer muss man beachten, dass man mittels der fMRI nicht direkt die neuronale Aktivität misst, sondern lediglich die über die neurovaskuläre Kopplung vermittelte hämodynamische Antwort. Wenn man z.B. als Stimulus ein „Bild“ darbietet, muss man beachten, dass es je nach Areal erst nach zwei Sekunden zum Anstieg der Hämodynamik kommt. Nach fünf bis sechs Sekunden ist diese am Höchstpunkt und kehrt dann zur Baseline zurück (siehe Abb.8).

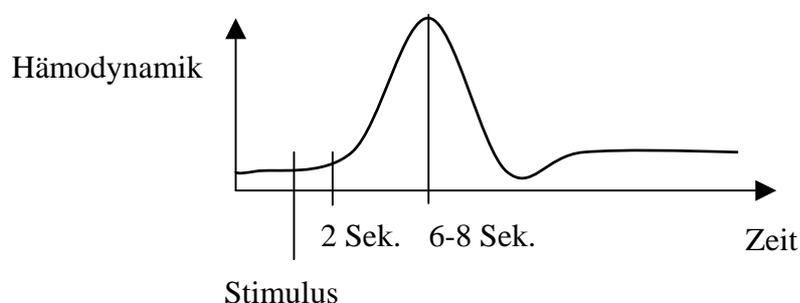


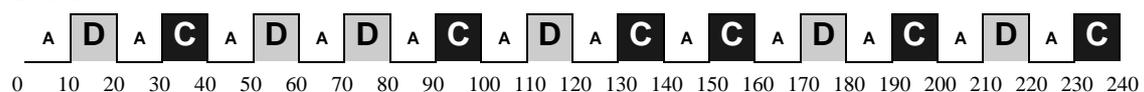
Abbildung 8: Darstellung der hämodynamischen Antwortfunktion (vgl. Ligges, 1999).

Aufgrund des Verhaltens der Hämodynamik liegt die ideale Länge einer Epoche, d.h. blockweise Wiederholung mit demselben „Stimulustyp“, bei mindestens 20-30 Sekunden. In dieser Studie wurden 10 Scans (3,946 sec pro Scan \cong 40 sec) pro Epoche gemessen. Wichtig ist jedoch, dass die Reizdauer eine gewisse Länge nicht überschreiten sollte, um Ermüdungs- oder Gewöhnungseffekten vorzubeugen. Ein weiterer Punkt ist die Anordnung der Bedingungen (Stimuluskategorien). In der Anwendung muss aufgrund der relativ hohen Zeitdauer der einzelnen Messungen ein Kompromiss zwischen der Zahl der zu untersuchenden Schichten und der Länge der einzelnen Messserien, und somit der Sicherheit der statistischen Auswertung, gefunden werden.

4.4 Versuchsplanung

Basierend auf dem in Abschnitt 4.1.3 dargestellten Stufenmodell mussten fünf Stimulustypen in das Paradigma implementiert werden. Um neben einer angemessenen Untersuchungszeit eine gute statistische Power zu erreichen wurden innerhalb eines Blockes 10 Scans erhoben, woraus bei sechsmaliger Wiederholung jedes Blockes 60 Scans pro Bedingung resultieren. Der Proband konnte die Aufgaben innerhalb eines maximalen Zeitfensters von 5 Sekunden in seinem eigenen Tempo bearbeiten. Um Habituationseffekte zu vermeiden wurde eine (pseudo-) randomisierte Blockreihenfolge festgelegt (siehe Abbildung 9). Da es nicht möglich war alle Aufgaben in einem Block darzubieten (fehlender Speicherplatz und Instruktionsprobleme) wurde die Untersuchung in zwei Blöcke untergliedert. Instruktionsprobleme bestanden darin, dass die Probanden im ersten Block Wörter und Nonwörter lesen und im zweiten Block Buchstaben abgleichen und Nonwörter reimen mussten. Da das im SPM99 angewendete Allgemeine Lineare Modell (vgl. 4.7.2) eine regelmäßige Wiederkehr einer Baseline-Bedingung als notwendig erachtet, wurden die Bedingungen alternierend mit der Ruhebedingung (Slashpaarabgleich) dargeboten. Somit erfolgte innerhalb der Blöcke der Wechsel der Stimulationsbedingung im Blockdesign. Abbildung 9 zeigt die Darbietungsreihenfolge der Bedingungen für Teil 1 und 2.

Teil 1



Teil 2

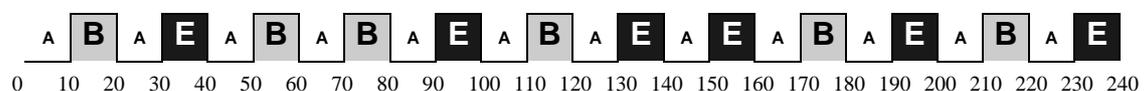


Abbildung 9: Stimulationsreihenfolge für Teil 1 und 2. (A) Slashpaarabgleich; (B) Buchstabenabgleich; (C) Wortlesen; (D) Nonwortlesen; (E) Nonwortreimen. Zahlen - Scanfolge.

Als Messequenz konnte zwischen einer Bildauflösung von 64x64 und 128x128 Voxeln ausgewählt werden. Da es sich in dieser Studie um ein kognitives Experiment handelt, wurde zu Gunsten des besseren Signal zu Rausch Verhältnisses die höhere Auflösung gewählt. Dies hatte jedoch zur Folge, dass nur eine Maximalschichtdicke von 16 Schichten à 6 mm zur Verfügung stand und somit auf die Region des Kleinhirns verzichtet werden musste. Aufgrund eines möglichen Ermüdungseffektes wurde das hochauflösende T1-Bild am Schluss gemessen. In Abbildung 10 wird ein kurzer Überblick über den Versuchsaufbau dargestellt:

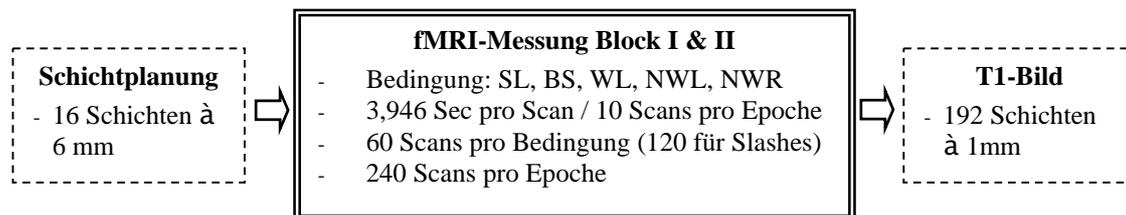


Abbildung 10: Darstellung des Versuchsaufbaus.

4.5 Untersuchungssetting

Die Untersuchung wurde in einem EPI-fähigen Siemens Magnetom Vision 1,5 Tesla MR-Scanner am Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikums Jena durchgeführt. Der MR-Scanner ist mit speziellen Gradientenspulen für die schnelle Bildgebung und einer zirkular polarisierten Kopfspule ausgestattet. Die Kopfspule diente zusätzlich zur Fixierung des Kopfes des Probanden, da schon minimale Kopfbewegungen sowohl Aktivierungen vortäuschen als auch die Qualität der Daten massiv beeinträchtigen können. Bei dieser Untersuchung wurde eine T2*-gewichtete Epi-Sequenz (TE = 66 ms, TR = 0,96 ms, FOV = 220mm, FA = 90°) angewandt. Der Raum, in dem sich der MR-Scanner befindet ist ca. 20 qm groß. Dieser Raum ist durch eine Scheibe an der Kopfseite des Raumes vom Kontrollraum, in dem sich die Steuertechnik des Gerätes befindet, einsehbar. Von diesem Kontrollraum wurde die Messung gesteuert und überwacht. Der Projektor (Laser-Projektionssystem mit Spezialobjektiv) der zur Darbietung des Stimulusmaterials eingesetzt wurde, befand sich im MRT-Raum, direkt am Fußende der Patientenliege und projizierte die Stimuli in Richtung des Eingangs des MRT's. Der Patient konnte im MRT-Tunnel liegend die Stimuli über einen an der Kopfspule befestigten Spiegel, der ca. 5 cm hoch und 10 cm breit war und den Blick in Richtung Projektor leitete, betrachten. Zusätzlich konnte der Patient mit seiner rechten Hand mittels einer MRT-

tauglichen Tastatur (Spezialanfertigung) die vorgegebenen Entscheidungsaufgaben (identisch vs. different) beantworten. Die Stimuli wurden mittels des ERTS von einem im Kontrollraum befindlichen Computer über den Projektor, präsentiert. In Abbildung 11 ist der Aufbau der Untersuchung noch einmal verdeutlicht.

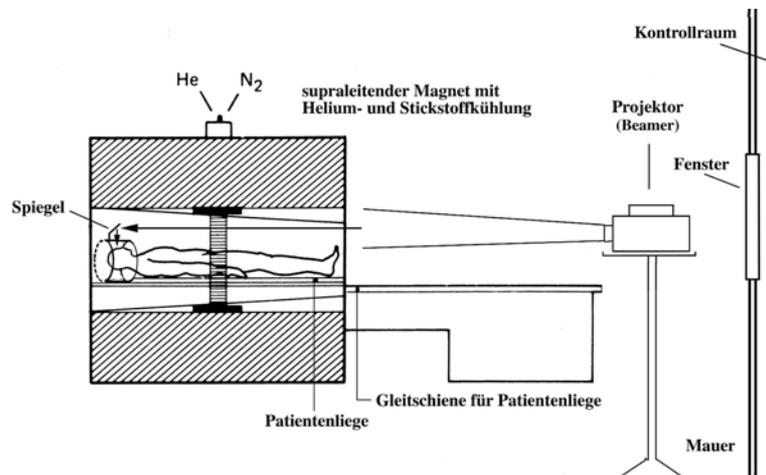


Abbildung 11: Schematischer Aufbau der MRI-Versuchsanordnung.

4.6 Versuchsablauf

4.6.1 Erstkontakt Diagnostische Sitzung

In Rahmen der Eingangsdiagnostik wurden die Hintergründe und der Ablauf der fMRI-Untersuchung detailliert beschrieben und darauf hingewiesen, dass die Messung jederzeit abgebrochen werden könne. Zudem wurde den Probanden eine finanzielle Aufwandsentschädigung für die Teilnahme angeboten.

4.6.2 Aufklärungsgespräch und Aufgabenerläuterung

Vor jeder Untersuchung wurde ein standardisierter Patientenaufklärungsbogen vorgegeben, den im Falle einer Minderjährigkeit die Erziehungsberechtigten unterschreiben mussten. Nach der Aufklärung wurde dem Probanden der genaue Untersuchungsablauf und die zwei Aufgaben detailliert beschrieben.

War der Proband für die Messung vorbereitet (metallfreie Bekleidung, Ohrstöpsel, falls nötig MRT-kompatible Brille), wurde er in den Raum, in dem sich das MRT-Gerät befand, geführt. Der Proband wurde nun auf dem Patientenschlitten des Tomographen ausgerichtet und der Kopf in einer Kopfspule positioniert und mit zwei kleinen Polstern stabilisiert, um Bewegungsartefakte zu minimieren. An dieser Kopfspule wurde ein Spiegel angebracht,

um dem auf dem Rücken liegenden Proband die Betrachtung der im Experiment dargebotenen Stimuli zu ermöglichen. Nun wurde der Patientenschlitten, auf dem die Versuchsperson lag, in das MRT-Gerät gefahren. Vor dem Patientenschlitten des Gerätes wurde nun der Projektor positioniert und das Bild auf dem Spiegel ausgerichtet. Zudem wurde die Tastatur an die rechte Hand des Probanden gelegt. Je eine Taste für den rechten Zeigefinger (Antwort ja/Gleich) und dem rechten Mittelfinger (Antwort nein/ungleich) stand zur Verfügung. Die Versuchsleiter begaben sich nun in den Kontrollraum, von wo aus über einen PC direkt mit dem Proband Kontakt aufgenommen werden konnte. Nach einer weiteren Instruktionsphase konnte mit der Messung begonnen werden.

4.6.3 Messung

Vor Beginn des eigentlichen Experiments wurde im Rahmen der Schichtplanung die anatomische Lokalisation der Schichten durchgeführt, in denen die experimentell induzierte Aktivität untersucht werden sollte. Zuerst wurde ein so genannter Scout aufgenommen. Dies ist eine grobe 3-dimensionale Darstellung des Kopfes und zeigt eine grobe Lokalisation der Strukturen an. Als Orientierungshilfe diente die AC-PC Linie (Anteriore Commissur - Posteriore Commissur, vgl. Abb.12; Bild A). Danach werden parallel zur AC-PC-Linie 16 Schichten à 6 mm erstellt (vgl. Abb. 12, Bild B & C). Zum Abschluss der Schichtplanung wurde noch eine Probemessung durchgeführt, um eine artefaktfreie Messung zu garantieren. Einige der Lokalisationsschritte sind in Abbildung 12 exemplarisch dargestellt.

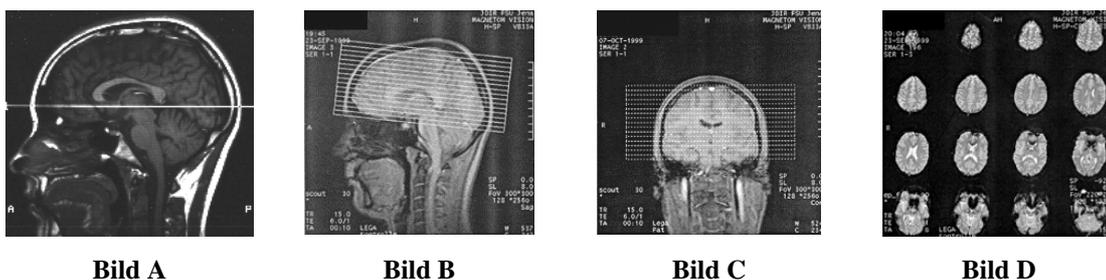


Abbildung 12: Schichtplanungsbilder.

Anmerkung: Bild A: Gerade durch AC-PC; Bild B: Resultierende 16 Schichten (transversal); Bild C: Resultierende 16 Schichten (occipital); Bild D: 16 Schichten in der Einzeldarstellung (eine Artefakte sichtbar).

Nach dem Abschluss der Schichtplanung wurde der Scanner für die fMRI-Untersuchung vorbereitet. Pro Epoche wurden 242 Scans aufgenommen. Die ersten zwei Scans wurden später für die Analyse nicht berücksichtigt. Nach Festlegung dieser Parameter wurde der Versuchsperson via Computer mitgeteilt, dass nun das eigentliche Experiment mit der

Darbietung des ersten Teils begann. Die Messung wurde in zwei Phasen unterteilt, da der Proband nach dem ersten Teil noch einmal neu instruiert und auf die Reimaufgabe hingewiesen werden musste.

Nach Beendigung des letzten Scans wurde dem Probanden mitgeteilt, dass er weiterhin ruhig liegen bleiben sollte. Zum Abschluss wurde eine dreidimensionale anatomische Aufnahme von 192 Schichten mit einer Dicke von 1 mm erstellt (T1-Bild). Für dieses T1-Bild wurden ca. 10-12 Minuten benötigt. Es diente dazu, um bei der Analyse der funktionellen Daten die dazugehörige anatomische Information zu erhalten.

4.7 Methoden zur Datenanalyse

Im Folgenden soll näher auf das zur Auswertung von fMRI-Datensätzen verwendete Verfahren eingegangen werden. Insbesondere sollen die charakteristischen Eigenschaften von fMRI-Daten, sowie deren Auswertung anhand des Statistical Parametric Mapping (SPM 99; Wellcome Department of Cognitive Neurology Institute of Neurology, University College London, UK; <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>) dargestellt werden. Zum Schluss soll die Auswertungsplanung der im MR-Scanner erhobenen neuropsychologischen Leistungsdaten und der in der Diagnostik erhobenen Testdaten beschrieben werden.

4.7.1 Allgemeines zu fMRI-Daten und deren Auswertungsstrategie

Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 beschrieben kommt es in aktiven Hirnregionen zu einem Anstieg des rCBF. Diese Umverteilung des Blutes kann durch die paramagnetische Eigenschaft von sauerstoffreichem Blut abgebildet werden. Dabei werden die einzelnen Voxel der ausgewählten Schichten einzeln angeregt. Anhand des empfangenen Signals können Rückschlüsse über den „aktiven oder nichtaktiven Zustand“ dieses Voxels erstellt werden. Dadurch, dass jedes Voxel bei seiner Anregung ortskodiert wird, erhält man nach vollständiger Anregung (epi) der gesamten Schicht pro Schicht einen Rohdatensatz über die Aktivierungszustände der einzelnen Voxel. Anhand einer Fourier-Transformation wird dieser Rohdatensatz in eine Bildmatrix umgeformt. Mit geeigneten statistischen Methoden können dann durch die Bildung von Signaldifferenzen Aussagen über die Aktivierungszustände während der unterschiedlichen experimentellen Bedingungen aufgestellt werden. Abbildung 13 zeigt ein generelles Schema zur fMRI-Datenakquisition und -Datenanalyse. In diesem Beispiel werden mittels statistischer Verfahren (Differenzbildung zwischen Ruhe und Stimulation) Parameterbilder erstellt, in denen Regionen mit kortikaler Aktivierung durch erhöhte Parameterwerte repräsentiert werden.

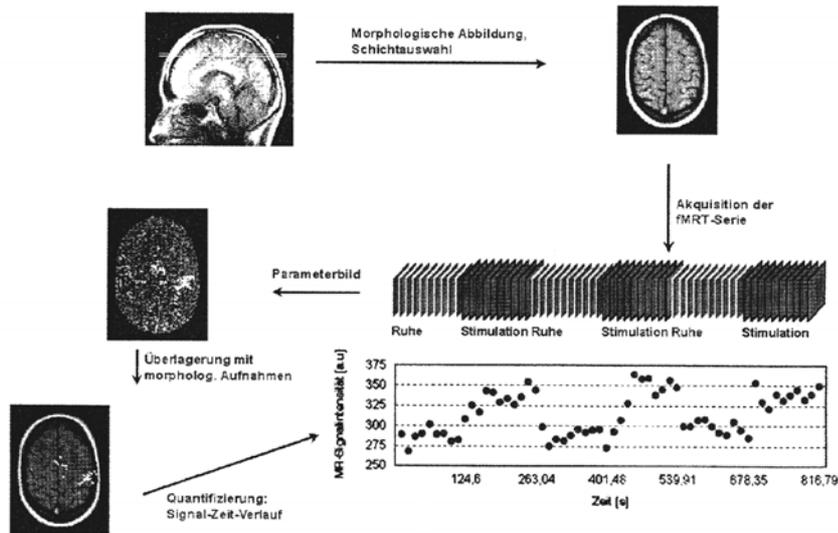


Abbildung 13: Schema der fMRI-Datenakquisition und -Datenanalyse (Reiser & Semmler, 1997, S. 806).

4.7.2 Statistisches Parametrisches Mapping (SPM99)

Die Analyse von fMRI-Daten beinhaltet viele Verarbeitungsschritte, die allgemein in (a) Vorverarbeitung (Bewegungskorrektur, Normalisierung, Glätten), (b) Parameterschätzung des Statistischen Modells (ALM) und (c) Rückschlüsse über die Effekte (statistische Folgerung) unterteilt werden können (Friston, 2000, S. 35). Im Rahmen der Vorverarbeitung werden Fehlerquellen, wie z.B. thermisches Rauschen oder Kopfbewegungen seitens des Probanden, reduziert. Im Rahmen der statistischen Analyse kommt eine voxelbasierte Auswertestrategie zum Einsatz, bei der die Voxelsignale der Bildmatrix über die Dimensionen Zeit und Raum anhand eines multiplen Regressionsansatzes ausgewertet werden (Friston, 1997, Kap. 2). Die Auswertungsschritte des SPM stellt Abbildung 14 dar:

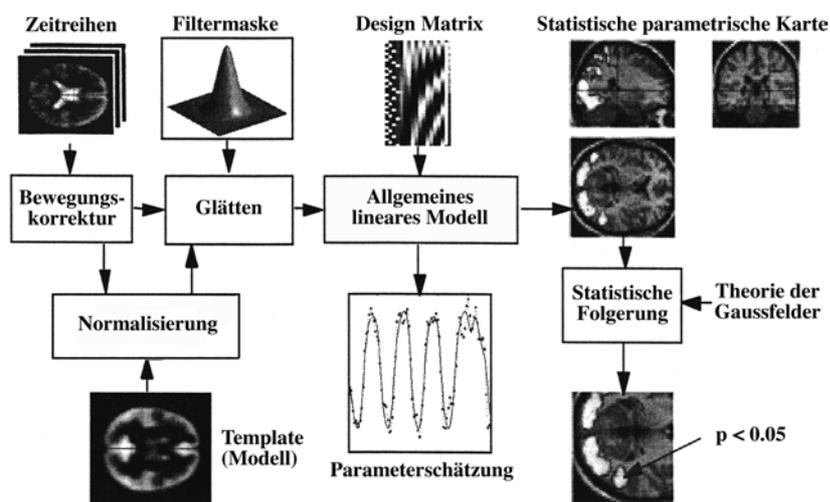


Abbildung 14: Überblick der SPM-Analyse.

Der genaue Ablauf und die Hintergründe der einzelnen Bearbeitungsschritte sind im Folgenden dargestellt:

Bewegungskorrektur

Da durch Kopfbewegungen, die sich oft nur im Millimeterbereich bewegen, Signale entstehen, die fälschlicherweise als Aktivierungen interpretiert werden können, muss vor der Datenauswertung unbedingt eine Bewegungskorrektur durchgeführt werden (Friston, 1997, Kap. 2). Zunächst wird mit dem ersten Bild der Versuchsserie für jede Versuchsperson ein Referenzbild bestimmt, das als Grundlage der Bewegungskorrektur dient. Diejenigen Bildinhalte, die sich gegenüber dem Referenzbild aus ihrer ursprünglichen Position (128 x 128 Bildmatrix) bewegt haben, werden durch Translation und Rotation mit dem Referenzbild mittels eines mathematischen Optimierungsverfahrens zur Deckung gebracht. Die Registrierung von Bildern vor und nach der Bewegung der Probanden kann zu Signalen führen, bei denen – für ein und dasselbe Voxel – die Unterschiede in den Signalwerten 1-2% der (durchschnittlichen oder maximalen) Signalamplitude erreichen können. Damit besteht die Gefahr, dass diese Unterschiede in den Signalwerten als Ausdruck einer Aktivierung fehlinterpretiert werden könnten. Resultieren im Rahmen der Bewegungskorrektur zu große Werte der Parameter (über 5mm), sollte von der Analyse dieser Person Abstand genommen werden.

Koregistrierung

Diese Funktion dient dazu, die funktionellen (T2*-gewichteten) Bilder so zu transformieren, dass sie sich mit dem strukturellen (T1-gewichteten) Bild des Probanden in denselben, anatomischen Raum (Koordinatensystem) befinden. Dies ist eine Voraussetzung für die Räumliche Normalisierung der Daten zum Zweck von Gruppenstudien (s.u.).

Räumliche Normalisierung

Um eine Gruppenauswertung der Bilddaten zu ermöglichen, müssen die Positionen der einzelnen Voxel und somit die Lage spezifischer anatomischer Strukturen vergleichbar sein, was aufgrund der variierenden Ausdehnung anatomischer Strukturen in unterschiedlichen Gehirnen zunächst nicht gegeben ist. Durch die Normierung der Bilder an einem „Standardgehirn“ (Talairach- oder NMI-Template (Vorlage); Talairach & Tournoux, 1988, 1993; Brett et al., 2001) wird so eine statistische Analyse der Daten in einem vergleichbaren anatomischen Raum möglich. Im Rahmen der Normalisierung erfolgen Transformationen von Bilddaten (Angleichung von Bildstrukturen an die mutmaßlich anatomisch korre-

spondierenden Strukturen eines Referenzbildes). Um eine solche Angleichung zu erreichen, sind in der Regel nichtlineare Transformationen (Drehungen, Scherungen, Streckungen & Stauchungen) erforderlich. Der anatomische (stereotaktische) Standardraum (Referenzbild) basiert auf 152 Gehirnen aus dem neurologischen Institut Montreal (Alan Evans, MNI, Canada). Das von den Autoren erstellte Koordinatensystem basiert auf einer transversalen Grundebene durch die vordere und hintere Commissur, einer coronaren Grundebene vertikal dazu durch die vordere Commissur und einer sagittalen Grundebene durch den Interhemisphärenspalt. Anhand dieser Einteilung der anatomischen Struktur des Gehirns ist es nun möglich, jeden Punkt im Gehirn anhand der auf diese Ebenen bezogenen Koordinaten zu definieren. Untersuchte Gebiete lassen sich dadurch mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich lokalisieren (Friston et al., 1995a, 1995b).

Räumliche Glättung

In einem letzten Schritt der Datenvorbereitung wird das oft schlechte Signal-Rausch-Verhältnis von fMRI-Daten verbessert. Der Begriff „räumliche Glättung“ bezeichnet hier die gewichtete, additive Verknüpfung eines Bildpunktes mit benachbarten Bildpunkten entsprechend einer vordefinierten Nachbarschaftsumgebung (Faltungsmaske). Dabei kann eine Reduktion des hochfrequenten Rauschanteils zu Gunsten des niederfrequenten Signalanteils erreicht werden. Dies ist eine Voraussetzung für die Anwendung der Theorie der Gaussfelder (s.u.). Zudem kann der Einfluss von unerwünschten Signalen, z.B. Atmung (0,25 Hz) oder Herzschlag (1 Hz) eliminiert bzw. reduziert werden (Reiser und Semmler 1997, Kap. 11).

Statistische Analyse und Schlussfolgerungen

Ist die Vorverarbeitung abgeschlossen kann mit der voxelweisen statistischen Analyse anhand des Allgemeinen Linearen Modells (ALM) begonnen werden. Da der statistischen Analyse meist ein t-Test zugrunde liegt müssen sowohl die Vielzahl der Bilder, die als miteinander korrelierte Stichproben betrachtet werden, als auch die hämodynamisch bedingte Verzögerung, in das Modell einbezogen werden. Durch die Vielzahl der Bilder ergeben sich wesentlich mehr Freiheitsgrade, welche entsprechend zu höheren t-Werten führen. Bei der statistischen Analyse wird eine Designmatrix erstellt, in der das experimentelle Paradigma und die Abfolge der Stimulusbedingungen kodiert werden. Anschließend werden anhand des ALM voxelweise Aktivitätsvergleiche über die Bedingungen durchgeführt.

Fragestellungen im SPM werden demnach immer mittels **Kontrastbildung** beantwortet. Kontraste sind benutzerspezifizierte Vektoren und kodieren den Auftretungsort interessierender Effekte. Im SPM wird für jede Fragestellung (Kontrast) für jedes einzelne Voxel ein t-Wert berechnet. Je höher dieser Wert ist, desto stärker ist der Hinweis, dass dieser Aktivierung nicht zufällig, sondern durch einen paradigmainduzierten Effekt zu Stande gekommen ist. In jeden t-Wert geht die Höhe der durch den Kontrast gewichteten Parameter (je höher, desto mehr Effekt) und die geschätzte Fehlervarianz (je kleiner, desto sicherere Aussage) ein. Für jeden Kontrast ergibt sich so eine statistische t-Karte mit einem t-Wert pro Voxel. Die $SPM\{t\}$ kann in eine Normalverteilung in ein Gaußsches Feld umgewandelt werden, woraus die $SPM\{Z\}$ resultiert (Friston et al. 1995b; Worsley et al., 1992).

Die $SPM\{Z\}$ stellt dabei jedoch noch nicht das statistische Endergebnis der Analyse dar. Diese Karte dient der Darstellung der Voxel, die im Verlauf der Zeitreihe eine ausreichende Signalvariation aufgewiesen haben. Da dies jedoch bei sehr vielen Voxeln der Fall ist, finden auf der Z-Karte zur Datenreduktion nur die Voxel Berücksichtigung, die eine hohe Variation und somit einen hohen Z-Wert aufweisen. Genauer gesagt werden auf der $SPM\{Z\}$ -Karte nur die maximalen Z-Werte dargestellt. Da es inhaltlich wenig Sinn macht, die Aktivierung einzelner Voxel zu analysieren, wird durch die Spezifizierung so genannter Set-, Cluster- und Voxel-Level die Zahl der Voxel systematisch minimiert, die schlussendlich in der Analyse berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden zum einen so genannte Cluster gebildet, die sich aus gleichzeitig aktiven, benachbarten Voxeln zusammensetzen. Dabei ist es nicht sinnvoll, allen gefundenen Clustern Aufmerksamkeit zu schenken. Inhaltlich macht es nur Sinn, Cluster zu berücksichtigen, die sich aus einer Mindestanzahl von aktivierten Voxeln zusammensetzen. Aus diesem Grund wird ein so genanntes Cluster-Level definiert, auf dessen Grundlage lediglich Cluster in die Analyse aufgenommen werden, deren Voxelanzahl über dem festgelegten Level angesiedelt ist. Die Anzahl der Cluster wird weiterhin dadurch eingeschränkt, dass Cluster das Kriterium einer ausreichenden Aktivierung erfüllen müssen. Dies geschieht in Form der Festlegung des Set-Levels.

Ein Cluster gilt dann als aktiviert, wenn die Kurve über der Schranke u liegt (siehe Abbildung 15). Es besitzt dann eine große Aussagekraft, wenn die Aktivierung der sich im Cluster befindenden Voxel ebenfalls über einer gewissen Schranke, dem so genannten Voxel-Level liegt, wobei der Entschluss bezüglich der Aufnahme des Voxels anhand der Höhe seines Z-Wertes gefällt wird. Somit werden nur die Voxel aufgenommen, deren Z-Werte über dem festgelegten Voxel-Level liegen.

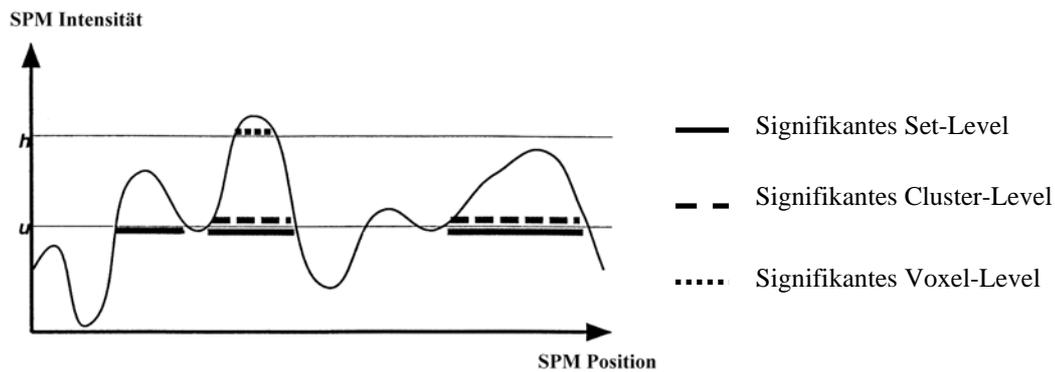


Abbildung 15: Darstellung der Set; Cluster- und Voxel- Level (vgl. Ligges, 1999).

Aufgrund dieser Kriterien werden bei der statistischen Analyse nur noch die Voxel berücksichtigt, die zum einen das Voxel-Level überschreiten und zum anderen Cluster bilden, die über dem Cluster-Level liegen. Ausschließlich in diesem Fall wird dieses Cluster in die Analyse aufgenommen. Inhaltlich sehr bedeutsame Cluster stellen hierbei die Cluster dar, die zum einen eine sehr hohe Clusteraktivität und zum anderen eine große Anzahl hoch-signifikanter Voxel enthalten.

Auf dieser Basis können anhand a) der Anzahl aktivierter Regionen, b) der Anzahl aktivierter Voxel und c) dem p-Wert jedes Voxels innerhalb dieser Region Schlussfolgerungen gezogen werden. Die Ergebnisse der SPM(Z)-Karte und der damit verbundene p-Werte sind der Schlusspunkt der Analyse. Dem Problem der Kumulierung des Alpha-Fehlers begegnet das SPM mit einem internen Korrekturmechanismus, so dass die resultierenden p-Werte als korrigiert betrachtet werden können (Friston, 1997, Kap. 2).

Neben dem SPM99 gibt es noch eine Vielzahl an weiteren Auswerteprogrammen für fMRI-Datensätze. Alternativen sind jedoch meist mit hohen finanziellen Kosten verbunden. Zudem ist die gewählte Methode (SPM-Paket) in der Forschungsliteratur weit verbreitet (Gold et al., 1998; Missimer et al., 1999).

Aussagen zur Population im SPM99 (Gruppenstudien)

Für Gruppenstudien mittels fMRI gibt es zwei wichtige Ziele. (1) Zum einen die Gewinnung von Aussagen über eine bestimmte Person oder Gruppe von Personen. Hierbei geht es um Aussagen, deren Gültigkeit nur für die an der Studie beteiligten Person(en) behauptet werden kann. (2) Ein weiteres Ziel ist die Gewinnung von Aussagen über die Population, aus der die für die Studie ausgewählten Personen stammen. Hier geht es um die Charakterisierung typischer Eigenschaften der (Gesamt-)Population (welche aber nicht bei jedem Mitglied dieser Population, d.h., jedem einbezogenen Probanden, gleichermaßen auftreten müssen).

Das Ziel der hier dargestellten Arbeit entsprach dem zweiten Punkt, d.h., die Gewinnung von Aussagen zur cerebralen Repräsentation phonologischer Verarbeitung bei der (Gesamt-)Population der Probanden mit LRS. Diese Zielsetzung kann mit einer so genannten „Random Effects“-Analyse (REA) erreicht werden. Die Grundlagen für die hier verwendete Form der fMRI-Datenanalyse sind in verschiedenen Publikationen ausführlich dargestellt (vgl. Friston et al., 1995a, 1995b, 1999b; Holmes & Friston, 1998; Worsley & Friston, 1995a). Dabei wird – für jedes Voxel – das beobachtete hämodynamische Antwortsignal (Zeitreihe) als eine linear gewichtete Addition aus so genannten Basisfunktionen modelliert (ALM, Friston et al., 1995b). Diese Basisfunktionen repräsentieren erwartete Effekte, d.h., erklärende Variablen, Regressoren oder Kovariaten sowie einen Rest, der als Rauschen aufgefasst werden kann. Die erklärenden Variablen repräsentieren insbesondere die Stimulationsregime für die einzelnen Stimulustypen (gefaltet mit einem Modell der hämodynamischen Antwortfunktion). Die Effekte, die als stimulus-induzierte Hirnaktivierungen aufgefasst werden können, werden durch Statistiken (meist *T*-Statistik) bewertet. Dabei berücksichtigt man jeweils eine Differenz von geschätzten Parametern (ein so genannter Kontrast) sowie die Fehlervarianz (Rauschterm) des linearen Modells. Die Parameter quantifizieren die Beiträge der interessierenden (stimulusbezogenen) Basisfunktionen zum beobachteten hämodynamischen Antwortsignal. Die Parameterschätzung erfolgt über bekannte Methoden der Matrizenalgebra (Friston et al., 1995a, 1995b; Worsley & Friston, 1995). Die Modellanpassung - wie zuvor skizziert - berücksichtigt die Variabilität innerhalb einer oder mehrerer individueller fMRI-Messungen. Damit sind Aussagen über die jeweilige(n) Person(en) möglich bzw. über die durchschnittliche Aktivierung einer Gruppe von Personen, deren beobachtete Antwortsignale zusammen modelliert wurden.

Um Aussagen über die (Gesamt-)Population zu treffen, können die Ergebnisse individuell angepasster Modelle als Ausgangsdaten für eine REA verwendet werden. Dabei wird die Variabilität der Aktivierungseffekte zwischen den Probanden berücksichtigt. Aktivierungen einer Population bestimmt man über einen Einstichproben-*t*-Test, in den die Daten der Gruppe (Stichprobe) für ein und denselben Kontrast (s.o.) eingehen. Aktivierungsunterschiede zwischen zwei Populationen bestimmt man über einen Zweistichproben-*t*-Test, bei dem die Daten zweier Gruppen für den jeweiligen Kontrast berücksichtigt werden.

4.7.3 Datenanalyse

Auswertung der neuropsychologischen Daten

Die statistische Auswertung der neuropsychologischen Daten erfolgte anhand des SPSS 10.1 (2000). Bei der Analyse der Daten wurden Ergebnisse statistischer Tests ab einem Signifikanzniveau von $\alpha \leq 0,05$ als statistisch bedeutsam angesehen. In einem ersten Schritt wurden die Daten der **Testdiagnostik** überprüft. Hierbei sollte geklärt werden, ob sich Probanden mit LRS von Kontrollprobanden hinsichtlich ihrer nonverbalen intellektuellen Leistungsfähigkeit, Konzentrationsleistung, Rechtschreibleistung und Leseleistung signifikant unterscheiden. In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der **Wortlisten** überprüft. In einem dritten Schritt erfolgte die Überprüfung der während der fMRI-Untersuchung erhobenen neuropsychologischen Leistungsdaten (**ERTS-Daten**). Hierbei wurden Reaktionszeit, Fehlerrate und nicht bearbeitete Stimuli berücksichtigt.

Zu Beginn der Analyse wurde die Normalverteilung der Daten, welche als eine Voraussetzung für die Anwendung der Varianzanalyse gilt, mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests geprüft. Auf der Basis der resultierenden p-Werte ($\leq 0,05$) konnte dies nicht in allen Fällen als gegeben akzeptiert werden. Die genaue Darstellung der Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests sind im Anhang C dargestellt. Vor der Durchführung der Varianzanalyse wurde die Varianzhomogenitäts-Voraussetzung überprüft. In den meisten Fällen konnte diese jedoch nicht als gegeben angesehen werden. Im Falle von Versuchsplänen mit Messwiederholungen ist eine der wesentlichen Voraussetzungen für jeden der Messwiederholungsfaktoren die erweiterte Varianzhomogenität, also die Gleichheit der Varianzen für die Messwiederholungen sowie die Zirkularität der Varianz/Kovarianzmatrix. Hierzu dient der Mauchleys-Sphärizitäts-Test, der überprüft, ob sich die Fehlerkovarianz-Matrix proportional zur Einheitsmatrix verhält. Der Test zeigte für die Variable „Fehlerprozent“ signifikante Ergebnisse. Für die Variablen „Reaktionszeit“ und „nicht bearbeitete Stimuli“ wurden jedoch keine signifikanten Ergebnisse erzielt. Dennoch wurde bei der nachfolgenden Analyse sowohl die durch diesen Faktor korrigierten Freiheitsgrade als auch der durch Greenhouse-Geisser (GG) korrigierte Signifikanzwert angewandt. Bei der Darstellung der Ergebnisse wurden immer die nicht korrigierten Freiheitsgrade und der entsprechende Korrekturfaktor Epsilon (ϵ) nach Greenhouse-Geisser angegeben.

Die Verletzungen der Voraussetzungen führen nach Bortz (1989, S. 398) im Falle hinreichend großer und gleicher Stichprobenumfänge zu keinen gravierenden Entscheidungsfehlern. Bei Verletzungen der Voraussetzungen der Normalverteiltheit sowie der Homoge-

nität der Varianzen ist laut Stevens (1996) eine Einschränkung der Aussagefähigkeit erst dann gegeben, wenn bei ungleicher Stichproben das Verhältnis größte : kleinste Stichprobe den Faktor 1,5 übersteigt. Da dies in den untersuchten Gruppen nicht gegeben ist kann von einer hinreichenden Interpretierbarkeit ausgegangen werden. Zudem sollte die Varianzanalyse trotz der teilweise vorhandenen Verletzungen robust reagieren.

Die statistische Auswertung der neuropsychologischen Daten erfolgte folgendermaßen:

Für die Variablen Konzentrationsleistung, Alter und nonverbaler-IQ wurden jeweils getrennt univariate Varianzanalysen ohne Messwiederholung berechnet. Für die Variablen Leseleistung (zlt-f, zlt-z,) und Rechtschreibleistung (rs-iq) wurde eine multivariate Varianzanalyse ohne Messwiederholung berechnet. Für die Wortlisten wurde je eine dreifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung für Zeit (Wörter, Nonwörter, Transformation) und Fehler (Wörter, Nonwörter, Transformation) berechnet. Abschließend wurden für die ERTS-Daten drei separate univariate Varianzanalysen mit Messwiederholung für Reaktionszeit, Fehler und nicht bearbeitete Stimuli berechnet. Für alle Berechnungen war der Faktor 1 (Altersgruppe; 1 \equiv Kind, 2 \equiv Jugendliche oder 3 \equiv Erwachsene) dreifach und der Faktor 2 (LRS; lrs \equiv Probanden mit LRS; kg \equiv normallesende Probanden) zweifach gestuft. Da für diese Studie unabhängig vom Alter signifikante Unterschiede zwischen Probanden mit LRS und normallesenden Probanden erwartet wurden, wurden trotz eingeschränkter Interpretationsmöglichkeit (Gefahr eines hohen Alpha-Fehlers aufgrund der großen Anzahl der Vergleiche) t-Tests bei unabhängigen Stichproben berechnet.

Auswertung der fMRI-Daten

Wie bereits beschrieben wurden in der vorliegenden Arbeit die fMRI-Daten unter Verwendung des SPM99 ausgewertet. Die Bewegungskorrektur erfolgte bei allen Bildern anhand des ersten Bildes. Da die Untersuchung zwei Blöcke beinhaltete wurden die jeweils ersten Bilder eines Durchlaufs zueinander ausgerichtet, gefolgt von der Ausrichtung aller Bilder eines Durchlaufs zum ersten bereits vorher ausgerichteten Bild im selben Lauf. Des Weiteren wurden die Daten mittels der „Mutual Coregistration“ auf das jeweils eigene hochauflösende anatomische Bild gelegt. In einem weiteren Schritt wurden nun die gesamten Daten auf das Standardtemplate mit einer Auflösung von $2 \times 2 \times 3$ mm normalisiert. Das Glätten der Daten erfolgte mit einem Filter von $8 \times 8 \times 12$ mm.

Dem Paradigma lag wie bereits in 4.1.3 beschrieben ein Stufenmodell mit fünf verschiedenen Aufgaben zugrunde. Die aufgabenspezifischen fMRI-Aktivierungen wurden nach der individuellen Kontrastanalyse für die Gruppen und die Altersstufen getrennt

ausgewertet. Jenseits der altersbezogenen Gruppenvergleiche wurden die Daten auch zwischen Gruppen mit vergleichbarer Lesefertigkeit analysiert (LRS vs. Kontrollen). Die unterschiedlichen Bedingungen (BS, WL, NWL, NWR) wurden in eine Basisfunktion mit der Bezeichnung „Delayed-Boxcar“ überführt und mittels des REA analysiert. Die Bedingung der Slashes wurde als Ruhebedingung aufgenommen und somit nicht als eigene Bedingung moduliert.

Die Schwelle der F-Statistik wurde mit $p < 0.05$ festgelegt. Alle Voxel, die den F-Test nicht bestanden, also den Test, ob ein Voxel eine bestimmte zeitliche Mindestvarianz zeigt, wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die spezifischen Einzeleffekte wurden anhand der linearen Kontraste für die geschätzten Parameter jeder Bedingung getestet. Durch den gerichteten Vergleich der verschiedenen Bedingungen (WL vs. BS, NWL vs. BS..) sollten Regionen, die je nach Stimuluskategorie unterschiedliche Reaktionen zeigten, identifiziert werden.

Die Ergebnisse geben die Position des Voxels im Talairach-Raum bzw. des zugrunde liegenden normalisierten Raumes an (MNI), anhand derer dann die signifikant aktivierten Areale dargestellt werden. Mittels des Talairach Daemon Client 1.1 (http://ric.uthscsa.edu/td_applet/) konnten den Koordinaten die Lokalisationen zugeordnet werden.

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Testdiagnostik, Wortlisten, ERTS- und fMRI-Daten dargestellt (detaillierte statistischen Ergebnisse siehe Anhänge C - F).

5.1 Testdiagnostik

Nonverbale Intelligenz

Für die Variable „nonverbale Intelligenz“ wurde eine univariate Varianzanalyse ohne Messwiederholung berechnet. Bei der univariaten Überprüfung ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt ALTER ($F(2;128)=3,548$; $p=.032$). Der Haupteffekt LRS ($F(1;128)=0,89$; $p=.167$), sowie die Wechselwirkung zwischen ALTER und LRS ($F(2;128)=0,378$; $p=.686$) zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die nonverbale Intelligenz zeigt folgende Ergebnisse:

Tabelle 4: Mittelwertsvergleiche (*t-Tests*) für die nonverbale Intelligenz

| LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|
| 108,8 | 15,1 | .752 | 110,3 | 16,1 | 100,5 | 14,2 | .544 | 103,0 | 12,0 | 100,2 | 11,9 | .125 | 106,6 | 15,9 |

Lese- und Rechtschreibleistung

Für die Variablen „Rechtschreibleistung“ und „Leseleistung“ (Fehler, Zeit) wurde eine multivariate Varianzanalyse ohne Messwiederholung berechnet. Bei der multivariaten Überprüfung ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor ALTER ($F(6;254)=15,004$; $p<.001$) und LRS ($F(3;126)=155,234$; $p<.001$). Darüber hinaus besteht eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren ALTER und LRS ($F(6;254)=5,803$; $p<.001$). Vor dem Hintergrund der signifikanten multivariaten Effekte zeigt sich bei der detaillierteren univariaten Analyse (vgl. Tabelle 5), dass für die Rechtschreibleistung ein signifikanter LRS-Effekt, jedoch kein Alterseffekt besteht. Sowohl der Alterseffekt als auch die Wechselwirkung zwischen Alter und LRS werden nicht signifikant. Für die Leseleistung (Zeit, Fehler) ergibt sich ein signifikanter LRS- und Alterseffekt. Zudem wird auch die Wechselwirkung zwischen Alter und LRS signifikant.

Tabelle 5: Univariate Tests für die Lese- und Rechtschreibleistung.

| Faktor | RS | ZLTF | ZLTZ |
|------------|--|------------------------------|-------------------------------|
| ALTER | $F(2;128)=2,049$; $p=.133$ | $F(2;128)=34,978$; $p<.001$ | $F(2;128)=48,031$; $p<.001$ |
| LRS | $F(1;128)=291,824$; $p<.001$ | $F(1;128)=137,99$; $p<.001$ | $F(1;128)=202,036$; $p<.001$ |
| ALTER*LRS | $F(2;128)=1,250$; $p=.290$ | $F(2;128)=4,739$; $p=.010$ | $F(2;128)=17,412$; $p<.001$ |
| Anmerkung: | RS-Rechtschreibleistung; ZLTF-Lesetest (Fehler); ZLTZ-Lesetest (Zeit). | | |

In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Rechtschreib- und Leseleistung dargestellt:

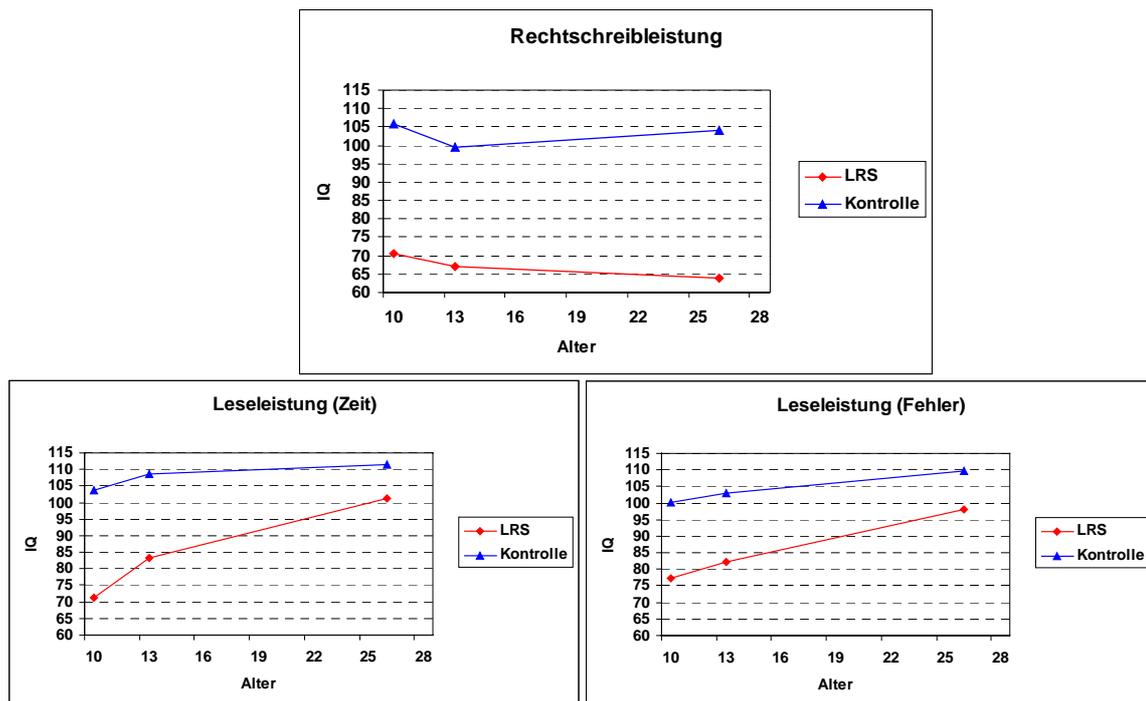


Abbildung 16: Rechtschreibleistung und Leseleistung (Zeit und Fehler). Alter 10-Kinder; 13-Jugendliche; 26-Erwachsene.

Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Rechtschreib- und Leseleistung zeigt folgende Ergebnisse:

Tabelle 6: Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Rechtschreib- und Leseleistung

| | LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|-----|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|
| (1) | 70,7 | 9,2 | .000 | 105,7 | 11,8 | 67,2 | 13,9 | .000 | 99,7 | 12,0 | 63,8 | 11,0 | .000 | 104,1 | 13,9 |
| (2) | 71,3 | 8,7 | .000 | 103,8 | 9,4 | 83,3 | 15,3 | .000 | 108,5 | 7,0 | 101,1 | 10,0 | .000 | 111,5 | 2,8 |
| (3) | 77,4 | 10,8 | .000 | 100,0 | 7,0 | 82,2 | 14,5 | .000 | 103,1 | 6,0 | 97,9 | 10,4 | .000 | 109,8 | 3,8 |

Anmerkung: (1) Rechtschreib-IQ, (2) Lese-IQ (Zeit), (3) Lese-IQ (Fehler).

Konzentrationsleistung

Für die „Konzentrationsleistung“ wurde eine univariate Varianzanalyse ohne Messwiederholung berechnet. Bei der univariaten Überprüfung zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt LRS ($F(1;128)=39,429$; $p<.001$). Der Haupteffekt ALTER ($F(2;128)=0,89$; $p=.413$), sowie die Wechselwirkung zwischen ALTER und LRS ($F(2;128)=2,450$; $p=.090$) zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Konzentrationsleistung ergibt folgende Ergebnisse:

Tabelle 7: Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Konzentrationsleistung

| LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 57,3 | 28,4 | .006 | 77,9 | 16,5 | 44,6 | 25,3 | .000 | 81,8 | 18,0 | 61,1 | 26,6 | .016 | 77,9 | 20,3 |

5.2 Wortlisten

Zur Untersuchung phonologische Fertigkeiten wurden allen Probanden Wortlisten (Wortlesen, Nonwortlesen, Transformationsaufgabe) vorgelegt, in denen jeweils Bearbeitungszeit und Fehler erhoben wurden (vgl. 4.1.2).

Bearbeitungszeit

Für die „Bearbeitungszeit“ wurde eine dreifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Bei der univariaten Überprüfung zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Zeit ($F(1,6;204,825)=144,088$; $p<.001$). Darüber hinaus besteht eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Zeit und LRS ($F(1,6;204,825)=3,874$; $p=.031$) und eine zweifache Wechselwirkung Zeit, Alter und LRS ($F(3,2;204,825)=7,099$; $p<.001$). Die Wechselwirkung zwischen Zeit und Alter wird nicht signifikant. Die Test der Zwischensubjekteffekte ergibt einen signifikanten Haupteffekt Alter ($F(2;128)=24,673$; $p<.001$) und LRS ($F(1;128)=91,5$; $p<.001$). Die Wechselwirkung zwischen Alter und LRS wird nicht signifikant. In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Wortlisten für die Bearbeitungszeit dargestellt:

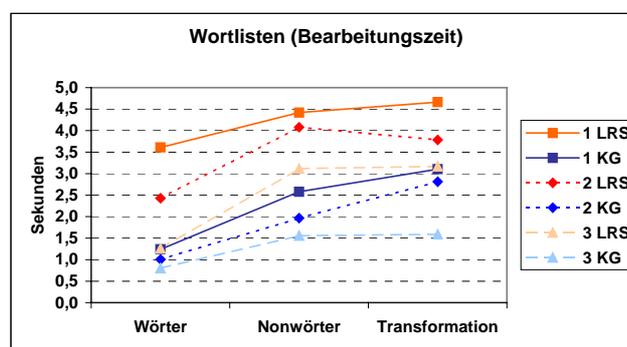


Abbildung 17: Wortlisten Bearbeitungszeit. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Wortlisten (Bearbeitungszeit) zeigt folgende Ergebnisse:

Tabelle 8: Mittelwertsvergleiche (*t-Tests*) für die Wortlisten (Bearbeitungszeit)

| | LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|-----|------------|-----|-------------|------------|-----|------------|-----|-------------|------------|-----|------------|-----|-------------|------------|-----|
| (1) | 3,6 | 1,6 | .000 | 1,2 | 0,5 | 2,4 | 1,4 | .001 | 1,0 | 0,3 | 1,3 | 0,4 | .000 | 0,8 | 0,3 |
| (2) | 4,4 | 1,8 | .000 | 2,6 | 1,0 | 4,1 | 2,0 | .000 | 2,0 | 0,6 | 3,1 | 1,1 | .000 | 1,6 | 0,5 |
| (3) | 4,7 | 1,6 | .000 | 3,1 | 0,9 | 3,8 | 1,3 | .010 | 2,8 | 0,8 | 3,2 | 1,7 | .000 | 1,6 | 0,7 |

Anmerkung: Angaben in sec. (1) Wörter (2) Nonwörter (3) Transformation

Bearbeitungsfehler

Für die „Bearbeitungsfehler“ wurde eine dreifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Bei der univariaten Überprüfung ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Fehler ($F(1,878;240,412)=119,948$; $p<.001$). Darüber hinaus besteht eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Fehler und Alter ($F(3,756;240,412)=4,148$; $p=.004$), sowie Fehler und LRS ($F(1,878; 240,412)=17,275$; $p<.001$). Die zweifache Wechselwirkung Fehler, Alter und LRS wird nicht signifikant. Die Test der Zwischensubjekteffekte ergeben einen signifikanten Haupteffekt Alter ($F(2;128)=34,284$; $p<.001$) und LRS ($F(1;128)=119,317$; $p<.001$). Die Wechselwirkung zwischen Alter und LRS ($F(2;128)=6,703$; $p=.002$) wird ebenso signifikant. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Wortlisten (Bearbeitungsfehler) dargestellt:

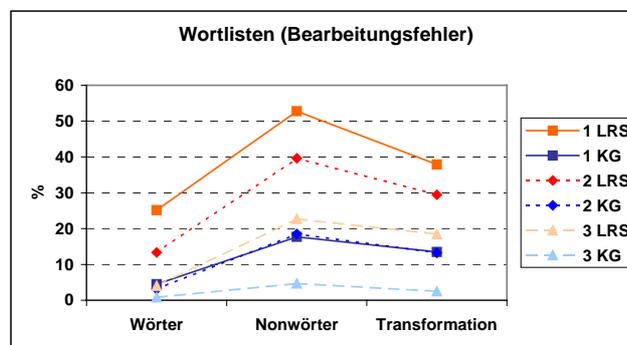


Abbildung 18: Wortlisten Bearbeitungsfehler. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (*t-Tests*) für die Wortlisten (Bearbeitungsfehler) ergibt folgende Ergebnisse:

Tabelle 9: Mittelwertsvergleiche (*t-Tests*) für die Wortlisten (Bearbeitungsfehler)

| | LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|-----|-------------|------|-------------|-------------|-----|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------------|-----|
| (1) | 25,2 | 17,0 | .000 | 4,5 | 5,3 | 13,3 | 11,9 | .002 | 3,1 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | .001 | 0,8 | 2,2 |
| (2) | 52,7 | 21,9 | .000 | 17,7 | 9,2 | 39,6 | 20,5 | .000 | 18,5 | 7,8 | 22,7 | 13,4 | .000 | 4,7 | 5,6 |
| (3) | 37,9 | 19,3 | .000 | 13,5 | 9,8 | 29,4 | 14,9 | .000 | 13,3 | 10,8 | 18,5 | 16,4 | .000 | 2,5 | 5,9 |

Anmerkung: Angaben in %. (1) Wörter (2) Nonwörter (3) Transformation

5.3 ERTS-Daten

Reaktionszeit

Für die „Reaktionszeit“ wurden eine univariate Varianzanalysen mit Messwiederholung berechnet. Bei der univariaten Überprüfung zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Reaktionszeit ($F(3,322;425,190)=396,570$; $p<.001$). Darüber hinaus besteht eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Reaktionszeit und Alter ($F(6,644; 425,190)=6,520$; $p<.001$) und Reaktionszeit und LRS ($F(3,322;425,190)=33,015$; $p<.001$). Die zweifache Wechselwirkung Reaktionszeit, Alter und LRS wird nicht signifikant. Die Test der Zwischensubjekteffekte ergeben einen signifikanten Haupteffekt Alter ($F(2;128)=25,884$; $p<.001$) und LRS ($F(1;128)=54,941$; $p<.001$). Die Wechselwirkung zwischen Alter und LRS wird nicht signifikant. In Abbildung 19 sind die Ergebnisse der Reaktionszeiten dargestellt:

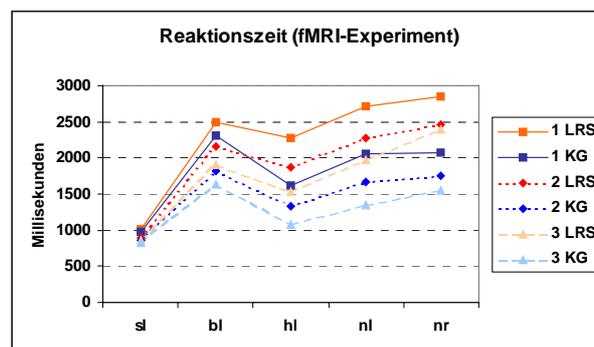


Abbildung 19: fMRI-Experiment Reaktionszeit. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Reaktionszeit zeigt folgende Ergebnisse:

Tabelle 10: Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Reaktionszeit

| | LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|----|------|-----|------|------|-----|------|-----|------|------|-----|------|-----|------|------|-----|
| sl | 1018 | 169 | .439 | 978 | 167 | 890 | 185 | .657 | 865 | 184 | 861 | 241 | .603 | 819 | 305 |
| bl | 2488 | 482 | .168 | 2301 | 386 | 2164 | 393 | .003 | 1827 | 289 | 1912 | 585 | .023 | 1629 | 299 |
| hl | 2279 | 553 | .000 | 1620 | 465 | 1866 | 457 | .000 | 1332 | 309 | 1534 | 568 | .001 | 1072 | 371 |
| nl | 2711 | 543 | .000 | 2049 | 472 | 2283 | 381 | .000 | 1669 | 405 | 1970 | 688 | .001 | 1351 | 349 |
| nr | 2852 | 683 | .000 | 2073 | 594 | 2464 | 549 | .000 | 1748 | 417 | 2396 | 660 | .000 | 1546 | 436 |

Anmerkung: Angaben im ms.

Fehler (Fehlerprozent)

Für die „Fehler“ wurden eine univariate Varianzanalysen mit Messwiederholung berechnet. Bei der univariaten Überprüfung ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Fehler ($F(3,133;401,054)=38,725$; $p<.001$). Darüber hinaus besteht eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Fehler und Alter ($F(6,266; 401,054)=3,096$; $p=.005$), sowie Fehler und LRS ($F(3,133;401,054)=11,908$; $p<.001$). Die zweifache Wechselwirkung Reaktionszeit, Alter und LRS ($F(6,266;401,054)=2,157$; $p=.044$) wird ebenso signifikant. Die Test der Zwischensubjekteffekte ergibt einen signifikanten Haupteffekt Alter ($F(2;128)=13,735$; $p<.001$) und LRS ($F(1;128)=13,237$; $p<.001$). Die Wechselwirkung zwischen Alter und LRS wird nicht signifikant. In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der Fehler dargestellt:

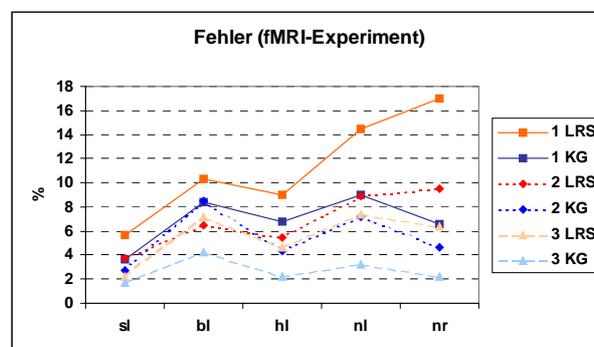


Abbildung 20: fMRI-Experiment Fehler. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Fehler (%) ergibt folgende Ergebnisse:

Tabelle 11: Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die Fehler (%)

| | LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|----|--------------|-------|-------------|-------------|------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------|-------------|-------------|------|
| sl | 5,64 | 6,47 | .219 | 3,67 | 3,31 | 3,72 | 2,73 | .165 | 2,73 | 1,81 | 2,20 | 2,12 | .360 | 1,74 | 1,34 |
| bl | 10,35 | 7,88 | .378 | 8,42 | 6,17 | 6,45 | 3,31 | .290 | 8,45 | 7,35 | 7,13 | 10,19 | .161 | 4,26 | 2,33 |
| hl | 8,98 | 6,79 | .287 | 6,75 | 7,77 | 5,49 | 4,17 | .300 | 4,32 | 2,54 | 4,65 | 5,90 | .043 | 2,19 | 1,56 |
| nl | 14,43 | 7,33 | .019 | 9,01 | 7,25 | 8,92 | 5,45 | .247 | 7,13 | 4,44 | 7,38 | 8,09 | .028 | 3,25 | 1,89 |
| nr | 17,03 | 10,96 | .001 | 6,56 | 7,71 | 9,53 | 7,55 | .015 | 4,68 | 4,76 | 6,36 | 4,47 | .000 | 2,19 | 1,95 |

Anmerkung: Angaben in %.

Nicht bearbeitete Stimuli (nichtb.)

Für die „nichtb.“ (Stimuli) wurde eine univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Bei der univariaten Überprüfung ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor nichtb. ($F(2,900;371,174)=20,817$; $p<.001$). Darüber hinaus besteht eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren nichtb. und Alter ($F(5,8; 371,174)=8,111$; $p<.001$), sowie nichtb. und LRS ($F(2,9; 371,174)=10,636$; $p<.001$). Die zweifache Wechselwirkung Reaktionszeit, Alter und LRS wird nicht signifikant. Die Test der Zwischen-subjekteffekte ergibt einen signifikanten Haupteffekt Alter ($F(2;128)=18,409$; $p<.001$) und LRS ($F(1;128)=24,441$; $p<.001$). Die Wechselwirkung zwischen Alter und LRS ($F(2;128)=4,389$; $p=.014$) wird ebenso signifikant. In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der nicht bearbeiteten Stimuli dargestellt:

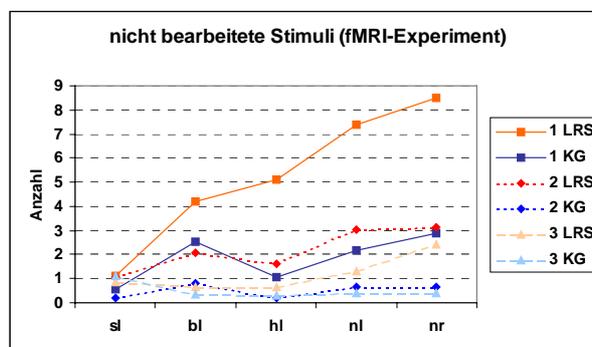


Abbildung 21: fMRI-Experiment nicht bearbeitete Stimuli. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

Die Berechnung der Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die nicht bearbeiteten Stimuli ergibt folgende Ergebnisse:

Tabelle 12: Mittelwertsvergleiche (t-Tests) für die nicht bearbeiteten Stimuli

| | LK | SD | p | KK | SD | LJ | SD | p | KJ | SD | LE | SD | p | KE | SD |
|----|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|------|-------------|-------------|------|
| sl | 1,11 | 2,12 | .322 | 0,57 | 1,32 | 1,06 | 2,91 | .246 | 0,21 | 0,82 | 0,86 | 1,87 | .853 | 1,09 | 5,48 |
| bl | 4,18 | 4,17 | .159 | 2,52 | 3,34 | 2,06 | 3,26 | .092 | 0,79 | 1,32 | 0,68 | 1,13 | .274 | 0,37 | 0,84 |
| hl | 5,09 | 5,09 | .001 | 1,05 | 1,56 | 1,61 | 1,79 | .005 | 0,21 | 0,66 | 0,64 | 1,53 | .359 | 0,30 | 1,03 |
| nl | 7,36 | 5,44 | .001 | 2,19 | 3,63 | 3,06 | 2,86 | .003 | 0,67 | 1,05 | 1,32 | 2,03 | .115 | 0,41 | 1,93 |
| nr | 8,50 | 6,44 | .001 | 2,86 | 3,58 | 3,11 | 3,01 | .004 | 0,67 | 1,01 | 2,41 | 3,39 | .013 | 0,41 | 1,05 |

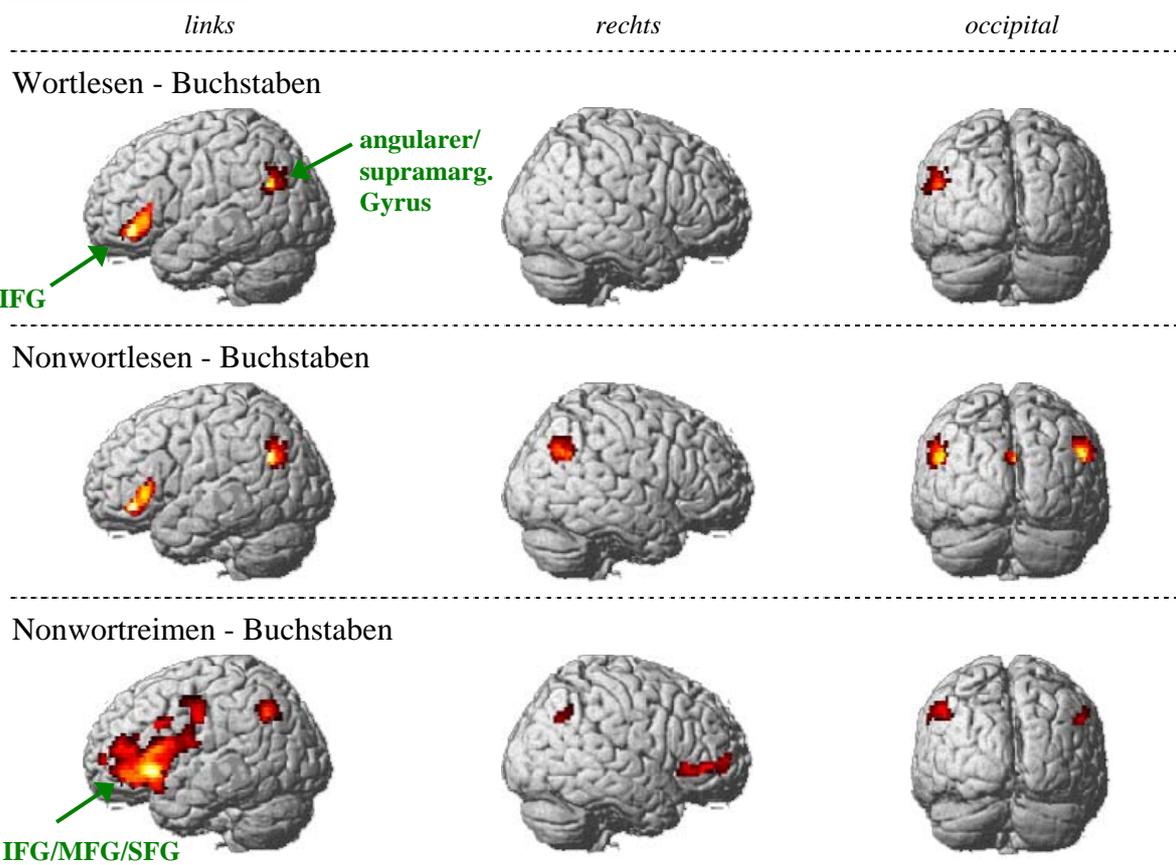
Die nicht bearbeiteten Stimuli liefern ein heterogeneres Bild und lassen zwei Schlüsse zu: Da das maximale „Zeitfenster“ aller Bedingungen für die fMRI-Untersuchung auf fünf Sekunden festgelegt wurde, scheint es so zu sein, dass alle Probanden die Aufgaben in diesem Zeitrahmen lösen konnten. Nur in der Gruppe der Kinder mit LRS gab es bei Aufgaben zur gesteigerten phonologischen Anforderung wenige Zeitüberschreitungen.

5.4 fMRI

Im Folgenden werden die fMRI-Ergebnisse der verschiedenen Gruppen (Kinder, Jugendliche und Erwachsene mit und ohne LRS) getrennt dargestellt. Ergebnisse der Probanden mit LRS und die Kontrollprobanden werden ebenso getrennt dargestellt. Im Rahmen des SPM99 wurde für jeden dargestellten Kontrast ein „Einstichprobentest“ („one-sample-t-Test“) berechnet (vgl. 4.7.3). Des Weiteren werden die Gruppenunterschiede zwischen Probanden mit LRS und Kontrollprobanden innerhalb jeder Altersstufe dargestellt. Diese wurden für jeden Kontrast mittels eines „Zweistichprobentests“ („two-sample-t-Test“) berechnet. Insgesamt wurden für alle Gruppen ein unkorrigierter Wert mit einem Signifikanzniveau von 0,01 und für den Gruppenvergleich ein unkorrigierter Wert von 0,05 festgelegt. Zur Bezeichnung des höheren BOLD-Signals (bzw. BOLD-Antwort) im Gruppenvergleich, also der signifikanten „mehr Aktivierung“ einer Gruppe für einen Kontrast, soll in der vorliegenden Arbeit der Begriff „Überaktivierung“ verwendet werden.

In Studien von Pugh et al. (1996, 1997, 2000a; vgl. 2.5.3) wurde beschrieben, dass je nach Kontrast unterschiedliche Prozesse angesprochen werden. So spricht laut Pugh et al. (1996) ein Kontrast wie Buchstaben gegen Slashes rein orthografische Prozesse an. Reimen gegen Slashes wiederum orthografische und phonologische Prozesse. Die Ergebnisse zeigen im Überblick, dass die Vergleich gegen die Slashes (vgl. Anhang E) weniger gut differenzieren und nur geringer ausgeprägtere Aktivierungsmuster hervorrufen als die Vergleiche gegen die Buchstaben. In diesem Sinne sollen vorwiegend die Kontraste gegen Buchstaben betrachtet werden. Desweiteren sind ein Überblick über die resultierenden Koordinaten im „Talairach-Raum“ (Lokalisationen) und die zugehörigen Signifikanzwerte jeweils im Anhang F dargestellt.

Kinder mit LRS



Kontrollkinder

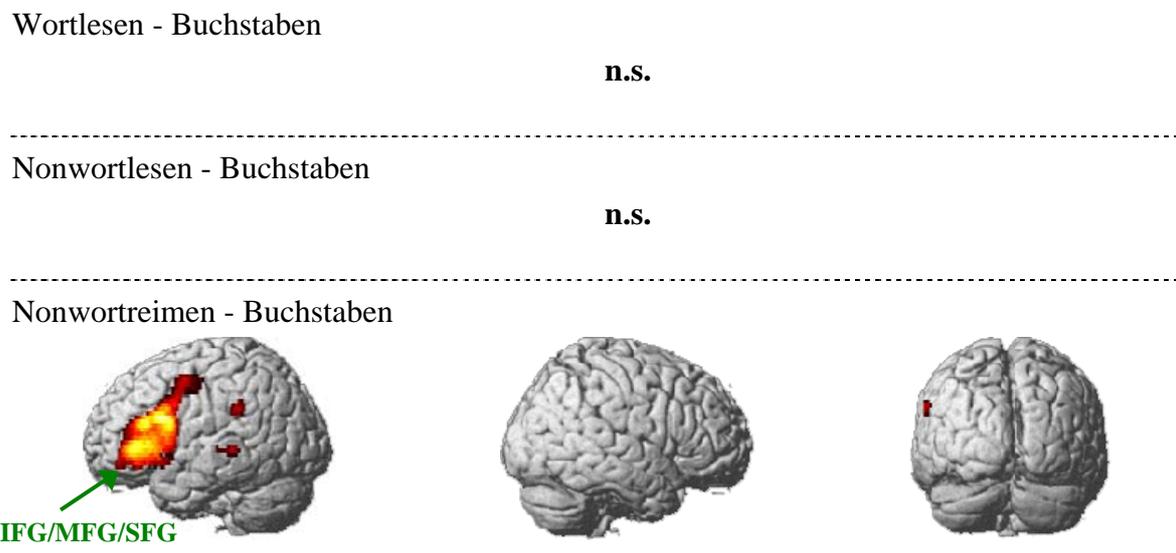
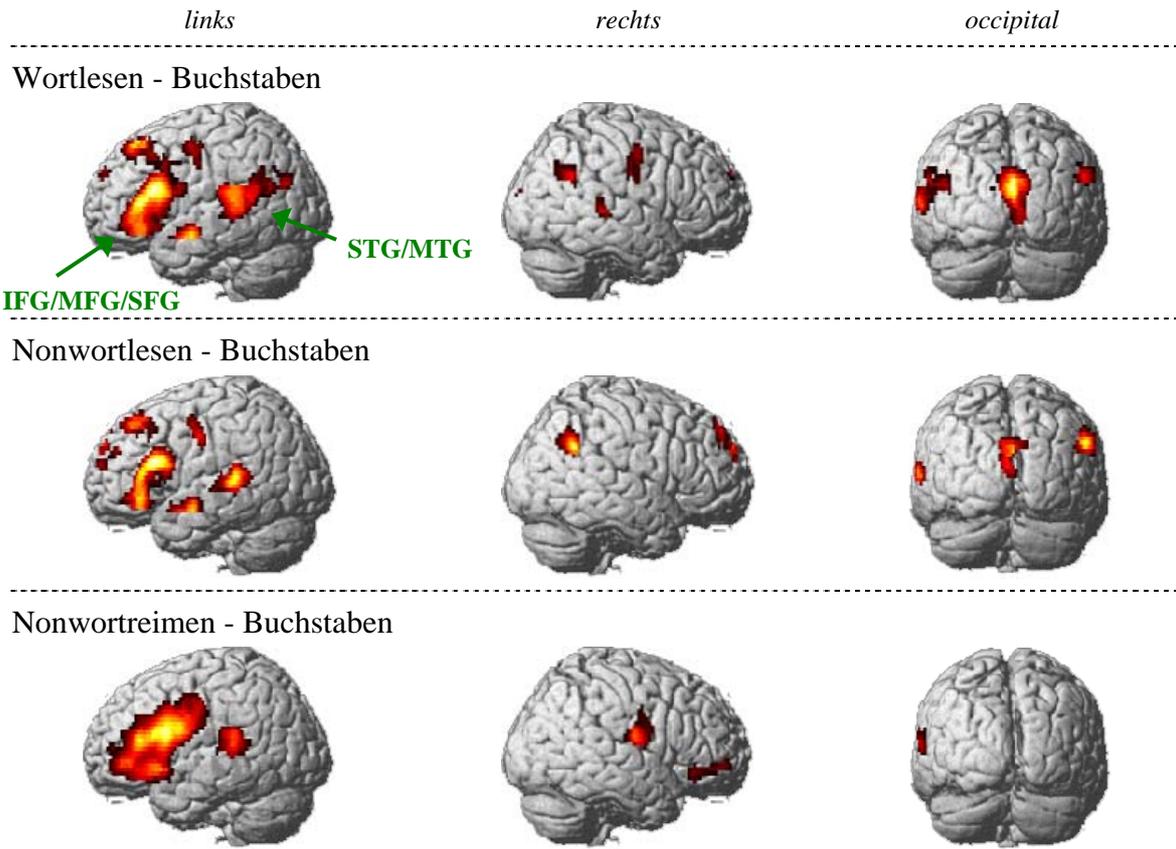


Abbildung 22: Gruppenanalyse für Kinder.

Jugendliche mit LRS



Kontrolljugendliche

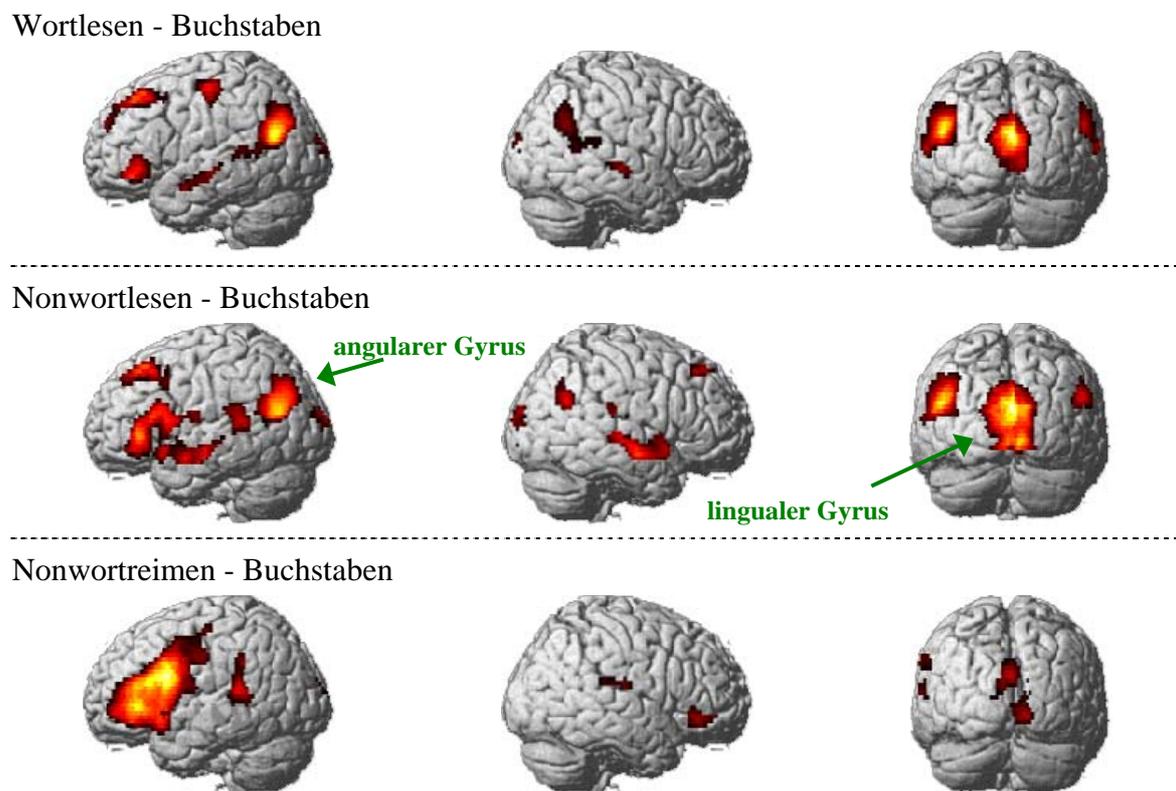


Abbildung 23: Gruppenanalyse für Jugendliche.

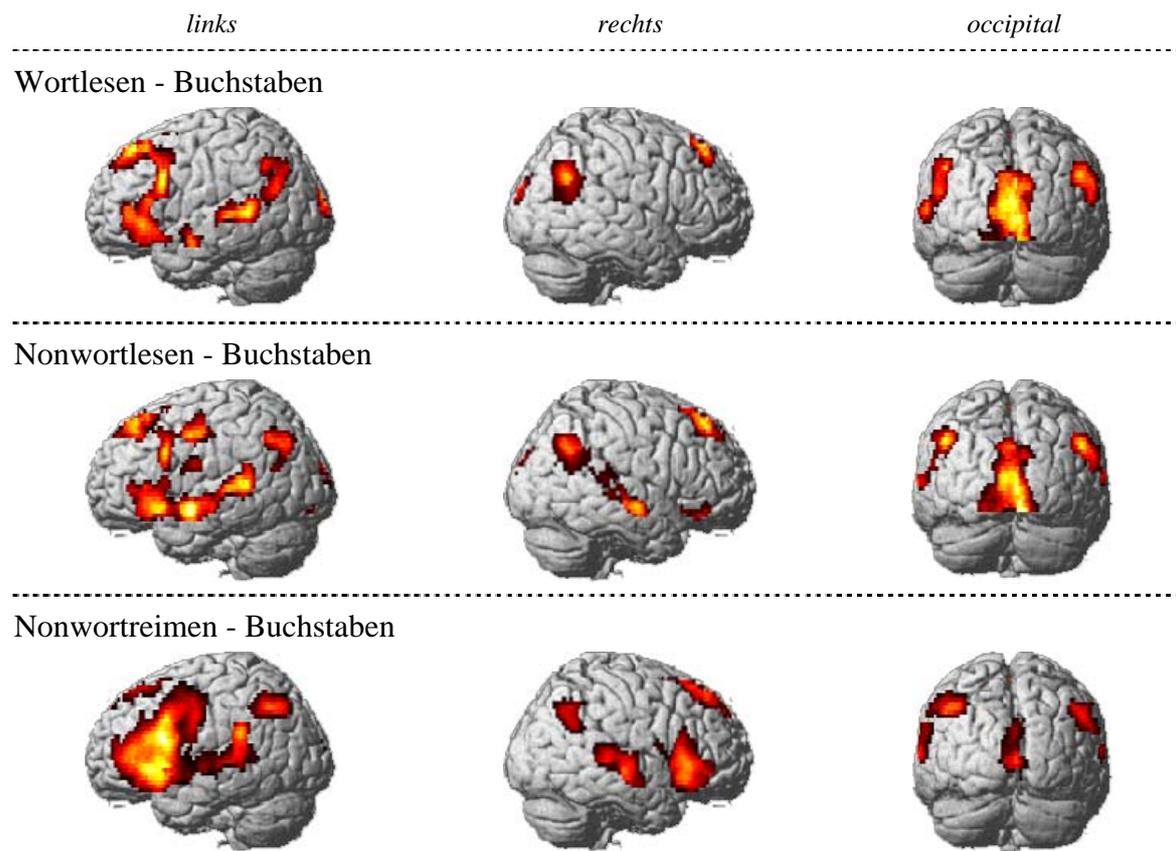
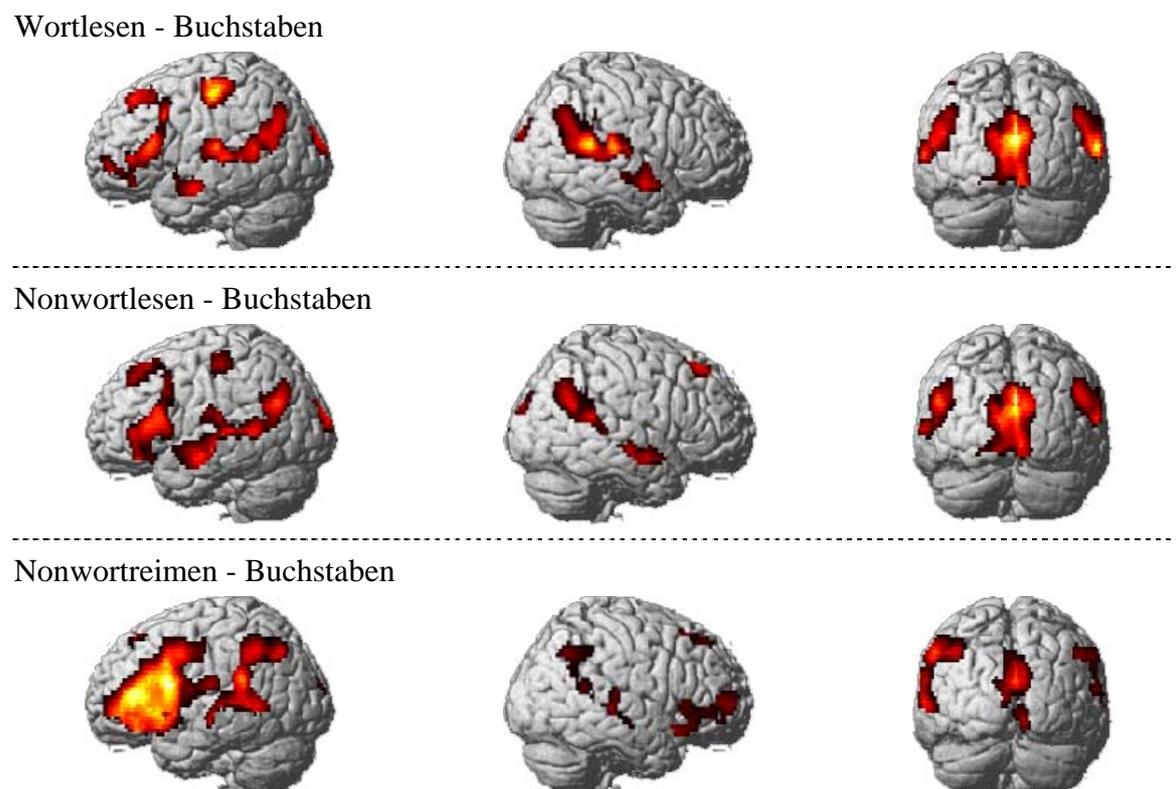
Erwachsene mit LRS**Kontrollerwachsene**

Abbildung 24: Gruppenanalyse für Erwachsene.

Lokalisation der Aktivierungen (Kinder)

Es zeigen sich für Kinder in jeder Bedingung (gegen Slashes) signifikante bilaterale Aktivierungen in vorwiegend occipitalen (extrastriären) Regionen (lingualer Gyrus, BA18). Diese Aktivierungen können gleichermaßen für LRS- als auch für Kontrollkinder beobachtet werden. Mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit werden die Aktivierungen in occipitalen Regionen geringfügig stärker. Aktivierungen in inferior frontalen oder temporoparietalen Regionen können nicht, bzw. nur teilweise, beim Nonwortreimen, beobachtet werden (vgl. Anhang E).

Beim Vergleich der Bedingungen gegen die Buchstaben zeigen sich in der Gruppe der Kinder mit LRS bilaterale Aktivierungen in parietalen (angularer und supramarginaler Gyrus; BA39/40) und frontalen Regionen (IFG, MFG, SFG; BA44/47). Diese Aktivierungen können nur bei Kindern mit LRS beobachtet werden. Erst beim Nonwortreimen (schwierigste phonologische Anforderung) kommt es in beiden Gruppen zu ausgedehnten frontalen Aktivierungen (vgl. Abb. 22).

Lokalisation der Aktivierungen (Jugendliche)

In der Gruppe der Jugendlichen können in allen Bedingungen (gegen Slashes) signifikante Aktivierungen in vorwiegend bilateralen occipitalen (extrastriären) Regionen (lingualer Gyrus, fusiformer Gyrus; BA17/18/19) beobachtet werden. Diese Aktivierungen zeigen sich gleichermaßen für LRS- als auch für Kontrolljugendliche, wobei eine deutlich stärkere Aktivierung in der Gruppe der Kontrolljugendlichen beobachtbar ist. Ausgedehnte inferior frontale Aktivierungen zeigen sich in beiden Gruppen beim Nonwortreimen (vgl. Anhang E).

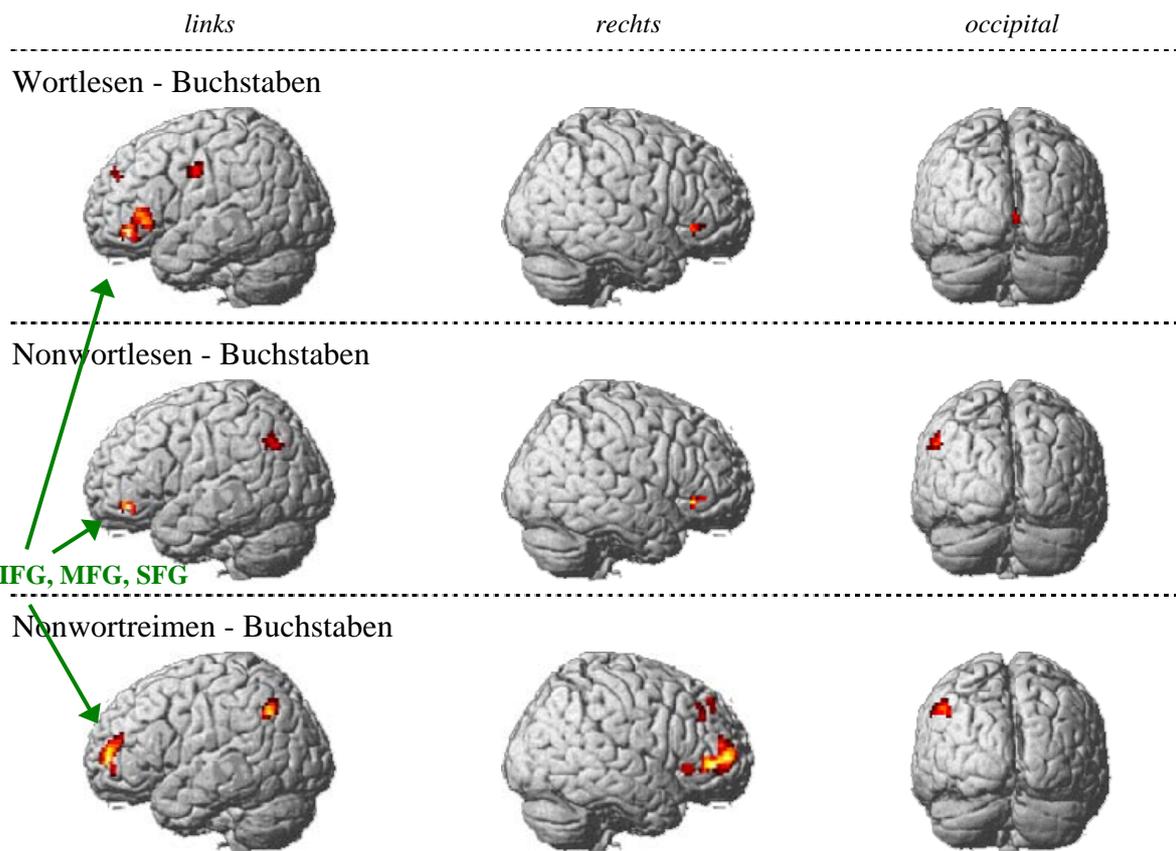
Beim Vergleich der Bedingungen gegen die Buchstaben zeigen sich bei Jugendlichen mit und ohne LRS gleichermaßen bilaterale Aktivierungen in extrastriären (lingualer Gyrus; BA17/18/19), parietalen (angularer und supramarginaler Gyrus; BA39/40), temporalen (MTG, STG; BA21/22/39) und frontalen Regionen (IFG, MFG, SFG; BA4/6/8/9/45/47; vgl. Abb. 23).

Lokalisation der Aktivierungen (Erwachsene)

Insgesamt zeigen sich bei Erwachsenen in allen Bedingungen (gegen Slashes) signifikante bilaterale Aktivierungen in extrastriären Arealen (lingualer Gyrus, fusiformer Gyrus, IOG, BA17/18/19). Zudem können Aktivierungen in inferior frontalen (IFG, BA8/9/44-47, vorwiegend linksseitig) und parietalen (SPL, BA7/19/40) Regionen beobachtet werden. Erkennbar ist, dass sich die Aktivierung in extrastriären, parietalen und frontalen Regionen mit Zunahme der Aufgabenschwierigkeit steigern. Die Zunahme der Aktivierungen kann in beiden Gruppen beobachtet werden, wobei die Aktivierungen der Erwachsenen leicht stärker zu sein schienen (vgl. Anhang E).

Beim Vergleich der Bedingungen gegen die Buchstaben zeigen sich in beiden Gruppen bilaterale Aktivierungen in extrastriären (lingualer Gyrus, BA17/18/19), in parietalen (angularer und supramarginaler Gyrus, STG, MTG; BA7/39/40), in temporalen (MTG, Transvers. TG, STG, ITG; BA21/22/41/42) und in frontalen Regionen (IFG, MFG, SFG; BA4/6/8/9/44-47; vgl. Abb. 24).

Kinder mit LRS > Kontrollkinder



Kontrollkinder > Kinder mit LRS

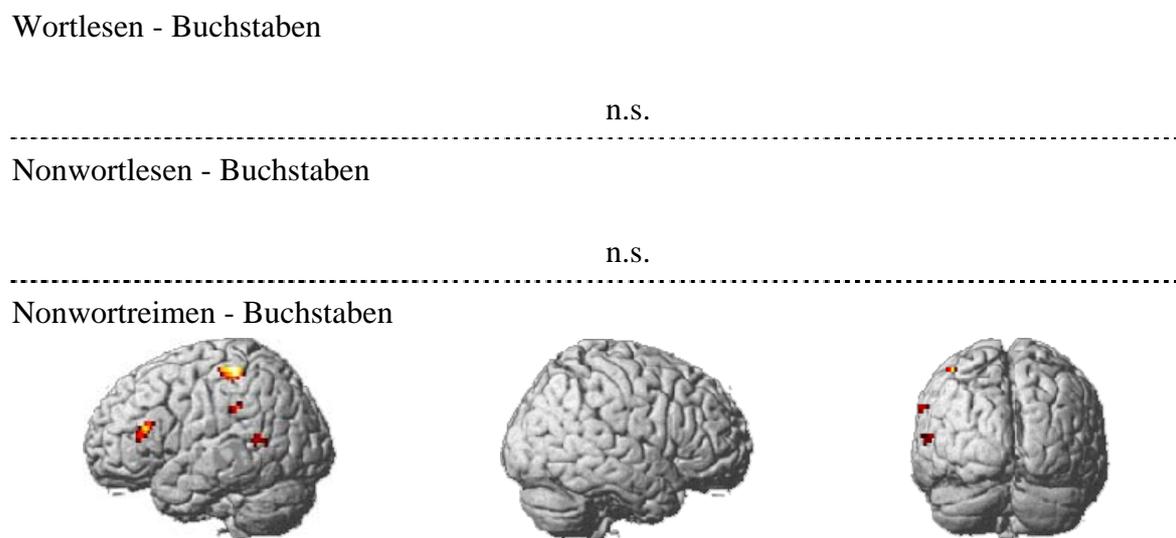
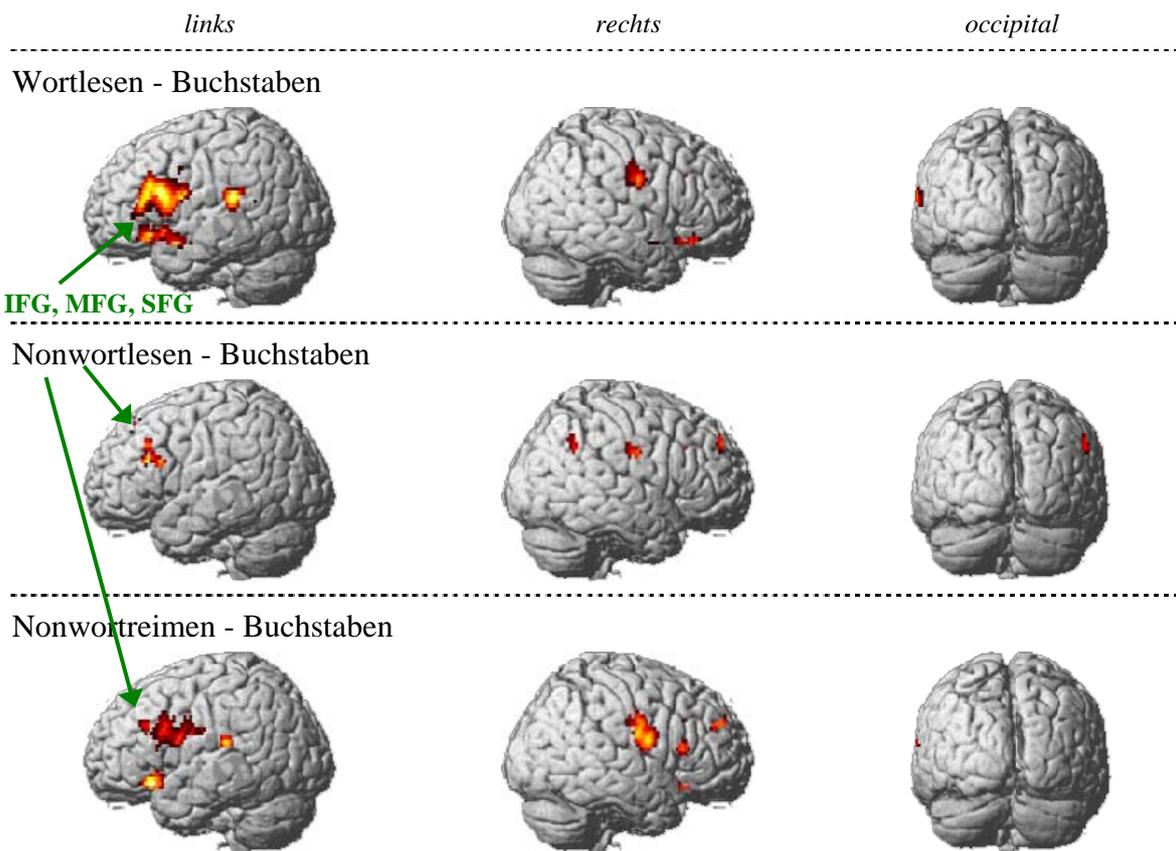


Abbildung 25: Gruppenunterschiede bei Kindern.

Jugendliche mit LRS > Kontrolljugendliche



Kontrolljugendliche > Jugendliche mit LRS

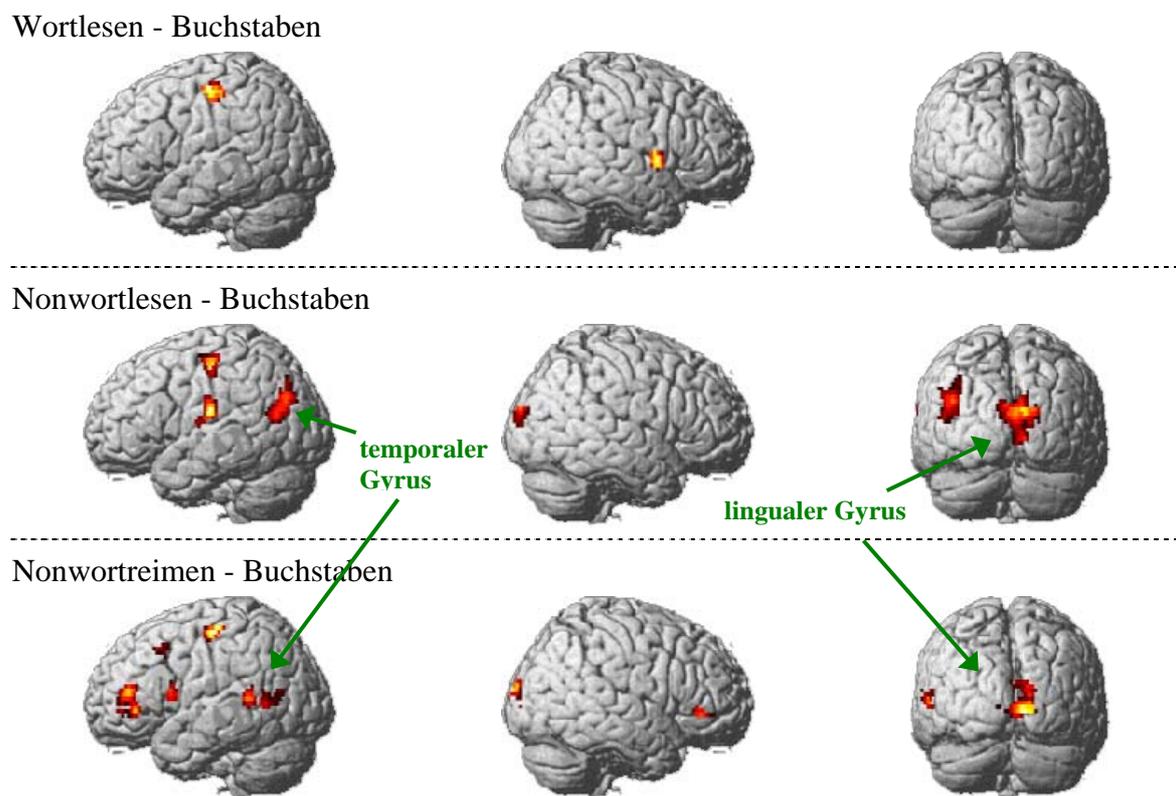
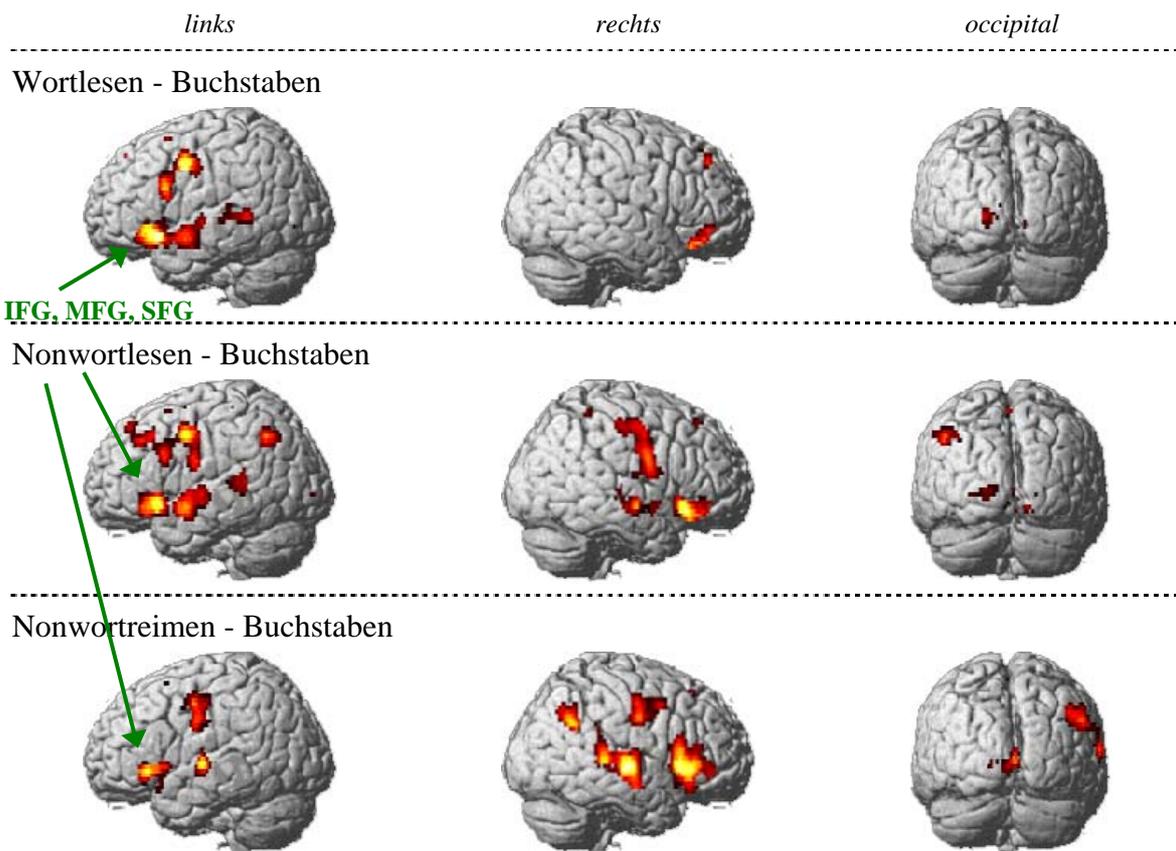


Abbildung 26: Gruppenunterschiede bei Jugendlichen

Erwachsene mit LRS > Kontrollerwachsene



Kontrollerwachsene > Erwachsene mit LRS

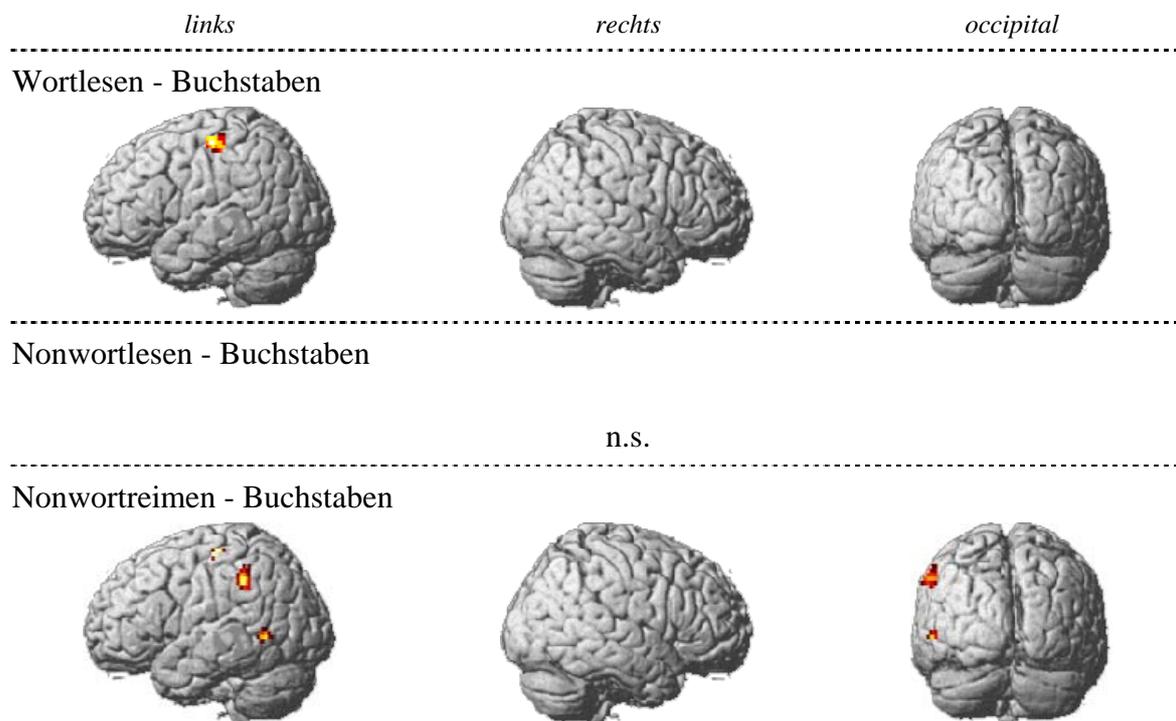


Abbildung 27: Gruppenunterschiede bei Erwachsenen.

Lokalisation der Aktivierungen (Gruppenunterschiede Kinder; vgl. Abb. 25)

Gruppenunterschiede zwischen LRS- und Kontrollkindern können in folgenden Regionen beobachtet werden. So zeigen Kinder mit LRS in allen Bedingungen eine Überaktivierung in frontalen Regionen (IFG, MFG, SFG; BA6/9/11/46/47). Beim Nonwortlesen und Nonwortreimen zeigt sich zudem eine Überaktivierung in parietalen Regionen (angularer Gyrus, IPL; BA39/40). Kontrollkinder zeigen nur beim Nonwortreimen eine Überaktivierung in parietalen (IPL, supramarginaler Gyrus; BA40), temporalen (MTG, BA21/22) und in mittleren frontalen Regionen (MFG; BA46).

Lokalisation der Aktivierungen (Gruppenunterschiede Jugendliche; vgl. Abb. 26)

Im Gruppenvergleich zeigt sich bei Jugendlichen mit LRS in allen Bedingungen eine ausgeprägte frontale Überaktivierung (IFG, MFG, MeFG, SFG; BA4/6/45-47). So kann beim Wortlesen zudem eine Überaktivierung in temporalen Regionen (STG, Trans. TG; BA38/41/42) beobachtet werden. Bei Kontrolljugendlichen zeigt sich bei allen Bedingungen eine parietale Überaktivierung (BA3/19/43). Beim Nonwortlesen und Nonwortreimen zeigt sich ebenso eine Überaktivierung in occipitalen (lingualer Gyrus, MTG, BA17/18/19) und temporalen Regionen (MTG, BA21/39). Beim Nonwortreimen kommt es im Vergleich zu den Daten der Kontrollkinder, zu einer Netzwerkaktivierung.

Lokalisation der Aktivierungen (Gruppenunterschiede Erwachsene; vgl. Abb. 27)

In der Gruppe der Erwachsenen zeigt sich eine deutliche Überaktivierung bei Probanden mit LRS. Diese Überaktivierung (höchster Peak) ist vorwiegend in frontalen Regionen (IFG, MFG, MeFG, SFG; BA 5/6/8/9/45/47) zu beobachten. Zudem kommt es zu Überaktivierungen in temporalen (MTG, STG; BA13/20/21/22/42), parietalen (IPL, supramarginaler Gyrus; BA7/39/40) und geringfügig auch in occipitalen Regionen (lingualer Gyrus; BA17/18/19). Bei Kontrollern zeigen sich nur beim Wortlesen und Nonwortreimen Überaktivierungen in parietalen (IPL, BA40) und temporalen Regionen (ITG; BA19).

Weiterführende Analyseschritte

Bei der Betrachtung der Gruppenunterschiede zwischen Probanden mit LRS und Kontrollen zeigt sich, dass die Aktivierungsunterschiede über die Altersstufen hinweg zunehmen. Prinzipiell zeigt sich für Probanden mit LRS beim Wortlesen, Nonwortlesen und Nonwortreimen eine Überaktivierung in frontalen Regionen. Demgegenüber zeigen sich bei Kontrollprobanden eher Überaktivierungen in temporo-parietalen Regionen. Es zeigt sich zudem, dass die Unterschiede (KG vs. LRS) im Kindes und Jugendalter regionaler begrenzt

sind auf Überaktivierungen in frontalen Regionen. Im Vergleich dazu zeigen sich im Erwachsenenalter neben frontalen auch temporale und parietale Überaktivierungen bei Probanden mit LRS. Da bereits auf der Ebene der Gruppenanalysen beobachtet werden konnte, dass Erwachsene deutlich stärkere Aktivierungen als Jugendliche und Kinder aufweisen, muss kritisch angemerkt werden, dass mit einem Signifikanzniveau von 0,05 vielleicht ein zu „weiches“ Kriterium gewählt wurde. Die maximalen Schwerpunkte der Aktivierung (maximaler statistischer Peak) liegen jedoch auch bei den Erwachsenen vorwiegend in frontalen Regionen. Vor diesem Hintergrund wurde das Signifikanzniveau für die Gruppenanalyse auf 0,01 erhöht, um die Unterschiede zwischen Probanden mit LRS und Kontrollprobanden (unabhängig vom Alter) besser herausarbeiten zu können. Zu besserer Verdeutlichung sind pro Altersgruppe alle Kontraste (gegen Buchstaben) jeweils in einem Bild zusammengefasst.

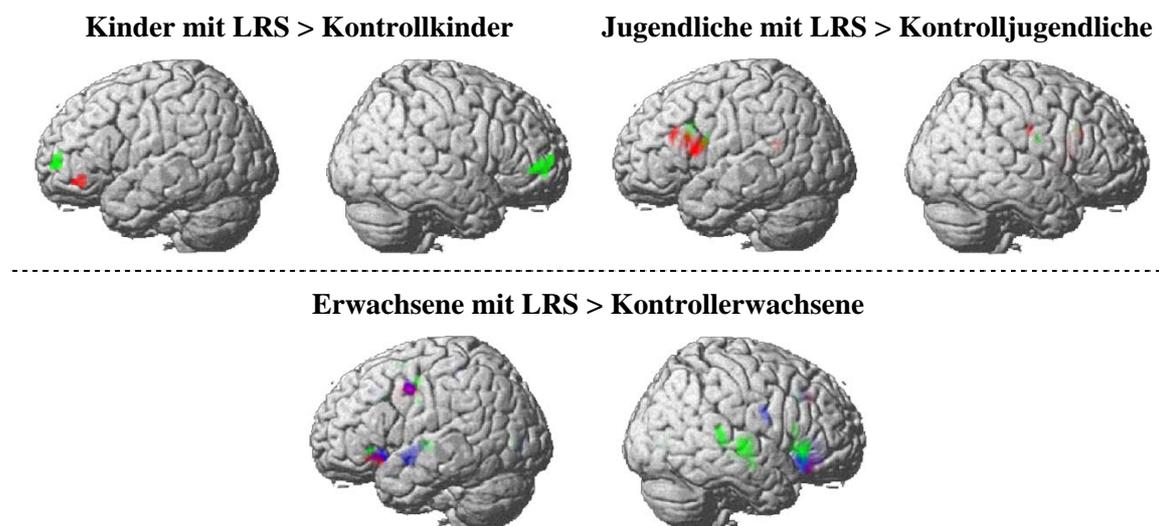


Abbildung 28: Gruppenunterschiede für Kinder, Jugendliche und Erwachsene (alle Kontraste gegen BS). rot – Wortlesen; blau – Nonwortlesen; grün – Nonwortreimen.

Insgesamt zeigt sich bei einem Signifikanzniveau von 0,01 bei den Kindern mit LRS eine frontale Überaktivierung (MFG; BA10/11) für Wortlesen und Nonwortreimen. Bei den Jugendlichen mit LRS eine Überaktivierung in frontalen (IFG, MFG; BA6/9/11/44) und in superior temporalen Regionen (STG; BA13). Bei den Erwachsenen zeigen sich Aktivierungen in frontalen (IFG, MFG, MeFG; BA6/8/47) und temporalen Regionen (STG, BA13/22/38). Somit kann selbst auf einem erhöhten statistischen Signifikanzniveau dargestellt werden, dass unabhängig vom Alter eine Überaktivierung bei phonologiebehafteten Stimuli in frontalen Regionen bei Probanden mit LRS zu beobachten ist.

6 Interpretation und Diskussion

6.1 Testdiagnostik

Die Ergebnisse der Testdiagnostik zeigen, dass sich die Gruppen mit und ohne LRS, gemäß den Einschlusskriterien (vgl. 4.2), hinsichtlich ihres nonverbalen IQ's nicht signifikant unterscheiden. Insgesamt liegen die Werte aller Gruppen im durchschnittlichen Bereich ($IQ > 100$). Obwohl die Konzentrationsleistung der LRS-Gruppe gegenüber den Leistungen der Kontrollprobanden signifikant vermindert ist, liegt sie in allen Altersgruppen im Normbereich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die in dieser Arbeit dargestellten Unterschiede auf neuropsychologischer- und neurophysiologischer Datenebene nicht auf unterschiedliche intellektuelle Fähigkeiten oder Konzentrationsleistungen zurückzuführen sind.

Entsprechend den Diagnostischen Kriterien (vgl. 2.2) erbringen die Probanden mit LRS in allen Altersgruppen beim Lesen und Rechtschreiben signifikant schlechtere Leistungen als die Kontrollprobanden. Die Rechtschreibleistung der Probanden mit LRS ist dabei in allen Gruppen deutlich unterdurchschnittlich. Da in allen Altersgruppen die Diskrepanz zwischen Rechtschreibleistung und kognitiver Leistung über 30 IQ-Punkte beträgt, liegt sie somit sogar noch über den in den Diagnostischen Kriterien geforderten zwei Standardabweichungen (vgl. 4.2). Für die Leseleistung ergibt sich das folgende Bild: in allen Gruppen (KG wie LRS) verbessert sich die Leseleistung (Fehler und Zeit) mit zunehmendem Alter, wobei in der LRS-Gruppe die Leistungsverbesserung deutlich größer ist. So erreichen die erwachsenen Probanden mit LRS zwar ein durchschnittliches Leseniveau, aber dennoch bleiben ihre Leistungen schlechter als die der Kontrollprobanden.

Hinsichtlich der Leseleistungen ist zu beachten, dass der eingesetzte Zürcher Lesetest nur eine Normierung bis zur sechsten Klasse aufweist, so dass zumindest bei den erwachsenen Probanden mit Deckeneffekten zu rechnen ist. Wahrscheinlich beträgt deshalb die Abweichung zwischen den erwachsenen Kontroll- und LRS-Probanden nur noch eine Standardabweichung, während sie bei Kindern und Jugendlichen mit LRS im Vergleich zu ihren gleichaltrigen Kontrollprobanden im Mittel noch ca. 1,5 Standardabweichungen beträgt.

6.2 Wortlisten

Unterschiedliche Sprachverarbeitungsprozesse

Die dargestellten Ergebnisse der Wortlisten spiegeln folgenden Trend wieder: Insgesamt ist eine Zunahme der Bearbeitungszeit vom Wortlesen (adressierte Ganzwortverarbeitung) zum Nonwortlesen und der Transformationsaufgabe (assemblierte Graphem-Phonem-Verarbeitung) zu beobachten. Dieser Anstieg ist unabhängig von Alter und Gruppe (LRS und KG) zu beobachten. Die größte Zunahme in der Bearbeitungszeit zeigt sich vom Wortlesen zum Nonwortlesen. Nonwortlesen und die Transformationsaufgabe scheinen in der Regel gleich schwer zu sein. Diese geschilderten Ergebnisse treffen im Wesentlichen auch auf die Bearbeitungsfehler zu. Somit scheint auf der Ebene der Wortlisten eine Trennung zwischen adressierter und assemblierter Verarbeitung sowohl bei Kontroll- wie auch LRS-Probanden möglich zu sein (Fragekomplex 3).

Phonologisches Defizit (LRS vs. KG)

Wimmer (1996) beschreibt, dass sich im deutschen Sprachraum das phonologische Defizit bei Aufgaben wie dem Nonwortlesen vor allem in den Reaktionszeiten und nicht in den Fehlerraten niederschlägt (im Unterschied zum englischen Sprachraum). Auf der Grundlage dieses Befundes sollen vorwiegend die Reaktionszeiten betrachtet werden. Ausgehend von der Annahme eines phonologischen Defizits bei der LRS (vgl. 2.6.1) wurde postuliert, dass Probanden mit LRS gleichermaßen beim Wort- als auch beim Nonwortlesen und der Transformationsaufgabe schlechtere Leistungen im Vergleich zu normallesenden Kontrollen erbringen (Fragekomplex 2).

Es zeigt sich, dass Probanden mit LRS bei allen drei Aufgaben (Wortlesen, Nonwortlesen, Transformation) längere Bearbeitungszeiten benötigen und mehr Fehler machen als Kontrollprobanden (Fragekomplex 1, 2). Obwohl sich die Leistungen der Probanden mit LRS mit zunehmendem Alter verbessern, sind die Leistungsunterschiede im Erwachsenenalter noch immer so groß, dass selbst die erwachsenen Probanden mit LRS beim Wortlesen hinsichtlich Fehler und Zeiten nicht einmal das Niveau der jugendlichen Kontrollgruppe erreichen. Beim Nonwortlesen und der Transformationsaufgabe, also den Aufgaben, die eine erhöhte Anforderung an die phonologische Dekodierfähigkeit stellen, sind ihre Leistungen sogar schlechter als die der (ca. 9-jährigen!!) Kontrollkinder (Fragekomplex 4).

Vor dem Hintergrund, dass zwar bereits auf der Ebene des Wortlesens (adressiert) Unterschiede bestehen, diese aber hinsichtlich Nonwortlesen und Worttransformation (assembliert) deutlich größer werden, könnten die vorliegenden Befunde für ein Defizit der as-

semblierten Verarbeitungsstrecke sprechen. Während sich also die adressierte Verarbeitung über das Alter hinweg dem der Normallesenden annähert, bleibt das Defizit bei der assemblierten Graphem-Phonem-Verarbeitung bestehen. Dieser Befund bestätigt somit Annahmen des Entwicklungsmodells der LRS nach Frith (1985, vgl. 2.5.2.2; Fragekomplex 3, 4).

Dass bei der LRS aber nicht nur die assemblierte Verarbeitung beeinträchtigt ist, zeigen die Befunde der Kinder und Jugendlichen mit LRS hinsichtlich der Leistungen beim Wortlesen: Sowohl auf der Ebene der Reaktionszeit wie auch der Fehler weisen sie schlechtere Leistungen als ihre altersangepasste Kontrollgruppe auf. Dies könnte dafür sprechen, dass auch das interne Lexikon („Sichtvokabular“; vgl. 2.5.2.1) noch nicht so weit ausgereift ist, wie es ihrem Alter angemessen wäre (vgl. Frith, 1985; Wimmer, 1996). Dieser Befund wird auch von Jorm und Share (1983) gestützt, die nachwiesen, dass bei einem Teil der Kinder mit Leseschwierigkeiten Defizite auf der adressierten Strecke zu verzeichnen waren und Wörter von diesen Kindern ausschließlich auf indirektlexikalischem Weg erlesen wurden. Vor diesem Hintergrund, kann man annehmen, dass die längeren Reaktionszeiten und die höheren Fehlerraten der Kinder dadurch bedingt sind, dass sie auf die buchstabierende Lesestrategie zurückgreifen. Die Beobachtung, dass Zeit und Fehler zur Bearbeitung der Wörter im Jugendalter und besonders im Erwachsenenalter abnehmen, scheint mit der Aussage von Frith (1985) übereinzustimmen, die beschreibt, dass dieses interne „Sichtvokabular“ im Laufe der Entwicklung vergrößert wird und somit automatisiertere Leseprozesse mit steigendem Alter möglich sind.

6.3 ERTS

Unterschiedliche Sprachverarbeitungsprozesse

In einem ersten Schritt (Fragekomplex 1) sollte überprüft werden, inwieweit sich die angenommene unterschiedlichen Sprachverarbeitungsprozesse („Hierarchie des Paradigmas“; HFL→NWL→NWR) neuropsychologisch bei Probanden mit und ohne LRS nachweisen lässt. Die ERTS-Daten belegen, dass innerhalb der Hierarchie des Paradigmas Kontrollprobanden und Probanden mit LRS die Aufgaben mit erhöhter phonologischer Anforderung (NWL, NWR) langsamer und mit mehr Fehlern lösen als Aufgaben mit geringerem phonologischen Gehalt (WL). Insgesamt kann somit für die Reaktionszeit die Hierarchie des Paradigmas hinsichtlich der phonologischen Verarbeitungsprozesse (WL→NWL→NWR) bestätigt werden. Dies gilt in allen Altersstufen sowohl für die Kontrollprobanden als auch für die Probanden mit LRS (Fragekomplex 1, 4).

Hinsichtlich der Stimulationsbedingung der Buchstaben ist anzumerken, dass sie nicht konform zu den hierarchischen Annahmen des Paradigmas ist. Die Leistungen aller Gruppen brechen hierbei hinsichtlich Zeit wie auch Fehlern aus dem fast linearen Anstieg der Leistungen aus. Es ist anzunehmen, dass die Aufgabenschwierigkeit dieser Bedingung höher war als angenommen. Laut Huber et al. (2000) könnte dies dadurch bedingt sein, dass Aufgaben mit Buchstaben eine rein visuell-orthografische Informationsverarbeitung anregen, in der keine kognitiven sprachlichen Komponenten (wie beim WL, NWL und NWR) beinhaltet sind.

Phonologisches Defizit (LRS vs. KG)

Basierend auf der Grundannahme eines phonologischen Defizits bei Probanden mit LRS (Fragekomplex 2) sollte untersucht werden, welcher Bereich der phonologischen Wortverarbeitung (WL, NL, NWR) bei Probanden mit LRS im Vergleich zu normallesenden Probanden besonders beeinträchtigt ist.

Es zeigt sich, dass bis auf die Kontrollbedingung (Musterabgleich) alle Aufgaben von allen Probanden mit LRS langsamer und mit mehr Fehlern bearbeitet werden als von der Kontrollgruppe. Somit lässt sich bestätigen, dass auf der Ebene der basalen visuellen Musterverarbeitung keinerlei Leistungsdefizite festzustellen sind. Zudem zeigen sich hypothesenkongform signifikante Leistungsunterschiede zwischen Probanden mit LRS und Kontrollen bei allen phonologiebehafteten Aufgaben. Wie Abbildungen 19 und 20 zeigen, werden dabei mit steigender phonologischer Anforderung innerhalb der Hierarchie des Paradigmas (HFL→NWL→NWR) die Leistungsunterschiede (Reaktionszeit und Fehler) immer größer. Dies bedeutet, dass auf der Ebene der ERTS-Daten das Vorliegen des phonologischen Defizits analog zu den Wortlisten bestätigt werden kann.

6.4 fMRI

Entsprechend den Vorüberlegungen für eine fMRI-Untersuchung im Blockdesign (vgl. 4.1.3) zeigen sich hinsichtlich der Baselinebedingung (Slashes) in keiner der Altersgruppen signifikante Unterschiede zwischen Probanden mit LRS und Kontrollprobanden. Somit kann der Slashpaarabgleich als geeignete Kontrollbedingung (Ruhebedingung) für die fMRI-Analysen angesehen und zur statistischen Modulierung herangezogen werden.

6.4.1 Allgemeine Aussagen

Wie bereits beschrieben (2.5.3) entwickelten Pugh et al. (1996) ein hierarchisches Subtraktionsparadigma um Gehirnregionen zu isolieren, die bei orthografischen und phonologischen Prozessen eine Rolle spielen. Pugh et al. (1996) beschreiben, dass bei derartigen Subtraktionsparadigmen die Vergleiche gegen einen visuellen Musterabgleich (Slashes) vorwiegend visuell-orthografische Aktivierungsaspekte herauspartialisieren. Erst der Kontrast einer orthografischen Stimulationsbedingung gegen phonologiebehaftetes Stimulusmaterial ermöglichen die Herauspartialisierung von phonologischen Verarbeitungsprozessen. Diesbezüglich soll zunächst in einem kurzen Überblick die Befundlage hinsichtlich des Kontrastes gegen die visuelle Stimulationsbedingung (Slashes) dargestellt werden und im Anschluss daran die Befundlage hinsichtlich des Kontrastes der Stimulationsbedingungen gegen die orthografische Bedingung der Buchstaben.

Allgemeine Beobachtungen zu Aktivierungen gegen Slashes

Bei der Betrachtung der Aktivierungsmuster aller Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen mit und ohne LRS fallen beim Kontrast gegen Slashes in allen Bedingungen bilaterale Aktivierungen in extrastriären Regionen auf (lingualer und fusiformer Gyrus; BA17/18/19). Generell scheinen somit beim Vergleich gegen Slashes vorwiegend visuelle (orthografische) Aspekte im Vordergrund zu stehen (Posner et al., 1999; Pugh et al., 1996). Diese extrastriären Aktivierungen werden in vielen hirnfunktionellen Studien an Erwachsenen vor allem mit stillem Lesen von Wörtern oder Buchstaben (-ketten) assoziiert und als Hinweis auf eine visuelle Wortform beschrieben (vgl. 2.5.3; Petersen et al., 1990; Posner et al., 1999). Nach Gutbrod (2000) repräsentieren die extrastriären Regionen die grundlegende visuelle Verarbeitung der Buchstaben, während inferior frontale Regionen für die Verarbeitung bzw. Übersetzung vom Orthografischen zum Phonologischen wichtig zu sein scheinen.

Allgemeine Beobachtungen zu Aktivierungen gegen Buchstaben

Sowie man die Aktivierungsmuster für den Kontrast gegen Buchstaben betrachtet zeigen sich in allen Gruppen ausgeprägte bilaterale Aktivierungen in frontalen (IFG, BA44-47) und temporo-parietalen Regionen (angularer und supramarginaler Gyrus, STG; BA21/22/39/40). Somit scheinen hierbei vorwiegend phonologische Aspekte im Vordergrund zu stehen (vgl. Pugh et al., 1996).

Die frontale Aktivierung (BA44-47) spricht für eine starke Beteiligung phonologischer Prozesse an der Verarbeitung von Wörtern und Nonwörtern. Diese Region wurde vorwiegend mit Aufgaben zum Nonwortlesen und Nonwortreimen (Sergent et al., 1992, Paulesu et al., 1993, Shaywitz et al., 1995) sowie phonetischen Entscheidungen (Demonet et al., 1992, 1994) in Verbindung gebracht. Somit kann diese frontale Aktivierung mit der Verarbeitung phonologischer Kodierungen bei lexikalischen Identifikationen assoziiert werden (Brunswick et al., 1999). Die temporo-parietalen Aktivierungen können erst beim Kontrast gegen Buchstaben beobachtet werden. Gerade die temporo-parietalen Regionen scheinen also erst recht Ausdruck einer phonologischen Aktivierung zu sein (Pugh et al., 1996). Insgesamt werden diese Aktivierungen mit der Verarbeitung von Wörtern und somit mit der Analyse von orthografischen, phonologischen und lexikalisch-semantischen Dimensionen assoziiert (Pugh et al., 2000a).

Vor dem Hintergrund, dass das Ziel der vorliegenden Arbeit die Untersuchung von phonologischen Verarbeitungsmechanismen an sich sowie der Aufklärung eines eventuellen phonologischen Defizits auf neurobiologischer Ebene ist, sollten die oben beschriebenen Befunde verdeutlichen, warum im Folgenden vorwiegend Kontraste gegen Buchstaben und nicht nur gegen die ursprünglich konzipierte Kontrollbedingung der Slashes dargestellt werden.

6.4.2 Unterschiedliche Sprachverarbeitungsprozesse

Zusammenfassung der Gruppenanalysen für alle Kinder, Jugendliche und Erwachsene

Betrachtet man in Abbildung 22 die Aktivierungsmuster der Kinder, so kann Folgendes beobachtet werden: Die Kontrastanalyse der Bedingungen Wortlesen, Nonwortlesen und Nonwortreimen gegen Slashes für die Kindergruppe zeigen keine Aktivierungsunterschiede hinsichtlich dieser drei Stimulationsbedingungen. Erst der Kontrast gegen die Buchstaben, der stärker phonologische Verarbeitung anspricht (Pugh et al., 1996), zeigt Aktivierungen in temporo-parietalen und inferior frontalen Arealen. Vor dem Hintergrund dieses Kontrastes kann man die Aussage ableiten, dass bei Kindern die Aufgabe mit der höchsten

phonologischen Anforderung (NWR) zu den stärksten Aktivierungen (frontal, IFG) führt. Wie dabei aus den Aktivierungsbildern der Kindergruppe ersichtlich wird, scheint sich für Kinder mit LRS bei den phonologiebehafteten Aufgaben (WL, NWL und NWR gegen Buchstaben) eine tendenzielle frontale Überaktivierung zu zeigen. Dies stimmt mit einer Vielzahl von Studien überein (Salmelin et al., 1996, Rumsey et al., 1997, Shaywitz et al., 1998, Brunswick et al., 1999, Pugh et al., 2000a).

In der Gruppe der Jugendlichen sind beim Kontrast gegen die Slashes vorwiegend extra-striatäre Aktivierungen zu beobachten. Insbesondere sind diese Aktivierungsmuster bei den jugendlichen Kontrollprobanden zu beobachten. Dies könnte ein erster Hinweis darauf sein, dass normallesende Jugendliche ein neurofunktionelles Korrelat für das Erkennen visueller Wortformen aufweisen. Insgesamt kann in der Gruppe der Jugendlichen beobachtet werden, dass, vergleichbar zu der Kindergruppe, ausgeprägte Aktivierungen erst beim Kontrast gegen Buchstaben beobachtbar sind. Dabei sind ebenso für die Jugendlichen hinsichtlich des Nonwortreimens die stärksten Aktivierung in frontalen Regionen zu beobachten. Im Vergleich zu der („biologisch unausgereifteren“) Kindergruppe kann die Formation der Aktivierungscluster bereits im Sinne von Netzwerkaktivitäten interpretiert werden. Dies könnte darauf hindeuten, dass bereits im Jugendalter die Sprachverarbeitung über räumlich weit verzweigte Netzwerke organisiert ist.

In der Gruppe der Erwachsenen scheinen visuell sehr ähnliche Aktivierungsmuster bei Probanden mit LRS und Kontrollen vorzuliegen. Insgesamt sind die Lokalisationen der Aktivierungen bei Erwachsenen vergleichbar mit denen der Jugendlichen und unterscheiden sich nur in ihrer Intensität.

Lässt man die Buchstaben aufgrund ihrer Sonderrolle, die bereits auf neuropsychologischer Ebene dargestellt wurde, außer Acht, kann man unterschiedliche Sprachverarbeitungsprozesse (Hierarchie des Paradigmas; Fragekomplex 1) in allen Gruppen auf der Ebene der fMRI-Daten bestätigen. So sind unabhängig vom Alter und der Gruppenzugehörigkeit die Aktivierungen beim Wortlesen und Nonwortlesen (gegen Slashes und gegen Buchstaben) geringer als beim Nonwortreimen. Die Aufgabe mit der höchsten phonologischen Anforderung (NWR) führt in allen Gruppen zur stärksten Aktivierung. Diesbezüglich können für das Nonwortreimen in allen Altersstufen sowohl bei Kontrollen als auch bei Probanden mit LRS vorwiegend Aktivierungen in linken frontalen Regionen (Broca, BA44-47) beobachtet werden.

Demonet und Thierry (2001), die im Rahmen ihrer Studie auf die Stimulation mit Wörtern und Nonwörtern ebenfalls Aktivierungen im Broca-Areal beobachteten, interpretieren dies im Sinne eines innerlichen „Abrufprozesses“. Diesbezüglich beschreiben sie, dass mit dem Grad der Unbekanntheit des Wortmaterials die Aufgabenschwierigkeit ansteigt. Die daraus resultierende Verlängerung des innerlichen „Abrufprozesses“ soll mit der Intensität der Aktivierungen korrelieren. Laut Price et al. (1994) spielt das Broca-Areal neben diesem Abrufprozess zudem bei der Übersetzung des orthografischen in den phonologischen Code eine wesentliche Rolle. Somit kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass die in der vorliegenden Studie beobachteten Aktivierungen in frontalen Regionen im Sinne eines „Abruf“- und „Übersetzungsprozesses“ interpretiert werden können.

6.4.3 Phonologisches Defizit

Zusammenfassung der Gruppenunterschiede für alle Kinder, Jugendliche und Erwachsene

Betrachtet man die Aktivierungsunterschiede zwischen Probanden mit und ohne LRS (vgl. Abbildungen 25, 26 & 27), so können im Überblick für das Wortlesen, Nonwortlesen und Nonwortreimen folgende Aktivierungsmuster beschrieben werden: Kinder, Jugendliche und Erwachsene mit LRS zeigen eine Überaktivierung in frontalen Regionen (IFG, MFG, SFG; BA6/9/11/46/47), wohingegen Kontrollprobanden in allen Altersstufen eine tendenzielle Überaktivierung in temporo-parietalen Regionen (IPL, MTG, supramarginaler Gyri; BA21/22/40) zeigen.

Der Haupteffekt einer frontalen Überaktivierung bei Probanden mit LRS ist konform mit Befunden des aktuellen internationalen Forschungsstandes. In vielen Forschungsstudien wird die beobachtete Aktivierung in frontalen Regionen als Anzeichen einer defizitären Wortverarbeitung bei Probanden mit LRS im Vergleich zu Normallesenden interpretiert (vgl. 2.6.3 und 2.7). So wurde eine Überaktivierung dieser frontalen Regionen bei Probanden mit LRS in einer Vielzahl von Studien dargestellt (vgl. 2.6.3). Dabei wird diese Überaktivierung im Sinne einer „Kompensation“ diskutiert (*Kompensationshypothese*; Pugh et al., 1996, 2000a; Salmelin et al., 1996; Rumsey et al., 1997; Shaywitz et al., 1998; Brunswick et al., 1999), d.h. dass in dieser Region posteriore (temporo-parietale) Defizite kompensiert werden. Vor dem Hintergrund, dass diese Studien die Überaktivierung in einer Erwachsenen Stichprobe beschrieben, ist die vorliegende Arbeit die Erste, die diesen Befund bereits für das Kindes- und Jugendalter bestätigen kann.

Andere Arbeitsgruppen wie Paulesu et al. (1996) führen die fehlenden temporo-parietalen Aktivierungen der Probanden mit LRS auf gestörte Konnektionen zwischen anterioren und

posterioren sprachverarbeitenden Regionen zurück (*Diskonnektionshypothese*). Dieser Befund muss anhand der vorliegenden Daten eher kritisch diskutiert werden. Insgesamt kann eher von einer „Verschiebung“ der Aktivierungsschwerpunkte bei Probanden mit LRS in frontale Regionen gesprochen werden jedoch nicht von einer gestörten oder sogar fehlenden temporo-parietalen Aktivierung, da in der Gruppenanalyse die Probanden mit LRS ebenso temporo-parietale Regionen aktiviert wurden. Die Daten lassen sich eher mit Befunden von Pugh et al. (2000a) vergleichen.

Die in dieser vorliegenden Arbeit dargestellten fMRI-Ergebnisse bestätigen lokalisatorische Annahmen über signifikante Aktivierungen in extrastriären, temporo-parietalen und inferior frontalen Regionen hinsichtlich der drei wortspezifischen Stimulationsbedingungen (WL, NWL, NWR). Diese Aktivierungsmuster stimmen mit Befunden von Pugh et al. (1996, 2000a) überein, die annehmen, dass es bei visuell präsentierten Wörtern und Nonwörtern zu Aktivierungen in diesen drei spezifischen Netzwerken kommt. Ihrer Meinung nach äußert sich das Defizit der LRS in einer unterschiedlichen Nutzung dieser Netzwerke. In den Gruppenanalysen kann gezeigt werden, dass auch Probanden mit LRS temporo-parietale Regionen aktivieren. Diese werden jedoch geringer aktiviert als dies bei Kontrollprobanden der Fall ist. Die Befunde sprechen dafür, dass Probanden mit LRS temporo-parietalen Regionen nur marginal aktivieren. Dies könnte daran liegen, dass im Vergleich zu Kontrollprobanden dort die Aktivierungen nicht so ausgeprägt sind. Um diese „Unterentwicklung“ zu kompensieren werden zusätzlich frontale Regionen aktiviert.

So belegen die dargestellten Ergebnisse eher, dass auch bei Probanden mit LRS die Funktionalität der einzelnen Strukturen nicht gestört (Aktivierungen beim WL, NWL und NWR in extrastriären, temporo-parietalen und frontalen Regionen), sondern dass eher die „Abstimmung“ bzw. die „Schwerpunkte“ der Funktionen verschiedener sprachverarbeitender Hirnregionen betroffen zu sein scheint. Zusammenfassend ist die Annahme eines gestörten Zusammenspiels (Netzwerks, vgl. Pugh et al., 2000a) anteriorer, dorsaler und ventraler sprachverarbeitender Systeme durch die dargestellten Ergebnisse bei Probanden mit LRS aller Altersstufen nachweisbar. Insgesamt kann somit auf der Ebene der fMRI-Daten die Hypothese eines phonologischen Defizits bei LRS-Probanden in allen Altersgruppen als belegt betrachtet werden. Das phonologische Defizit scheint sich auf hirnfunktioneller Ebene bei Probanden mit LRS (unabhängig vom Alter) in einer frontalen Überaktivierung und einer tendenziellen temporo-parietalen Minderaktivierung (bzw. Überaktivierung der Kontrollprobanden) widerzuspiegeln.

6.4.4 Lesestrategien (adressiert vs. assembliert)

Die Frage, inwieweit adressierte (Wortlesen) und assemblierte Verarbeitung (Nonwortlesen, Nonwortreimen) auf der Ebene der fMRI-Daten differenzierbar sind, ist nicht einfach zu beantworten (Fragekomplex 3).

Betrachtet man die fMRI-Ergebnisse bei Kindern mit und ohne LRS, so zeigt sich, dass Wortlesen, Nonwortlesen und Nonwortreimen gegen Slashes in beiden Gruppen vorwiegend zu geringen extrastriären Aktivierungen führen. Somit kann auf der Basis des Kontrastes gegen Slashes keine Differenzierung zwischen verschiedenen Lesestrategien abgebildet werden. Der Kontrast gegen Buchstaben zeigt, dass sich sowohl bei der LRS-Kindergruppe und innerhalb der KG-Kindergruppe die Aktivierungen beim Wortlesens und Nonwortlesens nicht unterscheiden. Nonwortreimen führt hingegen in beiden Gruppen zu ausgeprägten frontalen Aktivierungen. In der Gruppe der Jugendlichen scheint das Wortlesen, Nonwortlesen und Nonwortreimen gegen Slashes in beiden Gruppen (mit und ohne LRS) in den selben Arealen lokalisiert zu sein. Wiederum ist beim Wortlesen, Nonwortlesen und Nonwortreimen gegen Buchstaben in beiden Gruppen eine starke frontale Aktivierung zu beobachten. Auffallend ist jedoch, dass in der Gruppe der Kontrolljugendlichen das lokale Maximum (die Voxel, die in der T-Statistik die höchste Signifikanz zeigen) beim Wortlesen und Nonwortlesen gegen Buchstaben in temporo-parietalen Regionen liegt. In der Gruppe der Jugendlichen mit LRS liegt das lokale Maximum in allen Vergleichen in frontalen Regionen. Bei Erwachsenen zeigt sich wiederum ein analoges Bild wie in der Gruppe der Jugendlichen.

Da Kontrollprobanden den Schwerpunkt der Aktivierung eher in temporo-parietalen Regionen aufweisen, Probanden mit LRS hingegen eher in frontalen Regionen, könnte dies ein Ausdruck dahingehend sein, dass in Abhängigkeit von der Gruppenzugehörigkeit unterschiedliche Strategien zum Einsatz kommen. Insbesondere zeigt sich dies in frontalen Regionen, also in Regionen, die vorrangig mit assemblierten phonologischen Verarbeitungsstrategien in Verbindung gebracht werden (Paulesu et al., 1993; Demonet et al., 1994; Pugh et al., 1996, 2000a; Price et al., 1997). Insgesamt kann jedoch beobachtet werden, dass für alle Gruppen zwischen Wortlesen und Nonwortlesen nicht differenziert werden kann. Hinsichtlich des Nonwortreimens zeigt sich, dass die Aktivierungen jeweils stärker beim Wortlesen und Nonwortlesen ausgeprägt sind. Dies stimmt mit Beobachtungen aus der eigenen Arbeitsgruppe überein (vgl. Georgiewa et al., 1999, 2002). Zudem konnten, in dieser vorliegenden Arbeit nicht nur beim Nonwortlesen und Nonwortreimen,

sondern auch beim Wortlesen Unterschiede zwischen Probanden mit und ohne LRS nachgewiesen werden.

Vor diesem Hintergrund scheinen zwei zusammenfassende Schlussfolgerungen möglich: Zum einen, dass es auf der Ebene der fMRI-Daten nicht möglich ist zwischen adressierter und assemblierter Verarbeitung zu differenzieren. Dies würde bedeuten, dass Befunde aus dem englischen Sprachraum, die eine Trennung zwischen adressierter und assemblierter Verarbeitung annehmen, nicht auf den deutschen Sprachraum übertragbar sind. Dies kann auch durch die Untersuchungen von Paulesu et al. (2000, 2001) begründet werden. Die Autoren beschreiben, dass sich die Graphem-Phonem-Zuordnungsregeln zwischen verschiedenen Ländern unterscheiden und somit eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem englischen Sprachraum nicht ohne weiteres auf den deutschen Sprachraum möglich ist. Für den deutschen Sprachraum könnte dies bedeuten, dass die adressierte Verarbeitung weniger benötigt oder benutzt wird. Fiebach et al. (2002) fanden jedoch Hinweise für unterschiedliche funktionelle Beiträge verschiedener Gehirnregionen für den Zugriff auf das mentale Lexikon. Somit kann geschlussfolgert werden, dass weitere spezifische Untersuchungen nötig sind, um den Nachweis und die Übertragbarkeit der verschiedenen Lesemodelle auf den deutschen Sprachraum zu überprüfen.

Zum anderen muss man sich von der Hypothese eines vorangigen Defizits bei der assemblierten phonologischen Verarbeitung distanzieren.

6.4.5 Korrelation von fMRI- und Leistungsdaten

Ein vorrangiges Ziel von fMRI-Studien ist eine Lokalisation von Hirnfunktionen einer Population bzw. eine Lokalisation von Unterschieden in der Hirnfunktion zwischen verschiedenen Populationen. (Unter Hirnfunktion wird hier z.B. die phonologische Komponente der Sprachverarbeitung verstanden). Die Vorgehensweise besteht darin, ein fMRI Antwortsignal auszuwerten, welches im Prinzip nach dem Ort des Entstehens und nach der generierenden Bedingung (Aufgabe im fMRI-Experiment) differenziert werden kann. Ein potenzielles Problem bei der Interpretation von fMRI-Ergebnissen besteht jedoch darin, dass das gemessene fMRI-Antwortsignal nicht unbedingt ausschließlich die Verarbeitung der Stimuli, und damit die entsprechende Hirnfunktion, erklärt. D.h., man kann nicht ausschließen, dass Anteile am Signal auf den Einfluss von Parametern zurückzuführen sind, welche von der eigentlichen Hirnfunktion mehr oder weniger unabhängig sind.

Insbesondere wird diskutiert, dass eine rechnerisch erhaltene „Aktivierung“ nicht zwangsläufig als funktionelle Hirnaktivität interpretiert werden kann, sondern ggf. als einen erhöhten „Aufwand“ („Effort“) des Probanden bei dem Versuch, die gewünschte Hirnfunktion zu aktivieren. Die bekannten Schwierigkeiten der LRS-Probanden in der Bearbeitung von Stimuli mit phonologischer Anforderung geben Anlass zur Vermutung, dass in LRS-Studien, falls möglich, zwischen funktioneller Hirnaktivität und Hirnaktivität im Sinne von „Aufwand“ unterschieden werden sollte.

Nachfolgend wird das Problem an einem Beispiel behandelt (Unterschiede in den fMRI-Ergebnissen zwischen LRS- und Kontrollgruppen für die Bedingung Wortlesen, vgl. Abb. 29). Zunächst ist es erforderlich, das Merkmal „Aufwand“ zu quantifizieren. Nach eigenen Recherchen ist der Begriff „Aufwand“ im Zusammenhang mit fMRI-Studien in der Literatur nicht klar definiert. Als eine Möglichkeit für die vorliegende Arbeit bietet sich das Merkmal Reaktionszeit an. D.h., benötigt der Proband zur erfolgreichen Lösung einer Aufgabe (hier Wortlesen) eine längere Bearbeitungszeit, so kann man dies als einen erhöhten Aufwand betrachten (im Sinne einer extensiveren Form der Bearbeitung; andere Interpretationen des Aufwandsbegriffs bleiben hierbei unberührt).

Zur Aufklärung der Varianz im fMRI-Signal in Bezug auf funktionelle Hirnaktivität und „Aufwand“ bietet das SPM-Konzept das allgemeine lineare Modell an. Das hier verwendete Modell mit einer Kovariate beschreibt die Korrelation zwischen statistischen Parametern (t-Test, Kontrast Wortlesen) und den Reaktionszeiten über die ausgewählten Probanden bzw. Probandengruppen. Das angepasste Modell ermöglicht es dann, eine statistische Parameterkarte für (den Kontrast Wortlesen) ohne Berücksichtigung der Korrelation zwischen Parameter und Reaktionszeit zu betrachten. Dies kann man als ein Darstellung von Hirnaktivität auffassen, die um den Einfluss des Merkmals Reaktionszeit bzw. „Aufwand“ bereinigt wurde.

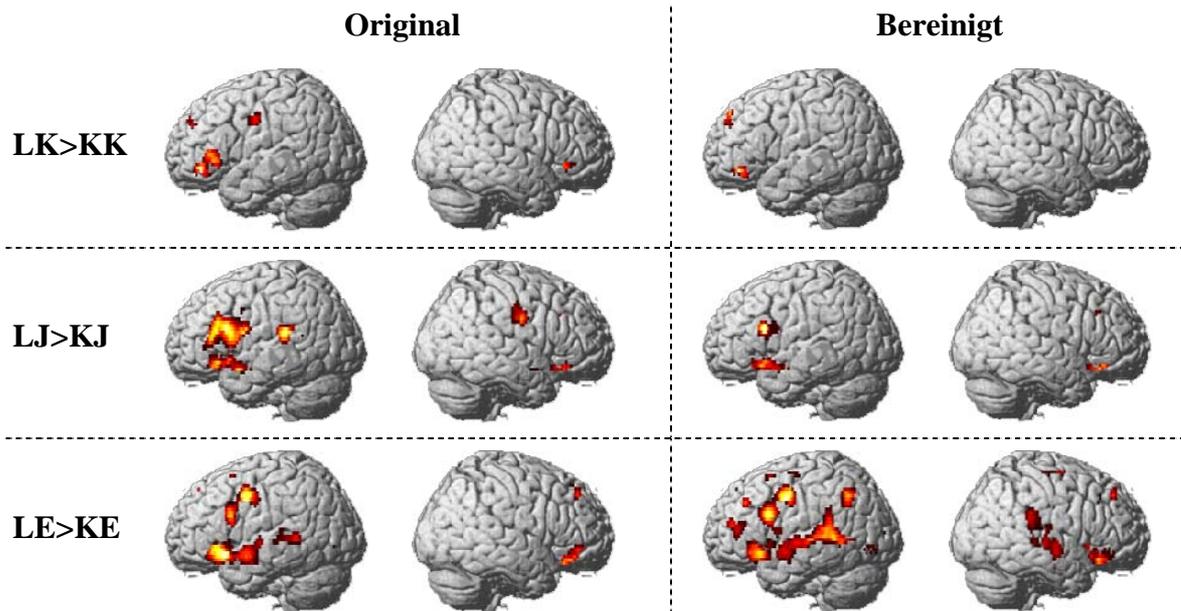


Abbildung 29: Kovariate „Reaktionszeit“ für die Überaktivierung der Probanden mit LRS beim Wortlesen (vs. Buchstaben). Die Überaktivierung bei Probanden mit LRS wird gegen die als „bereinigt“ dargestellte Bedingung gegenübergestellt. Rechts sind die Aktivierungen dargestellt, in denen die unterschiedlichen Reaktionszeiten keinen Einfluss mehr haben.

Die Einführung einer Kovariate zeigt folgende Wirkung. In der „bereinigten“ Aktivierung (vgl. Abbildung 29, rechts) kann beobachtet werden, dass sich bei den Kindern und Jugendlichen die Überaktivierung in den frontalen Regionen reduziert. Insgesamt bleibt jedoch eine frontale Überaktivierung bestehen. Bei den Erwachsenen tritt ein entgegengesetzter Effekt auf. Hierbei wird die Aktivierung noch verstärkt. Dies deutet darauf hin, dass durch die Kovariate die Varianz innerhalb der einzelnen Gruppen besser aufgeklärt werden konnte.

Insgesamt können diese Befunde in die folgende Richtung interpretiert werden:

1. Die Daten deuten auf ein phonologisches Defizit bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen Probanden mit LRS sowohl auf neuropsychologischer (Wortlisten, ERTS-Daten) wie auch auf hirnfunktioneller Ebene hin.
2. Dieses Defizit scheint sich dabei bei allen Probanden mit LRS (unabhängig vom Alter) in einer frontalen Überaktivierung widerzuspiegeln.
3. Diese frontale Überaktivierung scheint dabei aber nicht nur durch den Einfluss des phonologischen Defizits moduliert zu werden. Bis zu einem gewissen Grad scheint Sie auch ein Maß für einen gesteigerten Arbeitsaufwand (Effort) zu sein. Dafür, dass die Ergebnisse auf einen derartigen interaktiven Effekt von phonologischem Defizit und „Aufwand“ (Effort) hindeuten, sprechen vor allem die Daten der Erwachsenen, da hier trotz minimalerem „Effort“, ausgedrückt über die kürzeren Reaktionszeiten, die bereinigten Daten eine noch stärkere frontale Überaktivierung aufweisen.

Generell muss angemerkt werden, dass noch andere Merkmale als Kovariate in Frage kämen (z.B. Fehlerrate), wobei diese Merkmale teilweise miteinander korreliert sind und im hier gewählten Beispiel die Reaktionszeit den größten Einfluss besaß. Zusätzlich wirft die gleichzeitige Modellierung mehrerer bzw. korrelierter Kovariaten mit den im SPM99 verfügbaren Verfahren noch ungelöste Probleme auf (vgl. Andrade et al., 1999). Deswegen wurde hier darauf verzichtet weitere Kovariaten einzufügen.

Die Einbeziehung der Kovariate ist interpretatorisch jedoch nicht unumstritten und sollte mit gebotener Vorsicht betrachtet werden: Um nicht den Aufwand (Effort) bei der Aufgabenbearbeitung bei Probanden mit und ohne LRS, sondern den „eigentlichen“ Sprachverarbeitungsprozess zu messen, wurde - wie bereits in 4.1.3 beschrieben - eine flexible Darbietung gewählt. Jeder Proband hatte also die Möglichkeit in seinem eigenen Tempo die Entscheidungsaufgabe zu bearbeiten. Somit sind die längeren Reaktionszeiten also eigentlich nicht als konfundierende „Effort-Variable“ zu sehen, sondern als (beabsichtigt eingesetztes) Mittel, um das Ausmaß des Bearbeitungsaufwandes zumindest annähernd gleich zu halten. Somit besteht also die Frage, ob man nun vor diesem Hintergrund über eine Kovariate den Einfluss der Reaktionszeiten aus den fMRI-Daten „heraus-“ oder sogar eher „hereingerechnet“ hat: dass also auf der Ebene der „bereinigten Daten“ sogar eher Effort-Anteile widergespiegelt werden.

6.4.6 Entwicklungsaspekt

Durch die Beobachtung der Zunahme der Netzwerkaktivierung und der Intensität der Aktivierungen vom Kindes zum Jugend- und Erwachsenenalter kann gezeigt werden, dass selbst normallesende Kinder noch nicht die voll ausgereifte Form der sprachverarbeitenden Regionen nutzen wie Erwachsene (Fragekomplex 4). Somit kann spekuliert werden, dass die vorliegenden Ergebnisse als Hinweis dafür anzusehen sind, dass die interne Organisation sprachverarbeitender Regionen beim Lesen, Nonwortlesen und Nonwortreimen bei Kindern mit und ohne LRS noch nicht denen normallesender Erwachsener gleicht. Trotz der Tatsache, dass die erwachsenen LRS-Probanden auf Ebene der Leistungsdaten häufig nicht einmal die Leistungen der jugendlichen Kontrollprobanden erreichen, weisen die Probanden mit LRS hinsichtlich der Aktivierungen ihrer neuronalen Netzwerke immer ähnliche Muster auf, wie die jeweils alterskongruente Kontrollgruppe (mit den oben bereits beschriebenen Gruppenunterschieden). Somit kann vor dem Hintergrund der vorliegenden Daten auch für die LRS-Probanden beschrieben werden, dass generell Sprachreale vom Kindes- zum Erwachsenenalter ausreifen. Auf dem allgemeinen Leistungsni-

veau dieser Areale scheinen dann aber die oben beschriebenen Unterschiede bestehen zu bleiben.

6.5 Zusammenführende Diskussion

Da die LRS ein Störungsbild ist, das ab dem Moment zu beobachten ist, wenn Kinder mit dem Erwerb der Schriftsprache konfrontiert werden, ist es von großer Wichtigkeit, bereits auf dieser Altersstufe über fundierte Kenntnisse hinsichtlich der Störungsmechanismen zu verfügen. Die meisten der empirischen (hirnfunktionellen) Forschungsarbeiten haben die Störung jedoch an erwachsenen Probanden untersucht. Dies liegt zum einen sicherlich darin begründet, dass vor der Entwicklung des fMRI lediglich Verfahren wie z.B. PET zur Untersuchung funktioneller Aspekte der Sprachverarbeitung zur Verfügung standen. Aus ethischen Gründen waren und sind solche Untersuchungen nicht an Kindern und Jugendlichen möglich. Jedoch liegen auch seit der Entwicklung des fMRI nur wenige Studien (erst recht nicht zur LRS) vor, die das Kindes- und Jugendalter mit berücksichtigen (Temple, 2001, 2002; Georgiewa et al., 1999, 2002; vgl. 2.6.3).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde deswegen erstmals bei drei Altersstufen (Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mit LRS) das hirnfunktionelle Substrat dieses Störungsbildes untersucht. Aufgrund der äußerst großen Fallzahl ($n=143$), die die Gruppengrößen der bisherigen fMRI-Studien bei weitem übersteigt, sollte es möglich sein, gezielte und verallgemeinerbare Aussagen über die ungestörte und gestörte Schriftsprachverarbeitung aufstellen zu können. Zudem konnte erstmals im Rahmen einer fMRI-Studie die LRS unter Berücksichtigung der Entwicklungsperspektive untersucht werden. Somit kann diese Arbeit einen wesentlichen Beitrag zur Aufklärung der (hirn-) funktionellen Grundlagen der LRS liefern.

Das Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit ist die Überprüfung der phonologischen Defizithypothese bei der LRS. Es soll also erstmals bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen untersucht werden, welcher Bereich der phonologischen Wortverarbeitung (BS, WL, NL, NWR) bei Probanden mit LRS im Vergleich zu normallesenden Probanden beeinträchtigt ist. Insgesamt zeigen die neuropsychologischen Daten, dass trotz einer Verbesserung der Lesefähigkeit über das Alter hinweg selbst erwachsene Probanden mit LRS beim Wortlesen (Ganzwortverarbeitung) nicht einmal das Niveau der gesunden Jugendlichen erreichen. Beim Nonwortlesen (Graphem-Phonem-Verarbeitung) bleibt der Unterschied zwischen Kontrollen und Probanden mit LRS über das Alter hinweg konstant. Somit be-

stätigen sich bereits auf neuropsychologischer Ebene LRS-spezifische Defizite bei der Graphem-Phonem-Zuordnung. Die in dieser Arbeit dargestellten fMRI-Ergebnisse bestätigen lokalisatorische Annahmen über signifikante Aktivierungen im temporo-parietalen Gyrus, extrastriären Regionen und inferior frontalen Gyrus hinsichtlich der drei wortspezifischen Stimulationsbedingungen. Dabei zeigt sich im Gruppenvergleich für Probanden mit LRS eine über das Alter konstante Überaktivierung im IFG. Der IFG wird in der Literatur als Ort der „Graphem-Phonem-Übersetzung“ interpretiert (Shaywitz et al., 2001, Pugh et al., 2000a). In Zusammenschau mit den neuropsychologischen Daten können die beobachteten Überaktivierungen im IFG somit als gesteigerter Verarbeitungsaufwand der Probanden mit LRS hinsichtlich defizitär ausgeprägter Graphem-Phonem-Konversionsfähigkeiten interpretiert werden, die sich erwartungsgemäß bei Aufgaben mit einer gesteigerten phonologischen Anforderung (also dem Nonwortreimen) äußern. Diese defizitäre Graphem-Phonem-Konversionsfähigkeit kann dabei bei Probanden mit LRS auf allen Altersstufen beobachtet werden. Zusätzlich zu diesen frontalen Überaktivierungen weisen die vorliegenden fMRI-Daten im Gruppenvergleich auf Minderaktivierungen in temporo-parietalen Arealen bei Probanden mit LRS hin. Diese temporo-parietalen Areale werden in der Literatur als möglicher „Sitz des mentalen Lexikons“ diskutiert.

Diese LRS-spezifischen Aktivierungsmuster können vor dem Hintergrund der hier beobachteten Wortverarbeitungsprozesse (von LRS-Probanden *und* Kontrollprobanden) wie folgt (spekulativ) interpretiert werden. Wie die vorliegenden Daten aufzeigen, können beim Erlesen jeglichen phonologiebehafteten Wortmaterials gemeinsame Aktivierungen frontaler und temporo-parietaler Sprachareale beobachtet werden. Dies könnte somit generell wie folgt diskutiert werden. Wenn man nun davon ausgeht, dass frontale Aktivierungen im Sinne von Graphem-Phonem-Konversionen und temporale Aktivierungen im Sinne von „Lexikonabgleichprozessen“ diskutiert werden, deutet dies darauf hin, dass im deutschen Sprachraum jeglicher Leseprozess immer im Sinne einer „gemischten“ Lesestrategie in Form von einer gleichzeitigen Nutzung von buchstabierenden *und* wortformbezogenen Lesestrategien gedeutet werden kann. Dennoch, obwohl die funktionellen Aktivierungsmustern auf hochfrequentes vs. unbekanntes Wortmaterial keine klare Differenzierung zwischen diesen Lesebedingungen zulassen, könnte der Befund der Leistungsdaten, die eindeutig belegen, dass Wörter generell schneller und mit weniger Fehlern bearbeitet werden, darauf hindeuten, dass dieses Wortmaterial aufgrund seiner größeren Bekanntheit schneller und automatisierter mit phonologischen Codes und Wortgestalten abgeglichen werden kann.

Dieses Zusammenspiel, das wie bereits beschrieben *innerhalb der jeweiligen Kontroll- bzw. LRS-Gruppe* zu beobachten ist, gerät dann im Gruppenvergleich dahingehend ins Ungleichgewicht, dass nun bei den Probanden mit LRS frontale Überaktivierungen zu beobachten sind. Vor dem eben beschriebenen Hintergrund deutet dies somit auf folgenden LRS-spezifischen Störungsmechanismus hin: Obwohl auch Probanden mit LRS, konträr zu Annahmen der Diskonnektionshypothese, in der Lage sind, frontale und temporo-parietale Areale zu aktivieren, deuten die im Gruppenvergleich zu Tage tretenden Unterschiede darauf hin, dass bei Probanden mit LRS dieses Netzwerk im temporo-parietalen Bereich nicht seine volle Funktionsfähigkeit zu erreichen scheint, was nur über die überproportionale Aktivierung der frontalen Areale ausgeglichen (kompensiert) werden kann. Inhaltlich könnte dies somit darauf hindeuten, dass lexikalische Abgleichprozesse defizitär sind, die funktionell über die Aktivierung der frontalen Areale ausgeglichen werden sollen. Da aber bekanntermaßen ein zusätzliches LRS-spezifisches Defizit auf der Ebene der Graphem-Phonem-Konversion vorliegt, kommt es zu einem gesteigerten neuronalen Verarbeitungsaufwand, um dieses „doppelte“ Defizit auszugleichen.

Festzuhalten bleibt, dass es in der vorliegenden Studie zum ersten Mal innerhalb des deutschen Sprachraums gelungen ist, dieses Defizit sowohl für Kinder, Jugendliche und Erwachsene mit LRS nachzuweisen und dass trotz der bei den erwachsenen Probanden mit LRS zu verzeichnenden Leistungssteigerungen beim Erlesen hochfrequenten Wortmaterials dieses phonologische Defizit weiterhin persistiert.

Diese Befunde unterstützen also das Vorliegen eines neurobiologischen Korrelates für die auf der Verhaltensebene beobachtete Schwäche der phonologischen Bewusstheit bei der LRS.

Die Therapieevaluationsstudie von Simos et al. (2002) kann als zusätzliche Stütze der hier dargestellten Argumentation gegen die *Diskonnektionshypothese* und für die *Kompensationshypothese* angebracht werden. Die Autoren zeigen, dass vor der Intervention beobachtete temporo-parietale hirnfunktionelle Defizite von Probanden mit LRS durch intensive Förderprogramme insofern beeinflussbar sind, dass sich die Aktivierungsmuster der beübten Probanden mit LRS nach der Intervention denen der normallesenden Probanden annähern. Dies spricht eindeutig gegen eine funktionelle „Unterbrechung“. Wichtig ist jedoch darauf hinzuweisen, dass selbst nach der (intensiven) Beübung die temporo-parietalen Aktivierungen bei Probanden mit LRS nicht an das Ausgangsniveau der Kontrollprobanden erreichen. Dies spricht dafür, dass hier das „Basisdefizit“ der LRS neurobiologisch veran-

kert sein könnte, das zwar bis zu einem gewissen Grad korrigiert, aber nicht vollständig behoben werden kann (vgl. Paulesu et al., 1996).

6.6 Methodenkritische Anmerkungen

6.6.1 Allgemeine Anmerkungen

Paradigmenvielfalt

Ein Hauptproblem des internationalen Forschungsstandes bildgebender Verfahren zur LRS-Thematik liegt in der heterogenen Befundlage dieser Studien. Diese Heterogenität ist im Einsatz unterschiedlichster Paradigmen und theoretischer Modellvorstellungen begründet. Die Übertragbarkeit der Studienbefunde wird dadurch enorm eingeschränkt. Demonet und Thierry (2001) geben einen Überblick darüber, welche Faktoren die „Bildgebung“ zur Sprachverarbeitung beeinflussen können und somit für die Interpretation dringend berücksichtigt werden müssen:

Tabelle 13: Modifizierte Tabelle aus Demonet und Thierry (2001).

| <u>Personen-Spezifisch</u> | <u>Experiment-Spezifisch</u> | |
|---|---|--|
| | Allgemein | Sprachbezogen |
| <ul style="list-style-type: none"> • Geschlecht¹ • Alter² • Händigkeit • Bildung³ • Motivation • Stress | <ul style="list-style-type: none"> • Reizmodalität (akustisch^{4,5}, visuell^{6,16}, aber auch olfaktorisch, Geschmack oder Berührung) • Antwortmodalität (mündlich, motorisch, innerlich⁷, nichts) • Aufgabenschwierigkeit (Vertrautheit mit der Aufgabe, Bereitschaft/Bereitwilligkeit⁸, Gewöhnungseffekt/Einarbeitungseffekt⁹) • Stimulationsrate¹⁰ • Entdeckungszeit¹⁰ | <ul style="list-style-type: none"> • Stufe der Darstellung (Phoneme⁴, Silben, Wörter⁴, Sätze¹¹, usw.) • Interpretation/Deutung (direkt versus bildlich)¹² • Lexikalität (Wörter, Pseudowörter und Nonwörter) • Kategorien/Gruppen¹³ (Substantive versus Verben, künstlich versus natürlich, inhaltliche Wörter versus Funktionswörter¹⁴, konkret versus abstrakt¹⁵, usw.) • Lexikalische Frequenz • Graphem-Phonem-Konsistenz¹ |
| <u>Im einzelnen zu sehen in:</u> | | |
| 1. Shaywitz et al., 1995. 2. Madden et al., 1996 3. Castro-Caldas et al., 1998 4. Demonet et al. 1994, Thierry et al. 1998. 5. Belin et al., 1998 6. Price et al., 1998 7. McGuire et al., 1996. 8. Chertkow and Bub, 1994 9. Raichle et al., 1994 10. Price et al., 1994 and 1996 11. Bavelier et al. 1997, Just et al. 1996 12. Bottini et al., 1994 13. Damasio et al., 1996; 14. Nobre et al., 1994, 1995 and 1998 15. Mellet et al., 1998 16. Fiez et Petersen., 1998. | | |

Aus der Tabelle 13 wird die Vielzahl an Faktoren ersichtlich welche die Ergebnisse einer Studie beeinflussen können.

Auch Grigorenko (2001) beschreibt, dass die Variationsbreite der empirischen Befunde durch folgende Faktoren beeinflusst werden: (1) Veränderungen/Abweichungen der Stimulusparameter und Schwierigkeitsgrade der Aufgaben, (2) Unterschiede der Techniken

(fMRI, PET), (3) das Prinzip der Subtraktionsverfahren (spm99), (4) schlecht definierte Aufgabenanalysen.

Nicht zuletzt deuten neue Forschungsansätze wie von Paulesu et al. (2000, 2001) zur Untersuchung von Sprachvergleichen darauf hin, dass die Ergebnisse aus dem englischen Sprachraum und damit auch die zugrunde liegenden theoretischen Entwicklungs- bzw. Sprachmodelle nicht ohne weiteres auf den deutschen Sprachraum übertragbar sind.

Nur wenn diese Faktoren bei der Interpretation von empirischen Befunden Berücksichtigung finden, können valide Aussagen hinsichtlich der gestörten und ungestörten Sprachverarbeitung abgeleitet werden.

6.6.2 Kritik an der eigenen Studie

Diagnostikmaterial

Die neuropsychologische Testbatterie ist zweifelsohne noch nicht als optimal einzustufen und sollte für zukünftige Studien weiter optimiert werden. Gerade das Fehlen eines geeigneten Lesetest erschwert die Diagnose der LRS im Jugend- und Erwachsenenalter. Wichtig ist zudem daraufhin zuweisen, dass häufig in vielen neuropsychologischen Verfahren Probleme mit der Normierung bestehen. Dies trifft neben dem ZLT auch für den „Standard Progressive Matrices Test“ zu. Hier liegen zwar Altersnormen vor, diese werden jedoch häufig als nicht mehr angemessen bezeichnet (Baving, 2002). Bezüglich der Normierung besteht noch deutlicher Bearbeitungs- und Weiterentwicklungsbedarf.

Bei den Wortlisten (Wortlesen, Nonwortlesen, Transformation) trifft ebenso das Problem einer fehlenden Normierung zu. Trotzdem wurden diese Aufgaben eingesetzt, um verschiedene Arten der phonologischen Verarbeitung (Leseprozesse) in allen Gruppen zu erfassen. Diese Verfahren sollten erweitert und standardisiert werden. Damit würden sie eine gute Ergänzung zur Diagnostik der LRS liefern.

fMRI

Bezüglich der fMRI-Untersuchung liegt das Problem der Bewegungsartefakte vor. Wie bereits beschrieben können diese Artefakte zu fälschlichen Aktivierungen und somit zu Fehlinterpretationen führen. In der gängigen Literatur zu bildgebenden Verfahren gibt es jedoch kein Kriterium, ab wann eine Bewegung als „zu groß“ und vom Algorithmus nicht mehr korrigierbar betrachtet wird. Viele Forschergruppen legen eine Grenze bei 3mm fest. Dies scheint aber gerade bei Kindern viel zu hart zu sein, so dass wir in unserer Studie ein Maximum von 3-5mm definierten. Dem Problem der „Fehlinterpretation“ sind wir mit Ein-

zalanalysen entgegengetreten. Wenn sich bei der Einzelanalyse Aktivierungen in den Ventrikeln oder über dem „Kortexrand“ hinaus zeigten wurde dieser Datensatz aus der Analyse ausgeschlossen.

Ein generelles Problem bei fMRI-Analysen und deren Interpretationen stellt die individuelle und interindividuelle Varianz dar (Einzelanalysen vs. Gruppenanalysen). Betrachtet man die Einzelauswertungen, so bemerkt man sowohl auf neuropsychologischer als auch auf Ebene des fMRI eine große interindividuelle Varianz. Dieser Einschränkung wird zwar im SPM99 durch eine „Random Effects“-Analyse begegnet (vgl. 4.7.2), jedoch werden durch diese Analyse kleine Unterschiede (die sicherlich vorhanden sind) nicht berücksichtigt. So beschreiben Burton et al. (2001) in ihrer PET-Studie zur auditorischen Sprachverarbeitung, dass die Stärke der beobachteten Aktivierungen entlang des posterior superior temporalen Gyrus individuell stark variiert. Da die Ergebnisse interindividuell stark variierten sehen die Autoren eine Problematik der Interpretation von Gruppenmittelwerten.

Das Problem der „Normalisierung“ im SPM99 bei Kinderdaten wird häufig diskutiert. Weil im Jugendalter davon ausgegangen werden kann, dass Volumen und Reifegrad des Gehirns bereits dem der Erwachsenen sehr stark ähneln, kann das Standardtemplate (normiert auf Erwachsene) auch für die Gruppe der Jugendlichen genutzt werden. Vor dem Hintergrund, dass das Ziel der Studie altersstufenübergreifend vergleichbare Aussagen hinsichtlich volumenbezogener Aktivitätslokalisationen darstellte, wurde für die Altersgruppe der Kinder ebenfalls das Standardtemplate herangezogen. Dabei wurde jedoch dem Altersaspekt Rechnung getragen, indem zunächst ein Standardbild für die Gruppe der Kinder erstellt, anhand dessen die fMRI-Bilder normalisiert, wurde. In einem weiteren Schritt wurden die fMRI-Bilder der Kinder auf das „Standardtemplate“ (Erwachsenen) normalisiert. Dieses Vorgehen wurde von uns dahingehend überprüft und als valide eingeschätzt, indem die auf ein speziell entwickeltes „Kindertemplate“ normalisierten Datensätze mit den oben beschriebenen Ergebnissen verglichen wurden. Da die Ergebnisse als vergleichbar eingeschätzt wurden konnten die weiteren Analysen und Interpretationen als reliabel bewertet werden.

6.7 Ideen und Fragestellungen für zukünftige empirische Studien

6.7.1 Methodische und technische Weiterentwicklungen

Ein Problem von fMRI-Untersuchungen im Blockdesign ist ihre nur mangelhafte zeitliche Auflösung. So lag der Schwerpunkt vieler wissenschaftlichen Arbeiten in den vergangenen Jahren in der Weiterentwicklung und Verbesserung der Methode der fMRI. Hier hat die fMRI von der Verfügbarkeit stärkerer Gradientensysteme und der damit verbundenen höheren zeitlichen und örtlichen Auflösung profitiert. Vor diesem Hintergrund konnte die Umsetzung von ereigniskorrelierten Messsequenzen realisiert werden (event-related fMRI). Durch die stärkeren Gradientensystemen ist die zeitliche Auflösung sehr hoch. Der Vorteil des efMRI liegt also in einer deutlich besseren zeitlichen Auflösung verglichen mit klassischen fMRI-Untersuchungen. Problematisch ist jedoch weiterhin, dass selbst das efMRI nicht die zeitliche Auflösung eines EEG's erreicht. So wurden in den letzten Jahren immer mehr Anstrengungen unternommen parallel efMRI- und EEG-Daten zu erheben. Problematisch ist jedoch, dass mit zunehmender Feldstärke (mittlerweile 3-4 Tesla in der BRD) wiederum das Problem der ethischen Frage in den Vordergrund tritt, ob man für wissenschaftliche Untersuchungen Kinder einer solchen Feldstärke aussetzen soll bzw. darf. Inhaltlich kann diese gekoppelte Datenerhebung dabei gerade für Untersuchungen zur LRS gewinnbringend genutzt werden, um durch diese verfeinerten Messmethoden Fragen wie die oben diskutierte Diskonnektionshypothese endgültig zu klären. Neben technischen Weiterentwicklungen muss dabei auch stetig an der Weiterentwicklung der verschiedenen Auswertesoftwaremöglichkeiten in Form von der Implementierung immer neuer Auswertalgorithmen gearbeitet werden, die eine möglichst optimale Modellmodulation erlauben.

Auswertung von fMRI-Daten mit explorativen Methoden

Wie bereits beschrieben wurden die vorgestellten fMRI-Ergebnisse mit dem SPM99 berechnet. Eine Grundlage dieser Analysen ist ein vordefiniertes Modell für die erwartete Gestalt der Stimulus-Antwort-Signale. Dieses Modell basiert auf den Daten vieler fMRI-Messungen und beschreibt daher die typische hämodynamische Antwortfunktion. Der Nutzen derartiger Modelle ist durch zahlreiche Studien belegt, zumindest, so weit die fMRI-Experimente von gesunden Probanden ausgeführt wurden und die Probanden die gestellten Aufgaben paradigmengemäß bearbeitet haben. Dennoch können in den Daten einer beliebigen fMRI-Messung Antwortsignale vorkommen, die über statistische Abweichungen („Rauschen“) hinaus individuell verschiedene Muster zeigen. Ein Grund dafür

sind z.B. Schwankungen in der Kontinuität, mit der ein Proband den Aufgaben im Experiments nachkommt. Dies gilt – mit Bezug zur vorliegenden Arbeit – insbesondere für Kinder (vgl. hierzu Möller et al., 2001). Als eine ergänzende Form der Datenauswertung berücksichtigt man daher zunehmend auch Ansätze zur explorativen Datenauswertung, insbesondere die Methoden der Clusteranalyse (vgl. Anderberg, 1973). Diese Methoden werden in der Literatur auch als für fMRI-Studien modell- bzw. hypothesen-generierend charakterisiert (Pizzi et al., 2001). Ein Teil der fMRI-Daten wurde, neben der SPM-Auswertung, auch mit Methoden der Clusteranalyse untersucht. Dafür wurde der wohl am häufigsten verwendete Ansatz gewählt, bei dem sich die Clusteraufgabe als eine Serie (komplizierter) Optimierungsprobleme darstellt (Theodoridis & Koutroumbas, 1998). In bisherigen fMRI-Studien wurde versucht, diese Probleme durch Anwendung von Algorithmen zur lokalen Optimierung zu lösen (z.B. Goutte et al., 1999). Letzere sind aber meist nicht in der Lage, die bestmögliche Clusterstruktur zu finden. Deshalb erfolgte die Entwicklung, Anpassung und Anwendung von Clusteralgorithmen, die für globale (statt lokale) Optimierung ausgelegt sind. Dabei zeigten sich deutliche Vorteile gegenüber den konventionellen Verfahren. In Auswertung der Untersuchungen sind vor allem zwei Ergebnisse hervorzuheben, die den potenziellen Nutzen für den Anwender kennzeichnen.

(1) Durch Einsatz von Methoden zur globalen Optimierung gelang es besser, Gruppen aus ähnlichen Aktivierungsmustern optimal in K Cluster zu partitionieren, so dass aus den K Clusterzentren die für die Daten charakteristischen Aktivierungsmuster erkennbar werden. Insbesondere konnte so das Risiko einer Über- oder Unterschätzung funktionell aktivierter Hirnareale vermindert werden (Abbildung 30).

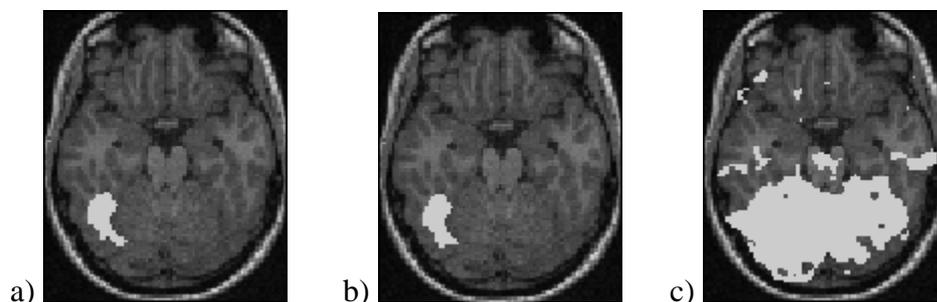
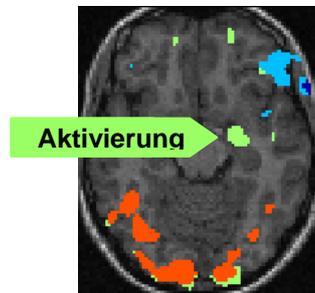


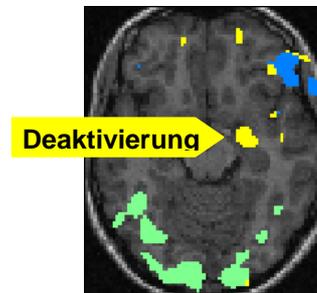
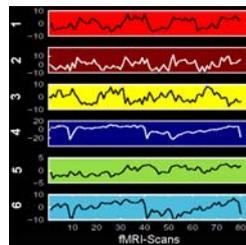
Abbildung 30: Ergebnisse von drei verschiedenen Methoden, mit denen die im fMRI-Experiment am stärksten aktivierten Hirnareale charakterisiert wurden (Darstellung einer Schicht vor dem Hintergrund eines anatomischen MR-Bildes). a) SPM-Ergebnis, Voxel mit den größten Werten der t -Statistik ($T = 4.7$), b) Ergebnis eines Clusterverfahrens mit globaler Optimierung; Voxel, deren fMRI-Signale einem von zehn Clustern zugeordnet wurden, wobei der Signalverlauf des zugehörigen Clusterzentroids die deutlichsten Anzeichen einer Aktivierung erkennen ließ, c) analog wie b), jedoch für das bekannte K-means-Clusterverfahren mit lokaler Optimierung.

(2) Durch die Entwicklung eines Verfahrens zur statistischen Evaluierung von Clusterlösungen (Möller et al., 1998, 2002) gelang es zuverlässiger als bisher, die Validität der explorativen Ergebnisse abzusichern (Abbildung 31).

Teil einer Sechskusterlösung, die – bei ausreichender Clusteroptimierung und statistischer Evaluierung – als bestes Ergebnis für die Daten eines Probanden berechnet wurde.



- 1 Aktivierung
- 2 Aktivierung
- 3 Deaktivierung
- 4 Artefakt
- 5 Aktivierung
- 5 Artefakt



Teil einer Vierkusterlösung, die – bei nicht ausreichender Clusteroptimierung und unter Verzicht auf eine statistische Evaluierung – als bestes Ergebnis für dieselben Daten berechnet wurde.

- 1 Artefakt
- 2 Aktivierung
- 3 Deaktivierung
- 4 Aktivierung

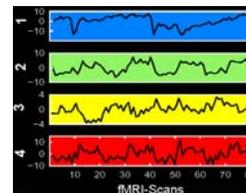


Abbildung 31: In Abhängigkeit vom erreichten Grad der Clusteroptimierung und der Anwendung einer statistischen Evaluierungsmethode können für ein und denselben fMRI-Datensatz verschiedene Ergebnisse resultieren, die zu konträren Interpretationen Anlass geben. Oben: Zuordnung der Voxeln mit starker Dynamik des Antwort fMRI-Signals zu verschiedenen Clustern (Farbkodierung) vor dem Hintergrund eines anatomischen MR-Bildes (Darstellung einer Schicht). Unten: Zugehörige Signalverläufe für die Clusterzentroide.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse das Risiko einer Über- oder Unterschätzung funktionell aktivierter Hirnareale. Eine Einschränkung dieses Verfahrens liegt jedoch darin, dass es vorwiegend an „theoretischen“ und nur eingeschränkt an originalen fMRI-Datensätzen angewendet werden kann. Trotzdem kann dieses Verfahren zukünftig die auf a-priori Annahmen aufbauende standardisierte SPM-Auswertung unterstützen.

6.7.2 Früherkennung, Frühförderung und Entwicklungsverlauf der LRS

Da im klinischen Alltag häufig berichtet wird, dass das Störungsbild der LRS im Schultag entweder erst sehr spät „entdeckt“ und häufig den LRS-bedingten Problemen mit großem Unverständnis begegnet wird, können Studien wie die Vorliegende dazu beitragen, das Bewusstsein für das Störungsbild zu vergrößern. Befunde aus Längsschnittstudien wie von Esser et al. (1993), die zeigen, dass die Prognose für Kinder mit einer LRS hinsichtlich Schulabschluss und beruflicher Karriere als eher ungünstig einzuschätzen ist, sollten ein deutliches Zeichen für die Wichtigkeit der Früherkennung und Frühförderung von Risikokindern und Kindern mit Lese-Rechtschreibproblemen in den ersten Grundschulklassen sein. Nur in dem Fall, dass durch eine frühe Diagnose die Förderung so früh wie möglich einsetzen kann, können die weittragenden Konsequenzen der LRS in Form von ge-

scheiterten Schul- und Berufskarrieren und den nicht selten begleitend auftretenden Komorbiditäten wie Schulverweigerung, Ängste und Depressionen vermieden werden.

Mit Verfahren wie dem Bielefelder Screening zur Früherkennung von Leserechtschreibschwierigkeiten (BISC) hat man Instrumente an der Hand, die eine Früherkennung schon im Vorschulalter ermöglichen. Zudem kann durch Verfahren, wie dem Würzburger Training (Küspert & Schneider, 2000) auf früher Ebene in die Förderung eingegriffen werden. Wichtig ist es jedoch auch weitere therapeutische Ansätze (bzw. Verfahren) für höhere Altersstufen zu erarbeiten.

Das phonologische Defizite bereits im Kindergartenalter auftreten können und nachweisbar sind zeigt eine aktuelle Studie von Brandeis et al. (2002). Im Rahmen einer EEG- und MEG-Studie konnte gezeigt werden, dass schon bei (sechsjährigen) Kindergartenkindern Unterschiede in der Verarbeitung von Buchstaben und Zeichen nachweisbar sind. Zusätzlich konnten die Autoren zeigen, dass bereits Kindergartenkindern aus leseschwachen Familien Klänge und Muster „anders“ verarbeiten als Kindern aus Familien ohne Leseschwäche. Dieser Nachweis, dass derartige defizitäre Sprachverarbeitungsfähigkeiten auf neurobiologischer Ebene bereits in diesem Alter zu verzeichnen sind, sollte als wertvoller Indikator zur Früherkennung der LRS unbedingt Beachtung finden.

In der vorliegenden Arbeit konnten das phonologische Defizit und deren cerebrale Repräsentation erstmals auch für Kinder und Jugendliche mit LRS nachgewiesen werden. Die Abbildung von Entwicklungsprozessen ist aufgrund der Querschnittsuntersuchung nur eingeschränkt möglich und sollte sicherlich durch Längsschnittuntersuchungen erweitert werden. Diese könnten dann wiederum noch bessere Rückschlüsse auf Therapien (und Therapieevaluationen) der LRS bieten.

6.7.3 Verbesserung von Therapiekonzepten und -evaluation

Die Befunde aus der vorliegenden Arbeit können für die Gestaltung therapeutischer Ansätze genutzt werden. Wie aus dieser Studie z.B. deutlich hervorgeht, sind zwar auch auf der Ebene des Wortlesens Defizite bei der LRS vorhanden. Die größten Probleme liegen jedoch beim Nonwortlesen oder Nonwortreimen vor und sollten demnach am intensivsten geübt werden. Dies könnte sich in Aufgaben zum „Silbensegmentieren“ und „Wortumbauaufgaben“, die die Lautstruktur der Sprache beüben, äußern.

Bildgebende Verfahren können dann wiederum zur Evaluation dieser Therapieverfahren eingesetzt werden, um zu überprüfen, ob die auf biologischer Ebene festgestellten Defizite durch derartige Verfahren beeinflussbar sind. Sicherlich darf man bei solchen Forschungs-

vorhaben nicht außer Acht lassen, dass es hierbei noch relativ große Diskussionen gibt, ob diese bildgebenden Verfahren über die Messzeitpunkte von Längsschnittstudien hinweg ausreichend reliable Daten liefern. Ergebnisse einer aktuellen Therapieevaluationsstudie (englischer Sprachraum) mittels der Magnetencephalographie (MEG; Simos et al., 2002) zeigen, dass ein intensives Förderprogramm mit starken Veränderungen der Aktivierungsmuster im Gehirn verbunden ist. Die Ergebnisse legen nahe, dass das Defizit der funktionellen Gehirnorganisationen bei LRS-Probanden nach einer intensiven Intervention tendenziell korrigierbar sind.

6.7.4 Unterschiedliche Sprachräume

Aus der oben dargestellten Therapieevaluationsstudie (Simos et al., 2002) und den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kann abgeleitet werden, dass Ergebnisse und Modellannahmen aus dem englischen Sprachraum nicht ohne weiteres auf den deutschen Sprachraum übertragbar sind. So scheinen die beschriebenen Modelle des Leseprozesses (Coltheart, 1978, 1981; vgl. 2.5.2.1) und der Leseentwicklung (Frith, 1985; vgl. 2.5.2.2) nur begrenzt auf den deutschen Sprachraum zuzutreffen. In der vorliegenden Arbeit kann zwar eine Trennung zwischen adressierter und assemblierter Verarbeitung auf neuropsychologischer (Wortlisten und ERTS-Daten) nachgewiesen werden. Dies trifft aber nicht für Befunde auf hirnfunktioneller Ebene zu. Hierzu sollte in zukünftigen Untersuchungen im deutschen Sprachraum z.B. mit Neurolinguisten zusammengearbeitet werden, um erweiterte Modelle für die ungestörte und gestörte Sprachverarbeitung zu entwickeln.

6.7.5 Ideen für weiterführende Studien (Fragestellungen)

Abschließend stellt sich nun die Frage, was man aus heutiger Sicht an dieser Studie konzeptionell verbessern könnte bzw. welche weiterführenden Fragestellungen sich aus den dargestellten Ergebnissen und Diskussionen ableiten lassen.

Wie bereits beschrieben, können derzeitige Modellannahmen nicht generell auf den hiesigen Sprachraum übertragen werden, da sie vorwiegend aus dem englischen Sprachraum stammen. In Zusammenarbeit mit Neurolinguisten sollten deswegen in zukünftigen Studien zur (LRS-spezifischen) Sprachverarbeitung sprachraumangepasste Modelle für den Leseprozess und die Leseentwicklung entwickelt werden. Hieraus könnten dann Erkenntnisse hinsichtlich einer verbesserten Gestaltung des Stimulationsmaterials abgeleitet werden, so dass eine bessere Differenzierung zwischen adressierter und assemblierter Verarbeitung auch auf hirnfunktioneller Ebene möglich sein könnte. Somit könnte die Frage beantwortet

werden, ob eine Differenzierung dieser beiden Verarbeitungstrecken mittels fMRI nachweisbar ist, oder ob eine solche Trennung im deutschen Sprachraum nicht zutreffend ist. Desweiteren sollten zukünftige Studien Probanden mit unterschiedlichen Muttersprachen einbeziehen, um noch detailliertere Aussagen hinsichtlich der Sprachverarbeitungseigenheiten der verschiedenen Sprachräume treffen zu können.

Es ist zu beobachten, dass z.B. eine Vielzahl an Förderprogrammen aus dem englischen Sprachraum kommen. Ein wie oben beschriebenes verbessertes Stimulusmaterial und Erkenntnisse an Probanden mit verschiedenen Muttersprachen könnten dann dazu führen, dass für den deutschen Sprachraum eigene (spezifischere) Förderprogramme entwickelt werden können. Diese (weiterentwickelten) Förderprogramme sollten dann wiederum mittels bildgebender Verfahren evaluiert werden (vgl. Studie von Simos et al., 2002). Hier scheint in den nächsten Jahren ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten zu liegen.

Da in dieser vorliegenden Arbeit, und z.B. in der Studie von Brandeis et al. (2002), dargestellt werden konnte, dass das phonologische Defizit schon bei *Kindern* mit LRS nachweisbar ist sollte in einer weiteren Untersuchung auf neuropsychologischer aber auch auf hirnfunktioneller Ebene untersucht werden, inwiefern sich dieses Defizit schon bei Kindergartenkindern auswirkt, und ob somit eine frühzeitige Prognose, Diagnose und damit verbunden eine frühzeitige Förderung, möglich ist. Um einer besseren zeitlichen Auflösung und somit einer noch detaillierteren Analysen von Netzwerkaktivierungen auf den Grund gehen zu können sollte man sich dabei der Methode des efMRI bedienen.

In den vorangehenden Abschnitten wurde die Bedeutung der phonologischen Bewusstheit für die LRS dargestellt. Wie bereits in 2.5.1 beschrieben konnte die Bedeutung der phonologischen Bewusstheit für den Schriftspracherwerb in einer Reihe von Längsschnittstudien belegt und für mehrere Sprachräume repliziert werden (Schulte-Körne, 1999). Trotz der recht deutlichen Befundlage hinsichtlich der phonologischen Defizithypothese darf man nicht außer Acht lassen, dass weitere Störungsmodelle der LRS diskutiert werden. So gehen manche Autoren davon aus, dass dem phonologischen Defizit von Probanden mit LRS ein zeitliches Verarbeitungsdefizit auf auditorischer Ebene zugrunde liegt, wodurch die Sprachwahrnehmung gestört, die Entwicklung der phonologischen Bewusstheit eingeschränkt und somit den Schriftspracherwerb beeinträchtigt wird. Diese Aspekte müssen in weiteren Untersuchungen ebenso Berücksichtigung finden.

7 Zusammenfassung

In dieser fMRI-Studie wurden Sprachverarbeitungsmechanismen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mit einer LRS im Vergleich zu normallesenden Probanden untersucht. Stimuliert wurde mittels eines visuellen, hierarchischen Paradigmas (5-stufig: Slashpaarabgleich, Buchstabenabgleich, Wortlesen, Nonwortlesen, Nonwortreimen). Zusätzlich zu fMRI-Daten wurden neuropsychologische Daten erfasst.

Neuropsychologische Daten zeigen, dass trotz einer Verbesserung der Lesefähigkeit über das Alter hinweg selbst erwachsene Probanden mit LRS beim Wortlesen (Ganzwortverarbeitung) nicht einmal das Niveau der gesunden Jugendlichen erreichen. Beim Nonwortlesen (Graphem-Phonem-Verarbeitung) bleibt der Unterschied zwischen Kontrollen und Probanden mit LRS über das Alter hinweg konstant. fMRI-Ergebnisse bestätigen lokalisatorische Annahmen über signifikante Aktivierungen im temporo-parietalen Gyrus, extrastriären Regionen und inferior frontalen Gyrus (IFG) hinsichtlich der drei wortspezifischen Stimulationsbedingungen. Dabei zeigt sich im Gruppenvergleich für Probanden mit LRS eine über das Alter konstante Überaktivierung im IFG.

Die Ergebnisse der neuropsychologischen Daten legen nahe, dass es im Verlauf der Lesentwicklung bei der LRS auf Ebene des Ganzwortlesens zu Annäherungen an Leistungen von Normallesenden kommt, wohingegen das Defizit bei Aufgaben auf der Ebene von Graphem-Phonem-Konversionen bestehen bleibt. Der Befund einer Überaktivierung im IFG bei Probanden mit LRS lässt vermuten, dass, unabhängig vom Alter, in dieser Region, fehlende temporo-parietale Aktivierungen kompensiert werden. In der Zusammenschau bestätigen die neuropsychologischen und neurophysiologischen Daten das Vorliegen eines phonologischen Defizits bei der LRS.

8 Literaturverzeichnis

- Anderberg, M. R. (1973). *Cluster analysis for applications*. New York: Academic Press.
- Anderson, J. R. (1996). *Kognitive Psychologie* (J. Grabowski & R. Graf, Trans. 4 ed.). Heidelberg Berlin Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Andrade, A., Paradis, A. L., Rouquette, S., & Poline, J. B. (1999). Ambiguous results in functional neuroimaging data analysis due to covariate correlation. *NeuroImage*, *10*(4), 483-486.
- Association, A. P. (Ed.). (1993). *DSM-IV draft criteria. Task force on DSM-IV*. Washington, D.C.: APA.
- Barth, K. (1999). *Zur Prophylaxe von Lese-Rechtschreibstörungen*. Unpublished manuscript, Dortmund.
- Bavelier, D., Corina, D., Jezzard, P., Padmanabhan, S., Clark, V. P., Karni, A., Prinster, A., Braun, A., Lalwani, A., Rauschecker, J. P., Turner, R. & Neville, H. (1997). Sentence Reading: A Functional MRI Study at 4 Tesla. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*, 664-686.
- Baving, L. (2002). *Intelligenzdiagnostik*. Paper presented at the XXVII. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie, Berlin.
- Bechtereva, N. P., Abdullaev, Y. G. & Medvedev, S. V. (1991). Neuronal activity in frontal speech area 44 of the human cerebral cortex during word recognition. *Neuroscience Letters*, *124*, 61-64.
- Beech, J. R. & Awaida, M. (1992). Lexical and nonlexical routes: a comparison between normally achieving and poor readers. *Journal of Learning Disabilities*, *25*(3), 196-206.
- Belin, P., McAdams, S., Smith, B., Savel, S., Thivard, L., Samson, S. & Samson, Y. (1998). The Functional Anatomy of Sound Intensity Discrimination. *The Journal of Neuroscience*, *18*, 6388-6394.
- BeriSoft & Cooperation. (1987-1999). Experimental Run Time System (ERTS) (Version 3.28).
- Binder, J. R. (1997a). Neuroanatomy of language processing studied with functional MRI. *Clinical Neuroscience*, *4*, 87-94.
- Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Cox, R. W., Rao, S. M. & Prieto, T. (1997b). Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, *17*(1), 353-362.
- Binder, J. R., Rao, S. M., Hammeke, T. A., Bandettini, P. A., Jesmanowicz, A. & Hyde, J. S. (1995). Lateralized human brain language systems demonstrated by task subtraction functional magnetic resonance imaging. *Archives of Neurology*, *52*(6), 593-601.
- Birkel, P. (1994a). *Weingartener Grundwortschatz Rechtschreib-Test für zweite und dritte Klasse (WRT2+)*. Göttingen: Hogrefe - Verlag für Psychologie.
- Birkel, P. (1994b). *Weingartener Grundwortschatz Rechtschreib-Test für dritte und vierte Klasse (WRT 3+)*. Göttingen: Hogrefe - Verlag für Psychologie.
- Bookheimer, S. Y., Zeffiro, T. A., Blaxton, T., Gaillard, W. & Theodore, W. (1995). Regional cerebral blood flow during object naming and word reading. *Human Brain Mapping*, *3*, 93-106.
- Bortz, J. (1989). *Statistik für Sozialwissenschaftler* (3. Auflage). Berlin: Springer-Verlag.

- Bottini, G., Corcoran, R., Sterzi, R., Paulesu, E., Schenone, P., Scarpa, P., Frackowiak, R. S. J. & Frith, C. D. (1994). The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language: A positron emission tomography activation study. *Brain*, *117*, 1241-1253.
- Brandeis, D., Brem, S., Bucher, K. & Maurer, U. (2002). Mapping visual word processing before children learn to read. *NeuroImage Human Brain Mapping 2002 Meeting*.
- Brett, M., Christoff, K., Cusack, R. & Lancaster, J. L. (2001). *Using the Talairach Atlas with the MNI template*. Paper presented at the Human Brain Mapping.
- Brickenkamp, R. (1994). *Test d2: Aufmerksamkeits-Belastungs-Test*. Göttingen: Hogrefe-Verlag für Psychologie.
- Brunswick, N., McCrory, C., Price, C. J., Frith, C. D. & Frith, U. (1999). Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics. A search for Wernicke's Wortschatz? *Brain*, *122*, 1901-1917.
- Buchsbaum, B. R., Hickok, G. & Humphries, C. (2001). Role of left posterior superior temporal gyrus in phonological processing for speech perception and production. *Cognitive Science*, *25*(5), 663-678.
- Burton, M. W., Noll, D. C. & Small, S. L. (2001). The anatomy of auditory word processing: individual variability. *Brain and Language*, *77*(1), 119-131.
- Castro-Caldas, A., Petersson, K. M., Reis, A., Stone-Elander, S. & Ingvar, M. (1998). The illiterate brain. Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain and Language*, *121*(6), 1053-1063.
- Chertkow, H. & Bub, D. (1994). Functional activation and cognition: The 15O PET Subtraction Method. In A. Kertesz (Ed.), *Localization and Neuroimaging in Neuropsychology*. New York: Academic Press.
- Chertkow, H. & Murtha, S. (1997). PET activation and language. *Clinical Neuroscience Research*, *4*(2), 78-86.
- Childs, B. & Finucci, J. M. (1984). Genetics, epidemiology and specific reading retardation. In M. Rutter (Ed.), *Developmental neuropsychiatry*. Edinburgh: Churchill Livingstone.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A. & Michel, F. (2000). The visual word form area. *Brain*, *123*(2), 291-307.
- Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S. & Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain and Language*, *125*(5), 1054-1069.
- Coltheart, M. (1978). *Lexical access in simple reading tasks*. San Diego: Academic Press.
- Coltheart, M. (1981). Disorders of reading and their implications for models of normal reading. *Visible Language*, *15*, 245-286.
- Damasio, H., Grabowski, T. J., Tranel, D., Hichwa, R. D. & Damasio, A. R. (1996). A neural basis for lexical retrieval. *Nature*, *380*(6574), 499-505.
- Demb, J. B. (1999). *Psychophysical and physiological evidence for a magnocellular pathway deficit in dyslexia*. Paper presented at the International Symposium on Dyslexia: Neuroanatomy, Physiology, Pathogenesis and Genetics, Hannover.
- Demb, J. B., Boynton, G. M. & Heeger, D. J. (1998). Functional Magnetic Resonance Imaging of Early Visual Pathways in Dyslexia. *Journal of Neuroscience*, *18*(17), 6939-6951.

- Demonet, J. F., Celsis, P., Nespoulous, J. L., Viillard, G., Marc-Vergnes, J. P. & Rascol, A. (1992). Cerebral blood flow correlates of word monitoring in sentences: influence of semantic incoherence. A spect study in normals. *Brain*, *115*, 1753-1768.
- Demonet, J. F., Price, C., Wise, R. & Frackowiak, R. S. J. (1994). A PET study of cognitive strategies in normal subjects during language tasks: Influence of phonetic ambiguity and sequence processing on phoneme monitoring. *Brain and Language*, *117*, 671-682.
- Demonet, J. F. & Thierry, G. (2001). Language and brain: what is up? What is coming up? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *23*(1), 49-73.
- Dilling, H., Mombour, W., Schmidt, M. H. & Schulte-Markwort, E. (Eds.). (1993). *Weltgesundheitsorganisation: Internationale Klassifikation psychischer Störungen (ICD-10 Kapitel V (F), klinisch-diagnostische Leitlinien)*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Eden, G. F., VanMeter, J. W., Rumsey, J. M. & Zeffiro, T. A. (1996). The visual deficit theory of developmental Dyslexia. *NeuroImage*, *4*, 108-117.
- Esser, G., Schmidt, M. H. & Blanz, B. (1993). Effect of timing and chronicity of stressors on the emotional development of children and adolescents. Results of a prospective epidemiologic longitudinal study of 8 to 18 years. *Zeitschrift für Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie*, *21*(2), 82-89.
- Fiebach, C. J., Friederici, A. D., Muller, K. & von Cramon, D. Y. (2002). fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(1), 11-23.
- Fiez, J. A. & Petersen, S. E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *95*, 914-921.
- Friston, K. J. (1997). Analysing brain images: Principles and overview. In R. S. J. Frackowiak & K. J. Friston & C. D. Frith & R. J. Dolan & J. C. Mazziotta (Eds.), *Human Brain Function*. San Diego: Academic Press.
- Friston, K. J. (2000). Experimental Design and Statistical Issues. In J. C. Mazziotta & A. W. Toga & F. R.S.J. (Eds.), *Brain Mapping. The Disorders*. San Diego: Academic Press.
- Friston, K. J., Frith, C. D., Turner, R. & Frackowiak, R. S. (1995b). Characterizing evoked hemodynamics with fMRI. *NeuroImage*, *2*(2), 157-165.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Poline, J. B., Grasby, P. J., Williams, S. C., Frackowiak, R. S. & Turner, R. (1995a). Analysis of fMRI time-series revisited. *NeuroImage*, *2*(1), 45-53.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Price, C. J., Buchel, C. & Worsley, K. J. (1999b). Multisubject fMRI studies and conjunction analyses. *NeuroImage*, *10*(4), 385-396.
- Friston, K. J., Holmes, A. P. & Worsley, K. J. (1999b). How Many Subjects Constitute a Study? *NeuroImage*, *10*, 1-5.
- Frith, C. D., Kapur, N., Friston, K. J., Liddle, P. F. & Frackowiak, R. S. J. (1995a). Regional zerebral activity associated with the incidental processing of pseudo-words. *Human Brain Mapping*, *3*, 153-160.
- Frith, U. (1981). Experimental approaches to developmental dyslexia: an introduction. *Psychological Research*, *43*, 97-109.
- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson & J. C. Marshall & M. Coltheart (Eds.), *Surface Dyslexia and Surface Dysgraphia in Adults and Children* (pp. 301-330). London: Routledge & Kegan - Paul.

- Frith, U., Landerl, K. & Frith, C. D. (1995b). Verbal fluency in dyslexia: further evidence for a phonological deficit. *Dyslexia*, 1, 2-11.
- Galaburda, A. M. (1993). Neurology of developmental dyslexia. *Current Opinion in Neurobiology*, 3(2), 237-242.
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F. & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals of Neurology*, 18(2), 222-233.
- George, M. S., Ketter, T. A., Parekh, P. I., Rosinsky, N., Ring, H., Casey, P. J., Trimble, M. R., Horwitz, B., Herscovitch, P. & Post, R. M. (1994). Regional brain activity when selecting response despite interference: An H²¹⁵O PET study of the Stroop and an emotional Stroop. *Human Brain Mapping*, 1, 194-209.
- Georgiewa, P., Rzanny, R., Gaser, C., Gerhard, U. J., Vieweg, U., Freesmeyer, D., Mentzel, H. J., Kaiser, W. A. & Blanz, B. (2002). Phonological processing in dyslexic children: a study combining functional imaging and event related potentials. *Neuroscience Letters*, 318(1), 5-8.
- Georgiewa, P., Rzanny, R., Hopf, J.-M., Knab, R., Glauche, V., Kaiser, W.-A. & Blanz, B. (1999). fMRI during word processing in dyslexic and normal reading children. *NeuroReport*, 10, 3459-3465.
- Gold, S., Christian, B., Arndt, S., Zeien, G., Cizadlo, T., Johnson, D. L., Flaum, M. & Andreasen, N. C. (1998). Functional MRI statistical software packages: A comparative analysis. *Human Brain Mapping*, 6(2), 73-84.
- Goutte, C., Toft, P., Rostrup, E., Nielsen, F. A. & Hansen, L. K. (1999). On clustering fMRI time series. *NeuroImage*, 9(3), 298-310.
- Grigorenko, E. L. (2001). Developmental dyslexia: An update on genes, brains, and environments. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 42(1), 91-125.
- Grigorenko, E. L., Wood, F. B., Meyer, M. S., Pauls, J. E. D., Hart, L. A. & Pauls, D. L. (2001). Linkage studies suggest a possible locus for developmental dyslexia on chromosome 1p. *American Journal of Medical Genetics*, 105(1), 120-129.
- Gross-Glenn, K., Duara, R., Barker, W., Lowenstein, D., Chang, J.-Y., Yoshii, F., Apicella, A. M., Pascal, S., Boothes, T., Seuush, S., Jallad, B. J., Novoa, L. & Lubs, H. A. (1991). Positron emission tomographic studies during serial word-reading by normal and dyslexic adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 13(4), 531-544.
- Gutbrod, K., Nirkko, A. C., Ozdoba, C., Bürki, M., Degonda, N., Heinemann, D., Lövblad, K. O., Schroth, G. & Schnider, A. (2000). Segregation of orthographic, phonological, semantic, and syntactic language areas in functional magnetic resonance imaging. *NeuroImage*, 11(2), 312.
- Heller, K. A., Kratzmeier, H. & Lengfelder, A. (1998). *Matrizen-Test-Manual, Bd. 1. Ein Handbuch zu den Standard Progressive Matrices von J.C. Raven*. Göttingen: Beltz-Testgesellschaft.
- Hildebrandt, H. (1998). *Pschyrembel klinisches Wörterbuch*. Berlin: De Gruyter.
- Holland, S. K., Plante, E., Byars, A. W., Strawsburg, R. H., Schmithorst, V. J. & Ball Jr., W. S. (2001). Normal fMRI Brain Activation Patterns in Children Performing a Verb Generation Task. *NeuroImage*, 14, 837-843.

- Holmes, A. P. & Friston, K. J. (1998). Generalizability, random effects, and population inference. *NeuroImage*, 7, 754.
- Horwitz, B., Rumsey, J. M. & Donohue, B. C. (1998). Functional connectivity of the angular gyrus in normal reading and dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 95, 8939-8944.
- Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, W. D., Friston, K., Weiller, C. & Frackowiak, R. (1992). The cortical localisation of the lexicons. *Brain*, 115, 1769-1782.
- Huber, P., Gutbrod, K., Ozdoba, C., Nirkko, A., Lövlblad, K. O. & Schroth, G. (2000). Zur Geschichte der Aphasologie. *Schweizerische Medizinische Wochenschrift*, 130, 49-59.
- Indefrey, P., Kleinschmidt, A., Merboldt, K.-D., Krüger, G., Brown, C., Hagoort, P. & Frahm, J. (1997). Equivalent responses to lexical and nonlexical visual stimuli in occipital cortex: a functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 5, 78-81.
- Indefrey, P. & Levelt, W. J. M. (2000). The neural correlates of language production. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The new cognitive neurosciences* (pp. 856-865). Cambridge: MIT Press.
- Jäger, A. O. (1974). *Rechtschreibtest R-T* (D. G. f. Personalwesen, Trans. Hogrefe). Göttingen: Verlag für Psychologie - Hogrefe.
- Jorm, A. & Share, D. (1983). Phonological recoding and reading acquisition. *Applied Psycholinguistics*, 4, 103-147.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., Keller, T. A., Eddy, W. F. & Thulborn, K. R. (1996). Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science*, 274(5284), 114-116.
- Küspert, P. & Schneider, W. (2000). *Hören, lauschen, lernen. Sprachspiele für Kinder im Vorschulalter. Würzburger Trainingsprogramm zur Vorbereitung auf den Erwerb der Schriftsprache* (2. Auflage).
- Lancaster, J. L., Fox, P. T., Mikiten, S. & Rainey, L. (1997). Talairach Daemon. http://ric.uthscsa.edu/td_applet/.
- Lassen, N. A., Ingvar, D. H. & Skinhoj, E. (1978). Brain function and blood flow. *Scientific American*, 239(4), 62-71.
- Lewis, B. (1992). Pedigree analysis of children with phonology disorders. *Journal of Learning Disabilities*, 9, 586-597.
- Ligges, M. (1999). *fMRT-Untersuchung zentralnervöser Aktivierung bei phobogener Stimulation*. Unveröff. Dipl. Arbeit., Universität Trier.
- Linder, M. & Grisseemann, H. (1998). *Zürcher Lesetest (ZLT)* (Vol. 5. überarb. und erg. Aufl.). Bern Göttingen Toronto Seattle: Verlag Hans Huber.
- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W. & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 88, 7943-7947.
- Lurito, J. T., Kareken, D. A., Lowe, M. J., Chen, S. H. A. & Mathews, V. P. (2000). Comparison of rhyming and word generation with fMRI. *Human Brain Mapping*, 10, 99-106.
- Madden, D. J., Turkington, T. G., Coleman, R. E., Provenzale, J. M., DeGrado, T. R. & Hoffmann, J. M. (1996). Adult age Differences in regional cerebral blood flow during visual word identification: evidence from H2150 PET. *NeuroImage*, 3(2), 127-142.

- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1986). *Parallel distributed processing: explorations in the microstructures of cognition: Vol2. Psychological and biological models*. Cambridge, MA: MIT Press.
- McGuire, P. K., Paulesu, E., Frackowiak, R. S. J. & Frith, C. D. (1996). Brain activity during stimulus independent thought. *NeuroReport*, 7, 2095-2099.
- Mellet, E., Tzourio, N., Denis, M. & Mazoyer, B. (1998). Cortical anatomy of mental imagery of concrete nouns based on their dictionary definition. *NeuroReport*, 9(5), 803-808.
- Menard, M. T., Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Alpert, N. M. & Rauch, S. L. (1996). Encoding words and pictures: a positron emission tomography study. *Neuropsychologia*, 34(3), 185-194.
- Missimer, J., Knorr, U., Maguire, R. P., Herzog, H., Seitz, R. J., Tellman, L. & Leenders, K. L. (1999). On two methods of statistical image analysis. *Human Brain Mapping*, 8(4), 245-258.
- Möller, U., Galicki, R. M., Baresová, E. & Witte, H. (1998). An efficient vector quantizer providing globally optimal solutions. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 46, 2515-2529.
- Möller, U., Ligges, M., Georgiewa, P., Grünling, C., Kaiser, W. A., Blanz, B. & Witte, H. (2002). How to avoid spurious cluster validation? A methodological investigation on simulated and fMRI data. *NeuroImage*, in press.
- Möller, U., Ligges, M., Grünling, C., Georgiewa, P., Kaiser, W. A., Witte, H. & Blanz, B. (2001). Pitfalls in the clustering of neuroimage data and improvements by global optimization strategies. *NeuroImage*, 14(1), 206-218.
- Nobre, A. C., Allison, T. & McCarthy, G. (1998). Modulation of human extrastriate visual processing by selective attention to colours and words. *Brain*, 121(7), 1357-1368.
- Nobre, A. C. & McCarthy, G. (1994). Language - related ERPs: Modulation by word type and semantic priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6, 233-255.
- Nobre, A. C. & McCarthy, G. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: II. Effects of word type and semantic priming. *The Journal of Neuroscience*, 15(2), 1090-1098.
- Noterdaeme, M. (2000). *Die Bedeutung genetischer, biologischer und psychosozialer Risiken*. Paper presented at the 6. Münchner kinder- und jugendpsychiatrischen Frühjahrsymposiums über Entwicklungsstörungen, München.
- Ortmann, W. D. (1976). *Hochfrequente deutsche Wortformen II*. München: Druckerei Kemmler.
- Paap, K. R. & Noel, R. W. (1991). Dual-route models of print to sound: Still a good horse race. *Psychological Research*, 53, 13-24.
- Paulesu, E., Demonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cossu, G., Habib, M., Frith, C. D. & Frith, U. (2001). Dyslexia: Cultural diversity and biological unity. *Science*, 291(5511), 2165-2167.
- Paulesu, E., Frith, C. D. & Frackowiak, R. S. J. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362, 342-345.
- Paulesu, E., Frith, U., Snowling, M., Gallagher, A., Morton, J., Frackowiak, R. S. J. & Frith, C. D. (1996). Is developmental dyslexia a disconnection syndrom? Evidence from PET scanning. *Brain*, 119, 143-157.

- Paulesu, E., Goldacre, C., Scifo, P., Cappa, S. F., Gilardi, M. C., Castiglioni, I., Perani, D. & Fazio, F. (1997). Functional heterogeneity of left inferior frontal cortex as revealed by fMRI. *NeuroReport*, 8(8), 2011-2016.
- Paulesu, E., McCrory, E., Fazio, F., Menoncello, L., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cotelli, M., Cossu, G., Corte, F., Lorusso, M., Pesenti, S., Gallagher, A., Perani, D., Price, C., Frith, C. D. & Frith, U. (2000). A cultural effect on brain function. *Nature neuroscience*, 3(1), 91-96.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M. & Raichle, M. E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331, 585-589.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M. & Raichle, M. E. (1989). Positron Emission Tomographic Studies of the Processing of Single Words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1(2), 153-170.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Snyder, A. Z. & Raichle, M. E. (1990). Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science*, 249(4972), 1041-1104.
- Petersen, S. E., van Mier, H., Fiez, J. A. & Raichle, M. E. (1998). The effects of practice on the functional anatomy of task performance. *Proceedings of the National Academy of Science*, 95, 853-860.
- Pizzi, N. J., Vivanco, R. A. & R.L., S. (2001). EvIdent(TM): a functional magnetic resonance image analysis system. *Artificial Intelligence in Medicine*, 21, 263-269.
- Posner, M. I., Abdullaev, Y. G., McCandliss, B. D. & Sereno, S. C. (1999). Anatomy, Circuitry And Plasticity Of Word Reading. In J. Everatt (Ed.), *Reading and Dyslexia: visual and attentional processes* (pp. 137-162). London: Routledge.
- Posner, M. I. & Raichle, M. E. (1994). *Images of Mind: Exploring the Brain's Activity*. New York: W.H. Freeman & Co. (Scientific American Library, NY).
- Posner, M. I. & Raichle, M. E. (1998). The neuroimaging of human brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95, 763-764.
- Poustka, F. (1999). *Umschriebene Entwicklungsstörungen schulischer Fertigkeiten. Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Kinder- und Jugendpsychiatrie und -psychotherapie, AWMF-Leitlinien-Register Nr. 028/017 unter <http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/11/kjpp-017.htm>*.
- Pregel, D. & Rickheit, G. (1987). *Der Wortschatz im Grundschulalter: Häufigkeitwörterbuch zum verbalen, substantivistischen und adjektivistischen Wortgebrauch*. Hildesheim: Georg Olms AG.
- Price, C. J., Howard, D., Patterson, K., Warburton, E. A., Friston, K. J. & Frackowiak, R. S. J. (1998). A functional neuroimaging description of two deep dyslexic patients. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(3), 303-315.
- Price, C. J., Moore, C. J. & Frackowiak, R. S. J. (1996). The effect of varying stimulus rate and duration on brain activity during reading. *NeuroImage*, 3, 40-52.
- Price, C. J., Moore, C. J. & Friston, K. J. (1997). Subtractions, Conjunctions, and Interactions in Experimental Design of Activation Studies. *Human Brain Mapping*, 5, 264-272.
- Price, C. J., Wise, R. J., Watson, J. D., Patterson, K., Howard, D. & Frackowiak, R. S. (1994). Brain activity during reading. The effects of exposure duration and task. *Brain*, 117(Pt 6), 1255-1269.

- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R., Shaywitz, S. E. & Shaywitz, B. A. (2000a). Functional neuroimaging studies of reading and reading disability (developmental dyslexia). *Mental Retardation and Developmental Disability Research Review*, 6(3), 207-213.
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Skudlarski, P., Marchione, K. E., Jenner, A. R., Fletcher, J. M., Liberman, A. M., Shankweiler, D. P., Katz, L., Lacadie, C. & Gore, J. C. (2000b). The angular gyrus in developmental dyslexia: task-specific differences in functional connectivity within posterior cortex. *Psychological science*, 11(1), 51-56.
- Pugh, K. R., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Bronen, R. A., Shankweiler, D. P., Katz, L., Fletcher, J. M. & Gore, J. C. (1996). Cerebral organization of component processes in reading. *Brain*, 119, 1221-1238.
- Pugh, K. R., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Shankweiler, D. P., Katz, L., Fletcher, J. M., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Bronen, R. A., Lacadie, C. & Gore, J. C. (1997). Predicting reading performance from neuroimaging profiles: the cerebral basis of phonological effects in printed word identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(2), 299-318.
- Raichle, M. E., Fiez, J. A., Videen, T. O., MacLeod, A. K., Pardo, J. V., Fox, P. T. & Petersen, S. E. (1994). Practice-related changes in human brain functional anatomy during non-motor learning. *Cerebral Cortex*, 4, 8-26.
- Rathenow, P. (1980a). *Westermann Rechtschreibtest 4/5*. Braunschweig: Georg Westermann Verlag.
- Rathenow, P. (1980b). *Westermann Rechtschreibtest 6+*. Braunschweig: Georg Westermann Verlag.
- Raven, J. C. (1998). *Matrizen-Test-Manual Band 2*. Göttingen: Beltz-Test GmbH.
- Reiser, M. & Semmler, W. (1997). *Magnetresonanztomographie*. Berlin: Springer.
- Rumsey, J. M., Andreason, P., Zametkin, A. J., Aquino, T., King, A. C., Hamburger, S. D., Pikus, A., Rapoport, J. L. & Cohen, R. M. (1992). Failure to activate the left temporoparietal cortex in dyslexia: an oxygen-15 positron emission tomographic study. *Archives of Neurology*, 49, 527-534.
- Rumsey, J. M., Andreason, P., Zametkin, A. J., King, A. C., Hamburger, S. D., Aquino, T., Hanahan, A. P., Pikus, A. & Cohen, R. M. (1994). Right frontotemporal activation by tonal memory in dyslexia, an O-15 PET Study. *Biological Psychiatry*, 36, 153-170.
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K. L., Maisog, J. M. & Andreason, P. (1999). A functional lesion in developmental dyslexia: left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain and Language*, 70, 187-204.
- Rumsey, J. M., Nace, K., Donohue, B., Wise, D., Maisog, J. M. & Andreason, P. (1997). A positron emission tomographic study of impaired word recognition and phonological processing in dyslexic men. *Archives of Neurology*, 54, 562-573.
- Salmelin, R., Service, E., Kiesilä, P., Uutela, K. & Salonen, O. (1996). Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetencephalography. *Annals of Neurology*, 40(2), 157-162.
- Scheerer-Neumann, G. (1993). Interventions in developmental reading and spelling disorders. In H. Grimm & H. Skowronek (Eds.), *Language acquisition problems and reading disorders* (pp. 319-352). Berlin: de Gruyter.

- Schneider, W. & Näslund, J. C. (1993). The impact of early metalinguistic competencies and memory capacities on reading and spelling in elementary school: Results of the Munich Longitudinal Study on the Genesis of individual competencies (LOGIC). *European Journal of Psychology of Education*, 8, 273-288.
- Schulte-Körne, G. (1999). Die Bedeutung von phonologischer Bewusstheit, passiver und aktiver Sprachwahrnehmung für die Lese-Rechtschreibfähigkeit. *Habilitationsschrift*.
- Schulte-Körne, G., Deimel, W. & Remschmidt, H. (2001a). Zur Diagnostik der Lese-Rechtschreibstörung. *Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie*, 29(2).
- Schulte-Körne, G. (2001b). Annotation: Genetics of Reading and Spelling Disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 42(8), 985-997.
- Schulte-Körne, G. S., Deimel, W., Bartling, J. & Remschmidt, H. (1998). Auditory processing and dyslexia: evidence for a specific speech processing deficit. *NeuroReport*, 9(2/26), 337-340.
- Seidenberg, M. S. (1985). The time course of phonological code activation in two writing systems. *Cognition*, 19, 1-30.
- Sergent, J., Zuck, E., Levesque, M. & MacDonald, B. (1992). Positron emission tomography study of letter and object processing: empirical findings and methodological considerations. *Cerebral Cortex*, 2(1), 68 - 80.
- Seymour, P. H. K. & McGregor, C. J. (1984). Developmental dyslexia: A cognitive experimental analysis of phonological, morphemic and visual impairments. *Cognitive Neuropsychology*, 1, 43-82.
- Shaywitz, S. E. (1996). Dyslexia. *Scientific American*, 275(5), 78-84.
- Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Constable, R. T., Shaywitz, S. E., Bronen, R. A., Fulbright, R. K., Shankweiler, D. P., Katz, L., Fletcher, J. M., Skudlarsky, P. & Gore, J. C. (1995). Localization of semantic processing using functional magnetic resonance imaging. *Human Brain Mapping*, 2, 149-158.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Mencl, W. E., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fletcher, J. M., Lyon, G. R. & Gore, J. C. (2001). The neurobiology of dyslexia. *Clinical Neuroscience Research*, 1(4), 291-299.
- Shaywitz, S. E., Escobar, M. D., Shaywitz, B. A., Fletcher, J. M. & Makuch, R. (1992). Dyslexia - Reply. *New England Journal of Medicine*, 327(4), 280 - 281.
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Fletcher, J. M. & Escobar, M. D. (1990). Prevalence of reading disability in boys and girls. Results of the Connecticut Longitudinal Study. *Journal of the American Medical Association : JAMA*, 264(8), 998-1002.
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Mencl, W. E., Shankweiler, D. P., Liberman, A. M., Skudlarski, P., Fletcher, J. M., Katz, L., Marchione, K. E., Lacadie, C., Gatenby, C. & Gore, J. C. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95, 2636-2641.
- Simos, P. G., Breier, J. I., Wheless, J. W., Maggio, W. W., Fletcher, J. M., Castillo, E. M. & Papanicolaou, A. C. (2000). Brain mechanisms for reading: the role of the superior temporal gyrus in word and pseudoword naming. *NeuroReport*, 11(11), 2443-2447.
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., Davis, R. N., Fitzgerald, M. & Papanicolaou, A. C. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58(8), 1203-1213.

- Snowling, M. J. (1981). Phonemic Deficits in Developmental Dyslexia. *Psychological Research*, 43, 219-234.
- Snowling, M. J. (1991). Developmental reading disorders. *Icpp*, 32(1), 49-77.
- Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia*. Oxford: Blackwell Publishers.
- SPM. (1999). Statistical Parametric Mapping. <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>.
- SPSS, Inc. copyright. (1989-2000). SPSS für Windows (Version 10.1.3).
- Stanovich, K. E. (1988). Explaining the difference between the dyslexic and the garden - variety poor reader. The phonological core variable - difference model. *Journal of Learning Disabilities*, 21, 590-612.
- Stehling, M. K., Turner, R. & Mansfield, P. (1991). Echo-planar imaging: magnetic resonance imaging in a fraction of a second. *Science*, 254(5028), 43-50.
- Stevens, J. (1996). *Applied multivariate statistics for the social sciences* (3. Auflage). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain. 3-Dimensional Proportional System: An Approach to Cerebral Imaging*. Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag.
- Talairach, J. & Tournoux, P. (1993). *Referentially Oriented Cerebral MRI Anatomy. Atlas of Stereotaxic Anatomical Correlations for Gray and White Matter*. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- Temple, E. (2002). Brain mechanisms in normal and dyslexic readers. *Current opinion in neurobiology*, 12(2), 178-183.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Protopapas, A., Nagarajan, S., Salz, T., Tallal, P., Merzenich, M. M. & Gabrieli, J. D. (2000). Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia: evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 97(25), 13907-13912.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Salidis, J., Deutsch, G. K., P., T., Merzenich, M. M. & Gabrieli, J. D. (2001). Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children: an fMRI study. *NeuroReport*, 12(2), 299-307.
- Theodoridis, S. & Koutroumbas, K. (1998). *Pattern Recognition*. San Diego: Acad. Press.
- Thierry, G., Doyon, B. & Demonet, J. F. (1998). ERP mapping in phonological and lexical semantic monitoring tasks: A study complementing previous PET results. *NeuroImage*, 8(4), 391-408.
- Vanni, S., Uusitalo, M. A., Kiesila, P. & Hari, R. (1997). Visual motion activates V5 in dyslexics. *NeuroReport*, 8(8), 1939-1942.
- Warburton, E., Wise, R. J., Price, C. J., Weiller, C., Hadar, U., Ramsay, S. & Frackowiak, R. S. (1996). Noun and verb retrieval by normal subjects. Studies with PET. *Brain*, 119, 159-179.
- Warnke, A. (1990). *Legasthenie und Hirnfunktion: Neuropsychologische Befunde zur visuellen Informationsverarbeitung*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Warnke, A. (1999). *Legasthenie - 25 Jahre Forschung - Rückblick und Ausblick*. Paper presented at the International Symposium on Dyslexia: Neuroanatomy, Physiology, Pathogenesis and Genetics, Würzburg.
- Warnke, A. (2000). Umschriebene Entwicklungsstörungen (Teilleistungsstörungen). In H. Remschmidt (Ed.), *Kinder- und Jugendpsychiatrie. Eine praktische Einführung* (Vol. 3. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Stuttgart; New York: Thieme.

- Warnke, A., Remschmidt, H. & Henninghausen, K. (1994). Verbal information processing in dyslexia-data from a follow-up experiment of neuro-psychological aspects and EEG. *Acta Paedopsychiatria*, 56(3), 203-208.
- Weis, S., Grande, M., Pollrich, S., Willmes, K. & Huber, W. (2001). Processing of homonyms: a functional mri study on the separation of word forms from concepts. *Cortex*, 37, 745-749.
- Wimmer, H. (1996). The nonword reading deficit in developmental dyslexia: evidence from children learning to read german. *Journal of Experimental Child Psychology*, 61, 80-90.
- Worsley, K. J., Evans, A. C., Marrett, S. & Neelin, P. (1992). A three-dimensional statistical analysis for CBF activation studies in human brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 12(6), 900-918.
- Worsley, K. J. & Friston, K. J. (1995). Analysis of fMRI time-series revisited - Again. *NeuroImage*, 2, 173-181.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E. & Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256, 846-849.

9 Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Erklärung |
|-------------|--|
| ALM | Allgemeines Lineares Modell |
| BA | Brodman Areal |
| BOLD | Blood Oxygenation Level-Dependent |
| BS | Buchstaben; Buchstabenabgleich |
| d2 | Aufmerksamkeits-Belastungs-Test |
| DSM-IV | Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders |
| EEG | Elektro-Enzephalographie |
| efMRI | Ereigniskorreliertes fMRI („event-related“ fMRI) |
| EPI | Echo-Planar-Imaging |
| ERTS | Experimental Run Time System |
| FA | Flip angle |
| fMRI / fMRT | Funktionelle Magnetresonanztomographie (Bildgebung / Technik) |
| FOV | Field Of View; Gehirnbereich der mit MRI abgebildet wird |
| ICD-10 | International Classification of Diseases and Related Health Problems |
| IQ | Intelligenzquotient |
| KE | Kontrollerwachsene (normallesende Erwachsene) |
| KJ | Kontrolljugendliche (normallesende Jugendliche) |
| KK | Kontrollkinder (normallesende Kinder) |
| KL | Konzentrationsleistungswert |
| LE | Erwachsene mit LRS |
| LJ | Jugendliche mit LRS |
| LK | Kinder mit LRS |
| LRS | Lese-Rechtschreibstörung |
| MEG | Magnetencephalographie |
| MRT | Magnetresonanztomographie |
| n.s. | nicht signifikant |
| NWL | Nonwortlesen |
| NWR | Nonwortreimen |
| PET | Positronen Emissions Tomographie |
| REA | „Random Effects“-Analyse |
| RT | Rechtschreibungstest |
| SL | Slashes; Slashpaarabgleich |
| SPM | Statistical Parametric Mapping |
| TE | Echozeit |
| TR | Repetitionszeit. Zeit zwischen zwei HF-Anregungspulsen |
| WL | Wortlesen (hochfrequente Wörter) |
| WRT | Weingartener Grundwortschatz Rechtschreibtest |
| ZLT | Zürcher Lesetest |

Abkürzungen der Gehirnregionen (Lokalisationen)

| | | | |
|--------|--------------------------|----------------|--------------------------------|
| IFG | Inferior Frontal Gyrus | Parahippoc. G. | Parahippocampal Gyrus |
| IOG | Inferior Occipital Gyrus | SFG | Superior Frontal Gyrus |
| IPG | Inferior Parietal Gyrus | SFL | Superior Frontal Lobe |
| IPL | Inferior Parietal Lobe | SMA | Supplementär Motorisches Areal |
| Limbic | Limbic Lobe | SOG | Superior Occipital Gyrus |
| MeFG | Medial Frontal Gyrus | SPL | Superior Parietal Lappen |
| MFG | Middle Frontal Gyrus | STG | Superior Temporal Gyrus |
| MOG | Middle Occipital Gyrus | Supramarg. G. | Gyrus supramarginalis |
| MTG | Middle Temporal Gyrus | TransTG | Transverse Temporal Gyrus |

Anhang A (Wortlisten)

◆ Wortliste phonologische Bewusstheit (PB) für zweite bis vierte Klasse

Aufgabe: Ersetze die Selbstlaute durch i !

| | | | |
|--------|----------|-----------|------------|
| 1. Fuß | 6. Glas | 11. Ente | 16. Vogel |
| 2. Tag | 7. Fuchs | 12. Krone | 17. Unfall |
| 3. Ohr | 8. Wolf | 13. Nagel | 18. Hafen |
| 4. Bus | 9. Draht | 14. Affe | 19. Backe |
| 5. Reh | 10. Zelt | 15. Tasse | 20. Abend |

◆ Wortliste PB für Kinder ab der fünften bis zur neunten Klasse

Aufgabe: Setze den ersten Buchstaben des Wortes an das Ende des Wortes und füge dann -ein an.

Bsp.: Plan - Lanpein

| | | | |
|----------|-----------|-------------|-------------|
| 1. Ball | 6. Stirn | 11. Haken | 16. Truhe |
| 2. Platz | 7. Turm | 12. Flasche | 17. Nadel |
| 3. Wald | 8. Plan | 13. Boden | 18. Plastik |
| 4. Kleid | 9. Nest | 14. Stube | 19. Kamel |
| 5. Huhn | 10. Knopf | 15. Decke | 20. Glatze |

◆ Wortliste PB für Jugendliche ab der neunten Klasse und Erwachsene

Aufgabe: Setze den ersten Buchstaben des Wortes an das Ende des Wortes und füge dann -ein an.

Bsp.: Kleid - Leidkein

| | | | |
|-----------|------------|------------|-------------|
| 1. Berge | 6. Laute | 11. Krone | 16. Nebel |
| 2. Drama | 7. Pfennig | 12. Marmor | 17. Zweige |
| 3. Firma | 8. Tempel | 13. Klage | 18. Handel |
| 4. Grenze | 9. Platte | 14. Roman | 19. Prozess |
| 5. Kirche | 10. Winter | 15. Spitze | 20. Feder |

◆ Wortliste zur phonologischen Dekodierfähigkeit (PD) für Kinder der zweiten Klasse: einsilbige sinnvolle Wörter und Nichtwörter

Aufgabe: Lies die Wörter der Reihe nach laut vor!

Sinnvolle Wörter:

| | | |
|------|-------|-------|
| Haus | Arm | Dach |
| Ball | Tisch | Spaß |
| Rad | Zahn | Blatt |
| Fuß | Wald | Knie |
| Ohr | Eis | Stein |

Nichtwörter:

| | | |
|------|-------|-------|
| Kaus | Irm | Zach |
| Balk | Nisch | Spak |
| Lad | Zaht | Klatt |
| Fup | Rald | Knir |
| Ohl | Eib | Steit |

◆ **Wortliste zur phonologischen Dekodierfähigkeit für Kinder der zweiten Klasse: dreisilbige sinnvolle Wörter und Nichtwörter**

Aufgabe: Lies die Wörter der Reihe nach laut vor!

Sinnvolle Wörter:

| | | |
|------------|-------------|-------------|
| Kaninchen | Geburtstag | Großmutter |
| Fernsehen | Abschlepper | Anhänger |
| Königin | Krokodil | Lastwagen |
| Autobahn | Geschichte | Radfahrer |
| Prinzessin | Eisenbahn | Krankenhaus |

Nichtwörter:

| | | |
|------------|-------------|-------------|
| Kanuncher | Gabartstig | Grußmettur |
| Lernsahen | Alschlupper | Abhungir |
| Känuga | Kludedal | Lestwugga |
| Eutabehn | Guschachte | Redfuhrer |
| Prunsassin | Ausenbuck | Krickenhies |

◆ **Wortliste zur phonologischen Dekodierfähigkeit für Kinder der dritten und vierten Klasse: einsilbige sinnvolle Wörter und Nichtwörter**

Aufgabe: Lies die Wörter der Reihe nach laut vor!

Sinnvolle Wörter:

| | | |
|------|-------|-------|
| Jahr | Glas | Kinn |
| Sand | Zelt | Punkt |
| Bein | Fisch | Loch |
| Luft | Stirn | Draht |
| Buch | Zeit | Baum |

Nichtwörter:

| | | |
|------|-------|-------|
| Mahr | Glad | Linn |
| Sang | Zelk | Sunkt |
| Beid | Kisch | Boch |
| Luff | Stirl | Drahl |
| Nuch | Zeim | Bauk |

◆ **Wortliste zur phonologischen Dekodierfähigkeit für Kinder der dritten und vierten Klasse: dreisilbige sinnvolle Wörter und Nichtwörter**

Aufgabe: Lies die Wörter der Reihe nach laut vor!

Sinnvolle Wörter:

| | | |
|-------------|-------------|---------------|
| Weihnachten | Schäferhund | Polizei |
| Kasperle | Brennessel | Schwesterchen |
| Fledermaus | Schildkröte | Geschichte |
| Geschwister | Bürgersteig | Motorrad |
| Elefant | Cousine | Doppelbett |

Nichtwörter

| | | |
|-------------|-------------|---------------|
| Wauhnichter | Schuferkend | Palozau |
| Kusperla | Brannissel | Schwastarchin |
| Fludermies | Schaldrate | Gaschuchte |
| Gaschwustar | Bargerstieg | Mutturred |
| Alufint | Keusane | Deppelbratt |

◆ **Wortliste zur PD für Kinder der fünften bis zum Ende der neunten Klasse: einsilbige sinnvolle Wörter u. Nichtwörter**

Aufgabe: Lies die Wörter der Reihe nach laut vor!

Sinnvolle Wörter:

| | | |
|-------|-------|--------|
| Spiel | Fell | Schluß |
| Witz | Blick | Stall |
| Pfau | Dach | Zug |
| Griff | Knopf | Heu |
| Kies | Tuch | Gold |

Nichtwörter:

| | | |
|-------|-------|--------|
| Spien | Nell | Schlut |
| Ritz | Blich | Stalk |
| Pfas | Vach | Mug |
| Briff | Knoff | Keu |
| Kiem | Duch | Golg |

◆ **Wortliste zur PD für Kinder der fünften bis zum Ende der neunten Klasse: dreisilbige sinnvolle Wörter u. Nichtwörter**

Aufgabe: Lies die Wörter der Reihe nach laut vor!

Sinnvolle Wörter:

| | | |
|----------------|----------------|-------------|
| Achterbahn | Tortenschlacht | Pappdeckel |
| Lenkstange | Reißverschluß | Metzgerei |
| Bauernhof | Sessellift | Blumenbeet |
| Mülleimer | Hubschrauber | Strohballen |
| Bauchklatscher | Eichhörnchen | Feuerchen |

Nichtwörter:

| | | |
|----------------|----------------|-------------|
| Uchterbuhn | Turtenschlicht | Pippdickel |
| Lankstenge | Raußvarschleiß | Mutzgarau |
| Beierhaf | Sussellaft | Blimenbert |
| Millümar | Scheuberhab | Strihbellar |
| Beichklutschar | Auchhernchen | Fauercher |

◆ **Wortliste zur phonologischen Dekodierfähigkeit für Erwachsene**

Aufgabe: Lesen Sie die Wörter der Reihe nach laut vor!

Sinnvolle Wörter:

| | | |
|----------------|---------------|-----------------|
| Namen | Kultur | Anmut |
| Verhältnisse | Verbesserung | Verteidiger |
| Meinung | Kohlen | Substanz |
| Gelegenheit | Gefangenen | Vollkommenheit |
| Herzog | Pulver | Klima |
| Paragraphen | Übersetzung | Intelligenz |
| Umstand | Ketten | Hinweis |
| Forderungen | Oberfläche | Angeklagte |
| Unrecht | Ladung | Fortdauer |
| Eigenschaften | Übertragung | Bequemlichkeit |
| Praxis | Gründung | Gleichheit |
| Anerkennung | Beteiligung | Rechtsbelehrung |
| Prozess | Messer | Pöbel |
| Beschaffenheit | Korrespondenz | Agitation |
| Phosphor | Drama | Deutung |
| Philosophie | Operation | Kleinigkeiten |

◆ **Wortliste zur phonologischen Dekodierfähigkeit für Erwachsene**

Aufgabe: Lesen Sie die Wörter der Reihe nach laut vor!

Nichtwörter:

| | | |
|----------------|---------------|-----------------|
| Momen | Nislum | Emnat |
| Werpültnasse | Backtolisung | Warligartur |
| Tienang | Lopdap | Paksrann |
| Diligentrut | Denasrelma | Vannlummenkaut |
| Gerzug | Verras | Tröna |
| Benaplieren | Ännarzukung | Lankastibaz |
| Fartamm | Lullan | Sanwiss |
| Kuntaplaste | Odarklaste | Emredanbar |
| Uplecht | Fonmas | Kannbied |
| Löckelzarften | Üfarbraling | Biquamhäutierk |
| Stuvis | Mücklaun | Glanpfiert |
| Inerfausing | Fatelaunung | Rackstungedarst |
| Hetreß | Ressam | Kätal |
| Lemfassdartaut | Kirasklundanz | Abuletaun |
| Drossgar | Pafta | Daustag |
| Klinarogtal | Adarkanta | Greunagtauten |

Anhang B (Stimulusmaterial - fMRI)

◆ **Wortlesen (WL; 1-6):** Wörter (hochfrequent) werden pro Block in einer vorgegebenen Reihenfolge dargeboten.

| WL_1 | WL_2 | WL_3 | WL_4 | WL_5 | WL_6 | | | | | | |
|------------|------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Dorf | Dorf | Kind | Knie | Doktor | Doktor | Schiff | Schritt | Paar | Park | Wind | Witz |
| Zeichen | Zeitung | Eingang | Eingang | Brücke | Bühne | Bahnhof | Bahnhof | Wohnung | Wohnung | Stelle | Steuer |
| Becher | Bauer | Hand | Hang | Hals | Haus | Unterricht | Unterricht | Stuhl | Sturm | Zuschauer | Zuschauer |
| Familie | Familie | Rolle | Rolle | Freitag | Freitag | Acker | Alter | Versehen | Verwandte | Klappe | Klasse |
| Pause | Pflanze | Bewegung | Beschreibung | Vater | Vetter | Werkzeug | Werkzeug | Griff | Griff | Nest | Nest |
| Kleid | Kleid | Küche | Kirche | Interesse | Interesse | Treppe | Teller | Schild | Schlaf | Brunnen | Brunnen |
| Mitteilung | Munition | Flasche | Flasche | Haustür | Haustür | Freundin | Freundin | Weihnachten | Weihnachten | Nachbarschaft | Nachmittag |
| Blume | Blume | Fieber | Finger | Hälfte | Hilfe | Großmutter | Großmutter | Weile | Wille | Glück | Glück |
| Stadt | Stadt | Mädchen | Mädchen | Pferd | Pferd | Loch | Land | Eisenbahn | Eisenbahn | Sommer | Sonne |
| Garten | Graben | Mann | Mund | Salz | Sand | Wand | Wald | Moment | Moment | Stückchen | Stückchen |
| Wiege | Winter | Geschwindigkeit | Geschwindigkeit | Jahr | Jahr | Dienstag | Dienstag | Sitz | Stirn | Decke | Deckel |
| Platz | Prinz | Tasche | Tasche | Vorstellung | Vorstellung | Teil | Tier | Onkel | Ostern | Wagen | Wasser |
| Sonnabend | Sonnabend | Gewitter | Geschwister | Woche | Wolle | Verkäufer | Verbrecher | April | April | Kilometer | Kilometer |
| Bach | Bahn | Rätsel | Räuber | Regen | Rücken | Entschuldigung | Entschuldigung | Freude | Feuer | Kaffee | Kaffee |
| Kreis | Kreuz | Baum | Baum | Zeit | Zeit | Ende | Erde | Rock | Rock | Mantel | Mauer |
| Monat | Montag | Mensch | Mensch | Zylinder | Zylinder | Gleichgewicht | Gleichgewicht | Schleier | Scheibe | Berg | Bord |
| Reihe | Reihe | Glocke | Größe | Gelb | Geld | Ball | Bett | Schwester | Schwester | Schlafzimmer | Schlafzimmer |
| Freund | Freund | Verband | Verkehr | Stein | Spiel | Lehre | Leute | Unterhaltung | Unterhaltung | Gang | Gast |
| Aufregung | Augenblick | Donnerstag | Donnerstag | Nachbar | Nachbar | Seite | Seite | Fahrt | Fahrt | Geschäft | Geschäft |
| Gewehr | Gewehr | Fleck | Fleck | Geburtstag | Geschichte | Punkt | Punkt | Tafel | Tante | Name | Nase |
| Tisch | Trost | Vogel | Vorrat | Prinzessin | Prinzessin | Höhle | Hotel | Durst | Durst | Minute | Minute |
| Aufgabe | Aufgabe | Hauptmann | Hauptmann | Bank | Band | Kunststück | Kunststück | Dame | Daumen | Schnee | Schnee |
| König | Körper | Stück | Stock | Schlüssel | Schlüssel | Schule | Schlange | Glas | Gras | Polizei | Porzellan |
| Fenster | Fenster | Glut | Glut | Angst | Arzt | Buch | Blut | Kaufmann | Kaufmann | Zimmer | Zimmer |
| Urlaub | Urlaub | Messer | Meter | Muster | Mutter | Milch | Milch | Leder | Lehrer | Junge | Junge |
| Leib | Lied | Besuch | Besuch | Linie | Linie | Musik | Musik | Gefühl | Gefühl | Hoch | Holz |
| Essen | Essen | Dach | Dank | Stunde | Stunde | Wunde | Wunder | Idee | Idee | Bein | Bein |
| Mahlzeit | Mahlzeit | Station | Station | Frühstück | Frühjahr | Brot | Brot | Gefallen | Gefängnis | Antwort | Antwort |
| Ecke | Eile | Achtung | Anzug | Beispiel | Beispiel | Mitleid | Mittag | Keller | Kette | Gericht | Gesicht |
| Papier | Papier | Ofen | Ofen | Laden | Laster | Hunger | Hunger | Cousine | Cousine | Haar | Hund |
| Welt | Wort | Sessel | Sessel | Sofa | Sofa | Auge | Alte | Spiegel | Spiegel | Spitze | Spitze |
| Sekunde | Sekunde | Spur | Spur | Streifen | Streifen | Stube | Stube | Stunde | Stunde | Stütze | Stütze |
| Straße | Straße | Strecke | Strecke | Stoff | Stoß | Sonntag | Sonntag | Wesen | Wesen | Unfall | Unsinn |

◆ **Nonwortlesen (NWL; 1-6):** Nonwörter werden pro Block in einer vorgegebenen Reihenfolge dargeboten.

| NWL_1 | NWL_2 | NWL_3 | NWL_4 | NWL_5 | NWL_6 | | | | | | |
|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|------------|------------|
| Vorbranf | Vorkarf | Weud | Wend | Plett | Prent | Brador | Brador | Genk | Getz | Schkoi | Schkoi |
| Zolwur | Zolwur | Hähol | Hätol | Arseub | Arseub | Wult | Wurk | Sunser | Sunser | Roigan | Roickan |
| Dolku | Dokul | Pau | Pau | Nichfurchat | Nichmuttat | Heustmell | Heustmell | Zalandruk | Zalandruk | Bech | Blet |
| Fonstar | Fonstar | Oisanbin | Oisanbin | Nohull | Nohull | Straufin | Straufin | Känug | Kärpur | Studdchin | Studdchin |
| Colsinau | Colsinau | Kachu | Karchu | Tesel | Telse | Antorhiltung | Antorhiltung | Worzaud | Worzaud | Mener | Meset |
| Stol | Stam | Doinsleg | Doinsleg | Uldor | Uldor | Röks | Röks | Luch | Lend | Nost | Nost |
| Burp | Burd | Malch | Malch | Möflzaut | Möflzaut | Rister | Rilber | Schlobul | Schlobul | Kreus | Kreun |
| Dunerstig | Dunerstig | Ponks | Ponks | Gortan | Goban | Kups | Kups | Wärz | Wärz | Wuneng | Wuneng |
| Ledön | Lestör | Munet | Munteg | Kallor | Kattor | Woilo | Wiloir | Gorult | Gosult | Kilkumesar | Kilkumesar |
| Moir | Moir | Stetiu | Stetiu | Pfirf | Pfirf | Reld | Reld | Hags | Hags | Gruls | Gruls |
| Wogur | Wontur | Benk | Bend | Gilbs | Gilds | Mend | Menn | Vussel | Vurret | Pulazän | Purzalän |
| Enswurp | Enswurp | Dutkur | Dutkur | Panzisson | Panzisson | Vursolluns | Vursolluns | Stoin | Spoll | Hangur | Hangur |
| Melsch | Melsch | Firt | Firt | Stindo | Stindo | Hieh | Hilz | Strocko | Strocko | Schloieur | Schoibu |
| Mattauling | Manautin | Froimo | Foimor | Matsir | Matir | Tropke | Tolke | Kond | Knoi | Varsohnu | Varwondu |
| Mürs | Mürs | Gaswundegka | Gaswundegka | Wond | Wotz | Kloid | Kloid | Jeur | Jeur | Benflut | Benflut |
| Fild | Fild | Durt | Durt | Mogsch | Mogsch | Gabutstig | Gabuchi | Zauchun | Zautung | Anteraucht | Anteraucht |
| Hölsta | Hölsa | Shaß | Sheß | Bichir | Belir | Fränsäck | Frähjäc | Mosuk | Mosuk | Fuibor | Fungor |
| Mamest | Mamest | Ufan | Ufan | Ucke | Ukle | Asson | Asson | Boispal | Boispal | Bils | Bitl |
| Efpepe | Efpepe | Stebu | Stebu | Lest | Lest | Fren | Fren | Intscheldegong | Intscheldegong | Gröck | Gröck |
| Deme | Doimo | Luhra | Luita | Heustär | Heustär | Mostrü | Muttrü | Giwihi | Giwihi | Tenk | Tauk |
| Trolls | Truls | Gowuttir | Gowustir | Wegek | Wesek | Bawigong | Baschribong | Euge | Elte | Zoschoier | Zoschoier |
| Statzo | Statzo | Midchon | Midchon | Glaungewatzt | Glaungewatzt | Gifaulh | Gifaulh | Hönd | Höng | Hels | Heus |
| Femalau | Femalau | Wunle | Wunle | Preuser | Prezner | Mosswuch | Mosswuch | Frindt | Frindt | Kufsumm | Kufsumm |
| Bech | Behn | Pequier | Pequier | Deunst | Deunst | Ücker | Ülter | Woinuktin | Woinuktin | Imdo | Irdo |
| Fausch | Fausch | Vitir | Vitir | Vurkolfir | Vurbrolchir | Nechbur | Nechbur | Schelu | Schlegu | Bosich | Bosich |
| Montir | Mostir | Bröcko | Böhno | Silz | Sint | Ges | Gnes | Lonio | Lonio | Stolor | Storor |
| Eutraising | Eutanbling | Högöl | Högöl | Brinnon | Brinnon | Stefkommur | Stefkommur | Blamug | Blamug | Derst | Derst |
| Roiha | Roiha | Grimottur | Grimottur | Schulf | Schulf | Klemse | Kleppe | Beun | Beun | Unelk | Unerst |
| Loib | Loid | Haur | Hond | Onturassi | Onturassi | Wisoln | Wisoln | Gefullauk | Gefungnauk | Murten | Murten |
| Jonda | Jonda | Scheld | Schlef | Fluk | Fluk | Sutz | Sturk | Motraud | Mottaud | Sulnepald | Sulnepald |

◆ **Buchstaben (BS; 1-6):** Buchstaben werden pro Block in einer vorgegebenen Reihenfolge dargeboten.

| BS_1 | BS_2 | BS_3 | BS_4 | BS_5 | BS_6 | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| rrdr | rrdr | ddhd | dhd | zzmzz | mzzzz | pppccp | pppccp | yymyy | myyyy | jjdjj | jjdjj |
| ggwggg | ggwggg | lllbl | lllbl | blbb | blbb | blbb | blbb | ppprp | ppprp | hhphhh | hhphhh |
| bkbb | bkbb | mmbmm | mmbmm | ffpfff | ffpfff | ccclcc | cclccc | ffmf | mfff | gkgg | gkgg |
| vfvv | vfvv | plppp | pplpp | dddmd | ddmdd | rrdr | rrdr | xxdxx | xxdxx | kkfkk | kkfkk |
| dddsdd | dddsdd | kkmkkk | kkmkkk | jjbjj | jjbjj | mmdmm | mmdmm | llfl | llfl | qqzq | qqzq |
| yysyy | ysyyy | hhmh | hmhh | llhl | llhl | plpp | plpp | skss | ssks | nnenn | nnenn |
| jjqjj | jjqjj | yfy | yfy | nnbn | nnbn | ddmd | mddd | kkdkk | kkdkk | dldd | dldd |
| ssgss | ssgss | hhfh | hhfh | ppmmp | ppmmp | vvfvv | vvfvv | ddmd | dmdd | ppdpp | ppdpp |
| nnngn | nnngn | glggg | glggg | dbdd | dbdd | ffcff | ffcff | rlr | rlr | kkkrkk | kkkrkk |
| ggggg | ggggg | nxxn | nxxn | rlr | rlr | hzhh | hzhh | hhhrhh | hhhrhh | txtt | txtt |
| wwwwhw | wwwwhw | ddmd | mddd | yyhy | yhy | jjmjj | jjmjj | mdmm | mdmm | dldd | dldd |
| sgss | sgss | lllbl | lllbl | tttdt | tttdt | kkkrk | kkkrk | pxpp | pxpp | nnndn | nnndn |
| wwwwhw | wwwwhw | dddmd | dddmd | nnnmn | nnnmn | llml | llml | yycyy | yycyy | sssmss | sssmss |
| mlmm | mlmm | ccjcc | cccjc | qqqqq | qqqqq | qqmq | qqmq | bbdbb | bbdbb | ppppp | ppppp |
| kkkskk | kkkskk | ppppp | ppppp | blbbb | blbbb | llml | llml | clccc | cclccc | wwwdw | wwwdw |
| ddsd | ddsd | bbpbb | bbpbb | kkkkk | kkkkk | yyjyy | yyjyy | pmppp | ppmpp | sssls | sssls |
| nnngn | nnngn | mbmm | mmbm | fffbf | fffbf | ccwcc | ccwcc | ddpdd | ddpdd | yyly | yyly |
| zzdzz | zzdzz | klkk | klkk | ckcc | cckc | nnnmn | nnnmn | llyll | llyll | mfmm | mfmm |
| cchc | chcc | yygyy | yygyy | qlqqq | qqqqq | dkdd | dkdd | rzr | rzr | zzmzz | zzmzz |
| lllrl | lllrl | nnnrn | nnnrn | bbbrb | bbbrb | vvvvlv | vvvvlv | kkkmkk | kkkmkk | dlddd | dlddd |
| hhsh | hshh | vvdvv | vvdvv | lxll | lxll | ccrcc | ccrcc | rrmrr | rrmrr | nnnln | nnnln |
| qlqq | qlqq | ccdcc | ccdcc | ffrff | ffrff | wfw | wfw | ppppp | ppppp | zzmzz | zzmzz |
| fzff | fzff | hhmhh | hhmhh | ggdgg | ggdgg | nnwnn | nnwnn | hhdhh | hhdhh | yydy | yydy |
| pppwp | pppwp | rrrhr | rrrhr | nnjnn | nnjnn | cclc | clcc | rfr | rfr | dldd | dldd |
| vvfvv | vvfvv | ppppp | ppppp | ssms | ssms | rrwr | rrwr | vvvvv | vvvvv | wdww | wdww |
| lllrl | lllrl | nnlnn | nnlnn | kkfkk | kkfkk | ppppp | ppppp | qqqqq | qqqqq | dddrd | dddrd |
| hhshh | hhshh | yymyy | myyyy | nznn | nnzn | jjjjj | jjjjj | ddd | ddd | rrrr | rrrr |
| pppwp | pppwp | glgg | glgg | sfss | sfss | zxzz | zxzz | bbdb | bbdb | kkkmkk | kkkmkk |
| xxjxx | xxjxx | zkzz | zkzz | wbw | wbw | wwwlw | wwwlw | clcc | clcc | dddrd | dddrd |
| txtt | txtt | mzmm | mmzm | xxmx | xxmx | mcm | mcm | pplp | pplp | zzmz | zzmz |

◆ **Nonwortreimen (NWR; 1-6):** Nonwörter werden pro Block in einer vorgegebenen Reihenfolge dargeboten.

| NWR_1 | NWR_2 | NWR_3 | NWR_4 | NWR_5 | NWR_6 | | | | | | |
|--------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|
| Zimm | Bimm | Guld | Buld | Waukol | Wilkor | Bard | Nard | Smull | Kull | Loik | Leuko |
| Büchi | Bäla | Roim | Soim | Hind | Mind | Mernd | Mernd | Rirst | Rilb | Burd | Nurd |
| Varso | Varwo | Gaurilt | Gausult | Romm | Bomm | Baul | Taul | Tromm | Promm | Kärug | Kärpus |
| Leis | Keis | Berlsa | Berlte | Bemk | Bemd | Brip | Brurd | Wuhse | Wuslo | Zoile | Moile |
| Hilso | Hesol | Finn | Tinn | Fill | Rill | Ledran | Leströr | Pfoil | Soil | Sunna | Wunna |
| Mamm | Tamm | Plutt | Prunt | Schled | Schlix | Sunne | Wunne | Barig | Basrib | Fromo | Fomor |
| Beum | Teum | Beier | Neier | Rande | Wande | Rauter | Dauter | Lufir | Lofir | Motter | Botter |
| Gortin | Gobin | Wotul | Wontul | Pesten | Kesten | Roistan | Roistaun | Zalle | Malle | Nammer | Tammer |
| Poller | Toller | Tosche | Mosche | Euse | Elze | Nuse | Huse | Metter | Getter | Mont | Molst |
| Prek | Prenk | Blöch | Böhn | Mattol | Manolt | Ükerl | Ülker | Meine | Mesa | Trocks | Truck |
| Mosser | Kosser | Marbe | Karbe | Sanne | Lanne | Durde | Murde | Dusse | Susse | Wulle | Dulle |
| Fuitor | Funtor | Tolbe | Molbe | Viter | Siter | Griibs | Grid | Tripko | Tilko | Demse | Doimso |
| Dunner | Sunner | Knad | Knog | Krius | Kriun | Timmer | Mimmer | Kommer | Nommer | Flimme | Plimme |
| Schloz | Schoiz | Matsar | Matil | Unelb | Unerbst | Strain | Spail | Gsel | Gnen | Wotter | Rotter |
| Mettag | Tettag | Ruld | Kuld | Kaul | Raul | Munrest | Muntreg | Motreu | Mottau | Stolf | Stord |
| Delku | Dokels | Ongst | Ebst | Nechfurt | Nechmut | Ralle | Walle | Juse | Kuse | Kimmer | Limmer |
| Lester | Gester | Limm | Simm | Schromm | Dromm | Hetter | Ketter | Höng | Höln | Lommer | Tommer |
| Raste | Waste | Schalsu | Schlelsa | Bricko | Buhno | Hölbta | Hörbter | Xarbe | Jarbe | Haux | Honx |
| Klimsi | Klöppi | Hicht | Hiltz | Doil | Goil | Xunne | Runne | Zauchu | Zauto | Klimme | Blimme |
| Durd | Lurd | Somm | Nomm | Surlz | Sulnt | Terst | Talse | Kolbe | Dolbe | Notter | Kotter |
| Scholf | Schrolf | Dies | Sies | Noile | Doile | Bauter | Kauter | Fräns | Frähj | Pulaz | Purzil |
| Mull | Wull | Ûnfeilk | Ûnseink | Gowut | Gowust | Danne | Nanne | Öcke | Uklö | Trople | Tolpte |
| Sumker | Sunkar | Ramm | Wamm | Vurkol | Vurbrolt | Edras | Eutan | Jurde | Surde | Josser | Gosser |
| Kilku | Kercha | Shals | Shels | Runna | Kunna | Luch | Lönd | Stol | Stam | Böch | Bleut |
| Sall | Tall | Vuskel | Vukret | Sotter | Rotter | Lesten | Nesten | Xulle | Mulle | Mostre | Muttrö |
| Waud | Wlaun | Leum | Reum | Gefullo | Gefungni | Reier | Deier | Fusse | Gusse | Junner | Munner |
| Weget | Weset | Gabuts | Gabucht | Tlonk | Toluk | Vorbran | Vorkar | Hähl | Hält | Wurl | Wufs |
| Lind | Bind | Pinn | Ginn | Lammer | Rammer | Gerk | Gerz | Xanne | Ganne | Lettag | Settag |
| Mangir | Margik | Millo | Tillo | Loller | Goller | Rosche | Dosche | Luha | Luit | Ifdor | Irdol |
| Bloim | Kloim | Sulte | Slulke | Kallir | Kalstir | Womd | Woch | Titer | Riter | Veuti | Veutro |

Anhang C (Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests)

Kontrollkinder

| | NV_IQ | RS_IQ | ZLTF | ZLTZ | PD_3SF | PD_3SZ | PD_3NF | PD_3NZ | PB_F | PB_Z | D2_KL |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| N | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Mittelwert | 110,33 | 105,72 | 100,02 | 103,79 | 0,05 | 1,24 | 0,18 | 2,58 | 0,13 | 3,10 | 77,89 |
| Standardabweichung | 16,07 | 11,78 | 7,00 | 9,43 | 0,05 | 0,50 | 0,09 | 0,99 | 0,10 | 0,87 | 16,50 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,46 | 0,76 | 0,55 | 1,16 | 1,27 | 1,27 | 0,80 | 0,94 | 0,74 | 0,83 | 0,78 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,99 | 0,62 | 0,92 | 0,13 | 0,08 | 0,08 | 0,54 | 0,34 | 0,64 | 0,49 | 0,57 |
| | S_M_CU | BL_M_CU | HL_M_CU | NL_M_CU | NR_M_CU | S_CM | BL_CM | HL_CM | NL_CM | NR_CM | S_UM |
| N | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Mittelwert | 978,01 | 2300,63 | 1620,49 | 2048,59 | 2072,65 | 968,31 | 2291,67 | 1627,78 | 2129,91 | 2065,26 | 987,72 |
| Standardabweichung | 166,92 | 385,58 | 464,68 | 471,83 | 594,48 | 131,86 | 373,07 | 388,91 | 442,51 | 468,99 | 222,47 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,91 | 0,55 | 1,00 | 0,49 | 0,52 | 0,71 | 0,50 | 0,91 | 0,56 | 0,67 | 0,59 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,37 | 0,92 | 0,28 | 0,97 | 0,95 | 0,69 | 0,97 | 0,38 | 0,91 | 0,76 | 0,88 |
| | BL_UM | HL_UM | NL_UM | NR_UM | FPROZSLG | FPROZBL | FPROZHL | FPROZNL | FPROZNR | S_NN | BL_NN |
| N | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Mittelwert | 2309,59 | 1613,20 | 1967,28 | 2080,03 | 3,67 | 8,42 | 6,75 | 9,01 | 6,56 | 0,57 | 2,52 |
| Standardabweichung | 483,00 | 592,48 | 559,14 | 796,22 | 3,31 | 6,17 | 6,77 | 7,25 | 7,71 | 1,32 | 3,34 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,72 | 0,97 | 0,44 | 0,38 | 1,08 | 0,87 | 1,21 | 0,58 | 1,35 | 1,74 | 1,13 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,69 | 0,30 | 0,99 | 1,00 | 0,19 | 0,44 | 0,11 | 0,89 | 0,05 | 0,00 | 0,15 |
| | HL_NN | NL_NN | NR_NN | | | | | | | | |
| N | 21 | 21 | 21 | | | | | | | | |
| Mittelwert | 1,05 | 2,19 | 2,86 | | | | | | | | |
| Standardabweichung | 1,56 | 3,63 | 3,58 | | | | | | | | |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 1,47 | 1,35 | 1,23 | | | | | | | | |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,03 | 0,05 | 0,09 | | | | | | | | |

Kinder mit LRS

| | NV_IQ | RS_IQ | ZLTF | ZLTZ | PD_3SF | PD_3SZ | PD_3NF | PD_3NZ | PB_F | PB_Z | D2_KL |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Mittelwert | 108,82 | 70,71 | 77,41 | 71,26 | 0,25 | 3,61 | 0,53 | 4,42 | 0,38 | 4,66 | 57,25 |
| Standardabweichung | 15,10 | 9,19 | 10,76 | 8,67 | 0,17 | 1,59 | 0,22 | 1,77 | 0,19 | 1,58 | 28,37 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,80 | 0,73 | 0,63 | 0,71 | 0,63 | 0,80 | 0,55 | 0,67 | 0,86 | 0,86 | 0,86 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,54 | 0,65 | 0,82 | 0,70 | 0,82 | 0,55 | 0,92 | 0,77 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| | S_M_CU | BL_M_CU | HL_M_CU | NL_M_CU | NR_M_CU | S_CM | BL_CM | HL_CM | NL_CM | NR_CM | S_UM |
| N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Mittelwert | 1018,15 | 2488,29 | 2279,32 | 2711,23 | 2851,90 | 1005,43 | 2411,64 | 2244,89 | 2616,36 | 2762,36 | 1030,87 |
| Standardabweichung | 169,32 | 482,32 | 552,73 | 542,76 | 683,10 | 157,30 | 394,64 | 472,64 | 499,59 | 599,37 | 189,99 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,65 | 0,42 | 0,95 | 0,49 | 0,65 | 0,63 | 0,55 | 0,57 | 0,45 | 0,61 | 0,58 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,79 | 0,99 | 0,33 | 0,97 | 0,80 | 0,83 | 0,93 | 0,90 | 0,99 | 0,85 | 0,89 |
| | BL_UM | HL_UM | NL_UM | NR_UM | FPROZSLG | FPROZBL | FPROZHL | FPROZNL | FPROZNR | S_NN | BL_NN |
| N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Mittelwert | 2564,95 | 2313,76 | 2806,10 | 2941,44 | 5,64 | 10,35 | 8,98 | 14,43 | 17,03 | 1,11 | 4,18 |
| Standardabweichung | 668,02 | 698,81 | 635,16 | 814,26 | 6,47 | 7,88 | 6,80 | 7,33 | 10,96 | 2,12 | 4,17 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,47 | 1,05 | 0,56 | 0,72 | 1,38 | 1,02 | 1,03 | 0,62 | 1,00 | 1,40 | 1,38 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,98 | 0,22 | 0,92 | 0,68 | 0,04 | 0,25 | 0,23 | 0,84 | 0,27 | 0,04 | 0,05 |
| | HL_NN | NL_NN | NR_NN | | | | | | | | |
| N | 22 | 22 | 22 | | | | | | | | |
| Mittelwert | 5,09 | 7,36 | 8,50 | | | | | | | | |
| Standardabweichung | 5,09 | 5,44 | 6,44 | | | | | | | | |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,86 | 1,10 | 0,71 | | | | | | | | |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,45 | 0,17 | 0,70 | | | | | | | | |

Kontrolljugendliche

| | NV_IQ | RS_IQ | ZLTF | ZLTZ | PD_3SF | PD_3SZ | PD_3NF | PD_3NZ | PB_F | PB_Z | D2_KL |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| N | 24 | 24 | 24 | 2 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Mittelwert | 102,98 | 99,66 | 103,12 | 108,48 | 0,03 | 1,01 | 0,19 | 1,96 | 0,13 | 2,81 | 81,76 |
| Standardabweichung | 11,97 | 11,97 | 6,00 | 7,02 | 0,04 | 0,30 | 0,08 | 0,55 | 0,11 | 0,78 | 18,04 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,69 | 0,36 | 1,02 | 1,96 | 1,79 | 1,24 | 0,98 | 0,91 | 0,96 | 0,93 | 1,00 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,74 | 1,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,29 | 0,38 | 0,32 | 0,35 | 0,27 |
| | S_M_CU | BL_M_CU | HL_M_CU | NL_M_CU | NR_M_CU | S_CM | BL_CM | HL_CM | NL_CM | NR_CM | S_UM |
| N | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 2 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Mittelwert | 864,56 | 1826,87 | 1331,86 | 1668,57 | 1748,28 | 843,83 | 1815,76 | 1319,72 | 1689,31 | 1601,90 | 885,30 |
| Standardabweichung | 184,25 | 288,79 | 309,01 | 405,01 | 416,69 | 171,17 | 312,70 | 349,65 | 364,90 | 325,00 | 209,38 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,55 | 0,51 | 0,48 | 0,60 | 0,63 | 0,52 | 0,42 | 0,51 | 0,58 | 0,41 | 0,60 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,92 | 0,96 | 0,97 | 0,87 | 0,82 | 0,95 | 0,99 | 0,96 | 0,89 | 1,00 | 0,86 |
| | BL_UM | HL_UM | NL_UM | NR_UM | FPROZSLG | FPROZBL | FPROZHL | FPROZNL | FPROZNR | S_NN | BL_NN |
| N | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 2 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Mittelwert | 1837,98 | 1343,99 | 1647,83 | 1894,67 | 2,73 | 8,45 | 4,32 | 7,13 | 4,68 | 0,21 | 0,79 |
| Standardabweichung | 300,85 | 329,00 | 543,88 | 557,24 | 1,81 | 7,35 | 2,54 | 4,44 | 4,76 | 0,82 | 1,32 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,62 | 0,36 | 0,46 | 0,62 | 0,66 | 1,18 | 0,48 | 1,03 | 0,90 | 2,33 | 1,52 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,84 | 1,00 | 0,98 | 0,84 | 0,78 | 0,12 | 0,98 | 0,24 | 0,39 | 0,00 | 0,02 |
| | HL_NN | NL_NN | NR_NN | | | | | | | | |
| N | 24 | 24 | 24 | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,21 | 0,67 | 0,67 | | | | | | | | |
| Standardabweichung | 0,66 | 1,05 | 1,01 | | | | | | | | |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 2,45 | 1,57 | 1,82 | | | | | | | | |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,00 | 0,01 | 0,00 | | | | | | | | |

Jugendliche mit LRS

| | NV_IQ | RS_IQ | ZLTF | ZLTZ | PD_3SF | PD_3SZ | PD_3NF | PD_3NZ | PB_F | PB_Z | D2_KL |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| N | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Mittelwert | 100,50 | 67,16 | 82,18 | 83,29 | 0,13 | 2,43 | 0,40 | 4,08 | 0,29 | 3,78 | 44,55 |
| Standardabweichung | 14,22 | 13,88 | 14,48 | 15,28 | 0,12 | 1,43 | 0,21 | 1,95 | 0,15 | 1,33 | 25,28 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 1,24 | 0,81 | 0,48 | 0,80 | 0,94 | 0,75 | 0,53 | 0,80 | 0,73 | 0,60 | 0,63 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,09 | 0,52 | 0,98 | 0,55 | 0,34 | 0,62 | 0,94 | 0,54 | 0,66 | 0,86 | 0,83 |
| | S_M_CU | BL_M_CU | HL_M_CU | NL_M_CU | NR_M_CU | S_CM | BL_CM | HL_CM | NL_CM | NR_CM | S_UM |
| N | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Mittelwert | 890,29 | 2163,92 | 1866,11 | 2283,09 | 2463,51 | 876,45 | 2067,08 | 1844,97 | 2250,69 | 2315,38 | 904,14 |
| Standardabweichung | 185,10 | 393,31 | 456,87 | 381,05 | 549,24 | 165,27 | 237,46 | 389,41 | 339,30 | 439,57 | 251,92 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,70 | 0,89 | 0,55 | 0,55 | 0,57 | 0,58 | 0,45 | 0,65 | 0,58 | 0,65 | 0,72 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,71 | 0,41 | 0,93 | 0,92 | 0,90 | 0,89 | 0,99 | 0,79 | 0,89 | 0,79 | 0,67 |
| | BL_UM | HL_UM | NL_UM | NR_UM | FPROZSLG | FPROZBL | FPROZHL | FPROZNL | FPROZNR | S_NN | BL_NN |
| N | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Mittelwert | 2260,76 | 1887,24 | 2315,49 | 2611,63 | 3,72 | 6,45 | 5,49 | 8,92 | 9,53 | 1,06 | 2,06 |
| Standardabweichung | 601,06 | 582,34 | 479,77 | 762,79 | 2,73 | 3,31 | 4,17 | 5,45 | 7,55 | 2,91 | 3,26 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,80 | 0,50 | 0,53 | 0,73 | 0,97 | 0,54 | 0,83 | 0,76 | 1,04 | 1,97 | 1,48 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,55 | 0,97 | 0,94 | 0,66 | 0,31 | 0,93 | 0,49 | 0,61 | 0,23 | 0,00 | 0,02 |
| | HL_NN | NL_NN | NR_NN | | | | | | | | |
| N | 18 | 18 | 18 | | | | | | | | |
| Mittelwert | 1,61 | 3,06 | 3,11 | | | | | | | | |
| Standardabweichung | 1,79 | 2,86 | 3,01 | | | | | | | | |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 1,51 | 1,08 | 1,08 | | | | | | | | |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,02 | 0,19 | 0,19 | | | | | | | | |

Kontrollerwachsene

| | NV_IQ | RS_IQ | ZLTF | ZLTZ | PD_3SF | PD_3SZ | PD_3NF | PD_3NZ | PB_F | PB_Z | D2_KL |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| N | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| Mittelwert | 106,63 | 104,12 | 109,80 | 111,47 | 0,01 | 0,80 | 0,05 | 1,56 | 0,03 | 1,59 | 77,89 |
| Standardabweichung | 15,91 | 13,93 | 3,78 | 2,76 | 0,02 | 0,33 | 0,06 | 0,45 | 0,06 | 0,72 | 20,30 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,58 | 0,53 | 1,81 | 2,80 | 2,40 | 1,20 | 1,06 | 0,82 | 2,11 | 0,66 | 1,05 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,89 | 0,95 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,21 | 0,51 | 0,00 | 0,78 | 0,22 |
| | S_M_CU | BL_M_CU | HL_M_CU | NL_M_CU | NR_M_CU | S_CM | BL_CM | HL_CM | NL_CM | NR_CM | S_UM |
| N | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| Mittelwert | 819,17 | 1629,20 | 1072,06 | 1351,10 | 1545,99 | 789,06 | 1584,24 | 1032,68 | 1360,51 | 1331,78 | 849,28 |
| Standardabweichung | 304,78 | 298,93 | 370,81 | 349,06 | 435,58 | 191,45 | 295,13 | 270,73 | 278,21 | 343,46 | 432,29 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 1,22 | 0,70 | 0,98 | 0,82 | 0,65 | 1,02 | 0,63 | 1,04 | 0,79 | 0,68 | 1,57 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,10 | 0,72 | 0,29 | 0,51 | 0,80 | 0,25 | 0,83 | 0,23 | 0,57 | 0,74 | 0,01 |
| | BL_UM | HL_UM | NL_UM | NR_UM | FPROZSLG | FPROZBL | FPROZHL | FPROZNL | FPROZNR | S_NN | BL_NN |
| N | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| Mittelwert | 1674,15 | 1111,43 | 1341,69 | 1760,19 | 1,74 | 4,26 | 2,19 | 3,25 | 2,19 | 1,09 | 0,37 |
| Standardabweichung | 345,31 | 523,34 | 457,69 | 605,67 | 1,34 | 2,33 | 1,56 | 1,89 | 1,95 | 5,48 | 0,84 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,75 | 0,84 | 0,74 | 0,56 | 1,45 | 0,47 | 0,78 | 0,85 | 0,91 | 2,62 | 2,52 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,62 | 0,48 | 0,65 | 0,91 | 0,03 | 0,98 | 0,58 | 0,46 | 0,38 | 0,00 | 0,00 |
| | HL_NN | NL_NN | NR_NN | | | | | | | | |
| N | 27 | 27 | 27 | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,30 | 0,41 | 0,41 | | | | | | | | |
| Standardabweichung | 1,03 | 1,93 | 1,05 | | | | | | | | |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 2,61 | 2,65 | 2,23 | | | | | | | | |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | | | |

Erwachsene mit LRS

| | NV_IQ | RS_IQ | ZLTF | ZLTZ | PD_3SF | PD_3SZ | PD_3NF | PD_3NZ | PB_F | PB_Z | D2_KL |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Mittelwert | 100,23 | 63,76 | 97,94 | 101,09 | 0,04 | 1,26 | 0,23 | 3,12 | 0,18 | 3,17 | 61,09 |
| Standardabweichung | 11,93 | 10,99 | 10,39 | 10,04 | 0,04 | 0,41 | 0,13 | 1,08 | 0,16 | 1,70 | 26,63 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,72 | 1,08 | 1,22 | 0,84 | 1,43 | 0,65 | 0,53 | 0,87 | 0,77 | 0,92 | 0,90 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,68 | 0,19 | 0,10 | 0,48 | 0,03 | 0,79 | 0,94 | 0,43 | 0,60 | 0,36 | 0,39 |
| | S_M_CU | BL_M_CU | HL_M_CU | NL_M_CU | NR_M_CU | S_CM | BL_CM | HL_CM | NL_CM | NR_CM | S_UM |
| N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Mittelwert | 860,94 | 1912,26 | 1533,95 | 1970,15 | 2395,85 | 851,50 | 1762,29 | 1451,60 | 1937,41 | 2301,12 | 870,38 |
| Standardabweichung | 241,04 | 585,42 | 567,70 | 687,56 | 660,20 | 209,88 | 373,30 | 422,52 | 551,90 | 580,23 | 298,04 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 0,86 | 0,56 | 0,82 | 0,73 | 0,66 | 0,85 | 0,64 | 0,59 | 0,46 | 0,63 | 0,69 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,46 | 0,92 | 0,52 | 0,67 | 0,78 | 0,46 | 0,80 | 0,87 | 0,98 | 0,82 | 0,73 |
| | BL_UM | HL_UM | NL_UM | NR_UM | FPROZSLG | FPROZBL | FPROZHL | FPROZNL | FPROZNR | S_NN | BL_NN |
| N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Mittelwert | 2062,22 | 1616,31 | 2002,90 | 2490,58 | 2,20 | 7,13 | 4,65 | 7,38 | 6,36 | 0,86 | 0,68 |
| Standardabweichung | 868,59 | 777,20 | 902,03 | 852,60 | 2,12 | 10,19 | 5,90 | 8,09 | 4,47 | 1,87 | 1,13 |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 1,08 | 0,96 | 0,93 | 0,46 | 1,20 | 1,52 | 1,35 | 1,33 | 0,63 | 1,69 | 1,70 |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,20 | 0,32 | 0,35 | 0,98 | 0,11 | 0,02 | 0,05 | 0,06 | 0,83 | 0,01 | 0,01 |
| | HL_NN | NL_NN | NR_NN | | | | | | | | |
| N | 22 | 22 | 22 | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,64 | 1,32 | 2,41 | | | | | | | | |
| Standardabweichung | 1,53 | 2,03 | 3,39 | | | | | | | | |
| Kolmogorov-Smirnov-Z | 1,61 | 1,57 | 1,12 | | | | | | | | |
| Signifikanz (2-seitig) | 0,01 | 0,01 | 0,16 | | | | | | | | |

Anhang D (Deskriptive Statistik und statistische Ergebnisse)

Konzentrationsleistung (KL) (Univariate Varianzanalyse)

Deskriptive Statistiken

Abhängige Variable: D2_KL

| ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| Gr1 | Kontrolle | 77,8920 | 16,5040 | 21 |
| | LRS | 57,2481 | 28,3719 | 22 |
| | Gesamt | 67,3300 | 25,3221 | 43 |
| Gr2 | Kontrolle | 81,7566 | 18,0351 | 24 |
| | LRS | 44,5532 | 25,2764 | 18 |
| | Gesamt | 65,8123 | 28,1887 | 42 |
| Gr3 | Kontrolle | 77,8905 | 20,3046 | 27 |
| | LRS | 61,0931 | 26,6315 | 22 |
| | Gesamt | 70,3488 | 24,5940 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | 79,1797 | 18,3422 | 72 |
| | LRS | 54,9269 | 27,3267 | 62 |
| | Gesamt | 67,9582 | 25,8732 | 134 |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable: D2_KL

| F | df1 | df2 | Signifikanz |
|-------|-----|-----|-------------|
| 3,522 | 5 | 128 | ,005 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

Tests der Zwischensubjekteffekte

Abhängige Variable: D2_KL

| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|-----------------------------|--------------------------|-----|---------------------|----------|-------------|-------------|
| Korrigiertes Modell | 22726,011 ^a | 5 | 4545,202 | 8,774 | ,000 | ,255 |
| Intercept | 587809,759 | 1 | 587809,759 | 1134,709 | ,000 | ,899 |
| ALTER_GR | 922,086 | 2 | 461,043 | ,890 | ,413 | ,014 |
| LRS | 20425,526 | 1 | 20425,526 | 39,429 | ,000 | ,235 |
| ALTER_GR * LRS | 2538,332 | 2 | 1269,166 | 2,450 | ,090 | ,037 |
| Fehler | 66307,447 | 128 | 518,027 | | | |
| Gesamt | 707888,190 | 134 | | | | |
| Korrigierte Gesamtvariation | 89033,459 | 133 | | | | |

a. R-Quadrat = ,255 (korrigiertes R-Quadrat = ,226)

Alter (Univariate Varianzanalyse)

Deskriptive Statistiken

Abhängige Variable: ALTERMRT

| ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| Gr1 | Kontrolle | 10,5633 | ,9330 | 21 |
| | LRS | 10,4355 | ,9257 | 22 |
| | Gesamt | 10,4979 | ,9204 | 43 |
| Gr2 | Kontrolle | 13,4450 | 1,3555 | 24 |
| | LRS | 13,7967 | 1,5503 | 18 |
| | Gesamt | 13,5957 | 1,4347 | 42 |
| Gr3 | Kontrolle | 26,2711 | 5,1892 | 27 |
| | LRS | 26,9500 | 9,4031 | 22 |
| | Gesamt | 26,5759 | 7,3065 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | 17,4143 | 7,7292 | 72 |
| | LRS | 17,2713 | 9,2523 | 62 |
| | Gesamt | 17,3481 | 8,4356 | 134 |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable: ALTERMRT

| F | df1 | df2 | Signifikanz |
|--------|-----|-----|-------------|
| 21,495 | 5 | 128 | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

Tests der Zwischensubjekteffekte

Abhängige Variable: ALTERMRT

| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|-----------------------------|--------------------------|-----|---------------------|----------|-------------|-------------|
| Korrigiertes Modell | 6788,672 ^a | 5 | 1357,734 | 64,957 | ,000 | ,717 |
| Intercept | 37737,994 | 1 | 37737,994 | 1805,481 | ,000 | ,934 |
| ALTER_GR | 6747,466 | 2 | 3373,733 | 161,408 | ,000 | ,716 |
| LRS | 2,987 | 1 | 2,987 | ,143 | ,706 | ,001 |
| ALTER_GR * LRS | 3,726 | 2 | 1,863 | ,089 | ,915 | ,001 |
| Fehler | 2675,444 | 128 | 20,902 | | | |
| Gesamt | 49792,456 | 134 | | | | |
| Korrigierte Gesamtvariation | 9464,116 | 133 | | | | |

a. R-Quadrat = ,717 (korrigiertes R-Quadrat = ,706)

Nonverbale Intelligenz (nv_IQ) (Univariate Varianzanalyse)

Deskriptive Statistiken

Abhängige Variable: NV_IQ

| ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| Gr1 | Kontrolle | 110,333 | 16,070 | 21 |
| | LRS | 108,818 | 15,102 | 22 |
| | Gesamt | 109,558 | 15,414 | 43 |
| Gr2 | Kontrolle | 102,977 | 11,973 | 24 |
| | LRS | 100,500 | 14,222 | 18 |
| | Gesamt | 101,915 | 12,877 | 42 |
| Gr3 | Kontrolle | 106,631 | 15,911 | 27 |
| | LRS | 100,227 | 11,932 | 22 |
| | Gesamt | 103,756 | 14,484 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | 106,493 | 14,847 | 72 |
| | LRS | 103,355 | 14,163 | 62 |
| | Gesamt | 105,041 | 14,565 | 134 |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable: NV_IQ

| F | df1 | df2 | Signifikanz |
|-------|-----|-----|-------------|
| 1,479 | 5 | 128 | ,201 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

Tests der Zwischensubjekteffekte

Abhängige Variable: NV_IQ

| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|-----------------------------|--------------------------|-----|---------------------|----------|-------------|-------------|
| Korrigiertes Modell | 1953,559 ^a | 5 | 390,712 | 1,904 | ,098 | ,069 |
| Intercept | 1452608,990 | 1 | 1452609,0 | 7080,021 | ,000 | ,982 |
| ALTER_GR | 1455,746 | 2 | 727,873 | 3,548 | ,032 | ,053 |
| LRS | 396,174 | 1 | 396,174 | 1,931 | ,167 | ,015 |
| ALTER_GR * LRS | 154,982 | 2 | 77,491 | ,378 | ,686 | ,006 |
| Fehler | 26261,780 | 128 | 205,170 | | | |
| Gesamt | 1506716,745 | 134 | | | | |
| Korrigierte Gesamtvariation | 28215,339 | 133 | | | | |

a. R-Quadrat = ,069 (korrigiertes R-Quadrat = ,033)

Zeit Wortlisten (3-silbig) (ALM+Messwiederholung)

Innersubjektfaktoren

Maß: MASS_1

| ZEIT | Abhängige Variable |
|------|--------------------|
| 1 | PD_3SZ |
| 2 | PD_3NZ |
| 3 | PB_Z |

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|--------|-----------|-----------|------------|--------------------|----|
| PD_3SZ | Gr1 | Kontrolle | 1,2410 | ,5029 | 21 |
| | | LRS | 3,6091 | 1,5937 | 22 |
| | | Gesamt | 2,4526 | 1,6807 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 1,0067 | ,3012 | 24 |
| | | LRS | 2,4278 | 1,4274 | 18 |
| | | Gesamt | 1,6157 | 1,1842 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | ,7997 | ,3255 | 27 |
| | | LRS | 1,2601 | ,4086 | 22 |
| | | Gesamt | 1,0064 | ,4289 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | ,9974 | ,4146 | 72 | |
| | LRS | 2,4326 | 1,5795 | 62 | |
| | Gesamt | 1,6615 | 1,3236 | 134 | |
| PD_3NZ | Gr1 | Kontrolle | 2,5788 | ,9901 | 21 |
| | | LRS | 4,4182 | 1,7711 | 22 |
| | | Gesamt | 3,5199 | 1,7031 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 1,9648 | ,5498 | 24 |
| | | LRS | 4,0778 | 1,9480 | 18 |
| | | Gesamt | 2,8704 | 1,6921 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 1,5591 | ,4464 | 27 |
| | | LRS | 3,1166 | 1,0815 | 22 |
| | | Gesamt | 2,2584 | 1,1101 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | 1,9917 | ,7877 | 72 | |
| | LRS | 3,8575 | 1,6929 | 62 | |
| | Gesamt | 2,8550 | 1,5867 | 134 | |
| PB_Z | Gr1 | Kontrolle | 3,1050 | ,8698 | 21 |
| | | LRS | 4,6620 | 1,5754 | 22 |
| | | Gesamt | 3,9016 | 1,4904 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 2,8127 | ,7804 | 24 |
| | | LRS | 3,7833 | 1,3285 | 18 |
| | | Gesamt | 3,2287 | 1,1445 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 1,5890 | ,7227 | 27 |
| | | LRS | 3,1663 | 1,6952 | 22 |
| | | Gesamt | 2,2972 | 1,4725 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | 2,4391 | 1,0270 | 72 | |
| | LRS | 3,8762 | 1,6561 | 62 | |
| | Gesamt | 3,1040 | 1,5291 | 134 | |

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

| | |
|-------------|-----------|
| Box-M-Test | 230,286 |
| F | 7,207 |
| df1 | 30 |
| df2 | 33046,389 |
| Signifikanz | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

a.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

Innersubjekt-Design: ZEIT

Multivariate Tests^c

| Effekt | | Wert | F | Hypothese df | Fehler df | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|-----------------------|--|-------|----------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| ZEIT | Pillai-Spur | ,762 | 203,247 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,762 |
| | Wilks-Lambda | ,238 | 203,247 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,762 |
| | Hotelling-Spur | 3,201 | 203,247 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,762 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | 3,201 | 203,247 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,762 |
| ZEIT * ALTER_GR | Pillai-Spur | ,032 | 1,039 | 4,000 | 256,000 | ,387 | ,016 |
| | Wilks-Lambda | ,968 | 1,034 ^a | 4,000 | 254,000 | ,390 | ,016 |
| | Hotelling-Spur | ,033 | 1,030 | 4,000 | 252,000 | ,392 | ,016 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,027 | 1,704 ^b | 2,000 | 128,000 | ,186 | ,026 |
| ZEIT * LRS | Pillai-Spur | ,089 | 6,186 ^a | 2,000 | 127,000 | ,003 | ,089 |
| | Wilks-Lambda | ,911 | 6,186 ^a | 2,000 | 127,000 | ,003 | ,089 |
| | Hotelling-Spur | ,097 | 6,186 ^a | 2,000 | 127,000 | ,003 | ,089 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,097 | 6,186 ^a | 2,000 | 127,000 | ,003 | ,089 |
| ZEIT * ALTER_GR * LRS | Pillai-Spur | ,238 | 8,632 | 4,000 | 256,000 | ,000 | ,119 |
| | Wilks-Lambda | ,771 | 8,839 ^a | 4,000 | 254,000 | ,000 | ,122 |
| | Hotelling-Spur | ,287 | 9,042 | 4,000 | 252,000 | ,000 | ,126 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,243 | 15,550 ^b | 2,000 | 128,000 | ,000 | ,195 |

a. Exakte Statistik

b. Die Statistik ist eine Obergrenze auf F, die eine Untergrenze auf dem Signifikanzniveau ergibt.

c.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: ZEIT

Mauchly-Test auf Sphärität^b

Maß: MASS_1

| Innersubjekteffekt | Mauchly-W | Approximiertes Chi-Quadrat | df | Signifikanz | Epsilon ^a | | |
|--------------------|-----------|----------------------------|----|-------------|----------------------|-------------|-------------|
| | | | | | Greenhouse-Geisser | Huynh-Feldt | Untergrenze |
| ZEIT | ,750 | 36,510 | 2 | ,000 | ,800 | ,840 | ,500 |

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

b.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: ZEIT

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

| Quelle | | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|---------|---------------------|---------|-------------|-------------|
| ZEIT | Sphärität angenommen | 162,858 | 2 | 81,429 | 144,088 | ,000 | ,530 |
| | Greenhouse-Geisser | 162,858 | 1,600 | 101,774 | 144,088 | ,000 | ,530 |
| | Huynh-Feldt | 162,858 | 1,681 | 96,905 | 144,088 | ,000 | ,530 |
| | Untergrenze | 162,858 | 1,000 | 162,858 | 144,088 | ,000 | ,530 |
| ZEIT * ALTER_GR | Sphärität angenommen | 1,885 | 4 | ,471 | ,834 | ,505 | ,013 |
| | Greenhouse-Geisser | 1,885 | 3,200 | ,589 | ,834 | ,483 | ,013 |
| | Huynh-Feldt | 1,885 | 3,361 | ,561 | ,834 | ,488 | ,013 |
| | Untergrenze | 1,885 | 2,000 | ,942 | ,834 | ,437 | ,013 |
| ZEIT * LRS | Sphärität angenommen | 4,378 | 2 | 2,189 | 3,874 | ,022 | ,029 |
| | Greenhouse-Geisser | 4,378 | 1,600 | 2,736 | 3,874 | ,031 | ,029 |
| | Huynh-Feldt | 4,378 | 1,681 | 2,605 | 3,874 | ,029 | ,029 |
| | Untergrenze | 4,378 | 1,000 | 4,378 | 3,874 | ,051 | ,029 |
| ZEIT * ALTER_GR * LRS | Sphärität angenommen | 16,047 | 4 | 4,012 | 7,099 | ,000 | ,100 |
| | Greenhouse-Geisser | 16,047 | 3,200 | 5,014 | 7,099 | ,000 | ,100 |
| | Huynh-Feldt | 16,047 | 3,361 | 4,774 | 7,099 | ,000 | ,100 |
| | Untergrenze | 16,047 | 2,000 | 8,024 | 7,099 | ,001 | ,100 |
| Fehler(ZEIT) | Sphärität angenommen | 144,674 | 256 | ,565 | | | |
| | Greenhouse-Geisser | 144,674 | 204,825 | ,706 | | | |
| | Huynh-Feldt | 144,674 | 215,116 | ,673 | | | |
| | Untergrenze | 144,674 | 128,000 | 1,130 | | | |

Tests der Innersubjektkontraste

Maß: MASS_1

| Quelle | ZEIT | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----|---------------------|---------|-------------|-------------|
| ZEIT | Stufe 2 gegen Stufe 1 | 199,161 | 1 | 199,161 | 350,842 | ,000 | ,733 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 1 | 282,198 | 1 | 282,198 | 193,787 | ,000 | ,602 |
| | | 1,573 | 2 | ,787 | 1,386 | ,254 | ,021 |
| ZEIT * ALTER_GR | Stufe 2 gegen Stufe 1 | 1,209 | 2 | ,604 | ,415 | ,661 | ,006 |
| | | 5,823 | 1 | 5,823 | 10,257 | ,002 | ,074 |
| ZEIT * LRS | Stufe 2 gegen Stufe 1 | 7,667E-02 | 1 | 7,667E-02 | ,053 | ,819 | ,000 |
| | | 15,968 | 2 | 7,984 | 14,065 | ,000 | ,180 |
| ZEIT * ALTER_GR * LRS | Stufe 2 gegen Stufe 1 | 24,272 | 2 | 12,136 | 8,334 | ,000 | ,115 |
| | | 72,661 | 128 | ,568 | | | |
| Fehler(ZEIT) | Stufe 3 gegen Stufe 1 | 186,397 | 128 | 1,456 | | | |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

| | F | df1 | df2 | Signifikanz |
|--------|--------|-----|-----|-------------|
| PD_3SZ | 18,954 | 5 | 128 | ,000 |
| PD_3NZ | 7,805 | 5 | 128 | ,000 |
| PB_Z | 3,844 | 5 | 128 | ,003 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: ZEIT

Tests der Zwischensubjekteffekte

Maß: MASS_1

Transformierte Variable: Mittel

| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F |
|----------------|--------------------------|-----|---------------------|----------|
| Intercept | 906,590 | 1 | 906,590 | 1059,496 |
| ALTER_GR | 42,224 | 2 | 21,112 | 24,673 |
| LRS | 78,295 | 1 | 78,295 | 91,500 |
| ALTER_GR * LRS | 2,988 | 2 | 1,494 | 1,746 |
| Fehler | 109,527 | 128 | ,856 | |

Tests der Zwischensubjekteffekte

Maß: MASS_1

Transformierte Variable: Mittel

| Quelle | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|----------------|-------------|-------------|
| Intercept | ,000 | ,892 |
| ALTER_GR | ,000 | ,278 |
| LRS | ,000 | ,417 |
| ALTER_GR * LRS | ,179 | ,027 |
| Fehler | | |

Fehler (%) 3-silb. Wortlisten (ALM+MW)

Innersubjektfaktoren

Maß: MASS_1

| FEHLER | Abhängige Variable |
|--------|--------------------|
| 1 | PD_3SFPR |
| 2 | PD_3NFPR |
| 3 | PB_FPR |

Mauchly-Test auf Sphärizität^b

Maß: MASS_1

| Innersubjekteffekt | Mauchly-W | Approximiertes Chi-Quadrat | df | Signifikanz | Epsilon ^a | | |
|--------------------|-----------|----------------------------|----|-------------|----------------------|-------------|-------------|
| | | | | | Greenhouse-Geisser | Huynh-Feldt | Untergrenze |
| FEHLER | ,935 | 8,514 | 2 | ,014 | ,939 | ,990 | ,500 |

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

- a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.
- b. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLER

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|----------|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| PD_3SFPR | Gr1 | Kontrolle | 4,5087 | 5,34181 | 21 |
| | | LRS | 25,1515 | 16,95707 | 22 |
| | | Gesamt | 15,0702 | 16,32077 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 3,1118 | 3,98476 | 24 |
| | | LRS | 13,3333 | 11,88177 | 18 |
| | | Gesamt | 7,4925 | 9,67754 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | ,8370 | 2,21721 | 27 |
| | | LRS | 4,0432 | 3,95686 | 22 |
| | | Gesamt | 2,2765 | 3,47976 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 2,6662 | 4,16240 | 72 |
| | | LRS | 14,2304 | 14,98018 | 62 |
| | | Gesamt | 8,0168 | 12,06931 | 134 |
| PD_3NFPR | Gr1 | Kontrolle | 17,6862 | 9,18652 | 21 |
| | | LRS | 52,7273 | 21,86143 | 22 |
| | | Gesamt | 35,6142 | 24,35685 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 18,5310 | 7,78215 | 24 |
| | | LRS | 39,6296 | 20,51267 | 18 |
| | | Gesamt | 27,5732 | 17,89177 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 4,6973 | 5,55415 | 27 |
| | | LRS | 22,6922 | 13,38663 | 22 |
| | | Gesamt | 12,7766 | 13,30003 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 13,0969 | 9,88580 | 72 |
| | | LRS | 38,2671 | 22,51518 | 62 |
| | | Gesamt | 24,7428 | 21,05615 | 134 |
| PB_FPR | Gr1 | Kontrolle | 13,4859 | 9,84153 | 21 |
| | | LRS | 37,8729 | 19,33484 | 22 |
| | | Gesamt | 25,9629 | 19,62598 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 13,2585 | 10,75916 | 24 |
| | | LRS | 29,4444 | 14,93997 | 18 |
| | | Gesamt | 20,1953 | 14,94023 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 2,5260 | 5,91306 | 27 |
| | | LRS | 18,4730 | 16,41016 | 22 |
| | | Gesamt | 9,6859 | 14,17674 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 9,3001 | 10,27208 | 72 |
| | | LRS | 28,5421 | 18,75673 | 62 |
| | | Gesamt | 18,2031 | 17,61892 | 134 |

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

| | |
|-------------|-----------|
| Box-M-Test | 230,070 |
| F | 7,200 |
| df1 | 30 |
| df2 | 33046,389 |
| Signifikanz | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

- a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLER

Multivariate Tests^c

| Effekt | | Wert | F | Hypothese df | Fehler df | Signifikanz | Partielles Eta-Quadrat |
|-------------------------|--|-------|----------------------|--------------|-----------|-------------|------------------------|
| FEHLER | Pillai-Spur | ,715 | 159,577 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,715 |
| | Wilks-Lambda | ,285 | 159,577 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,715 |
| | Hotelling-Spur | 2,513 | 159,577 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,715 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | 2,513 | 159,577 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,715 |
| FEHLER * ALTER_GR | Pillai-Spur | ,144 | 4,970 | 4,000 | 256,000 | ,001 | ,072 |
| | Wilks-Lambda | ,857 | 5,113 ^a | 4,000 | 254,000 | ,001 | ,075 |
| | Hotelling-Spur | ,167 | 5,254 | 4,000 | 252,000 | ,000 | ,077 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,162 | 10,389 ^b | 2,000 | 128,000 | ,000 | ,140 |
| FEHLER * LRS | Pillai-Spur | ,265 | 22,912 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,265 |
| | Wilks-Lambda | ,735 | 22,912 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,265 |
| | Hotelling-Spur | ,361 | 22,912 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,265 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,361 | 22,912 ^a | 2,000 | 127,000 | ,000 | ,265 |
| FEHLER * ALTER_GR * LRS | Pillai-Spur | ,028 | ,902 | 4,000 | 256,000 | ,463 | ,014 |
| | Wilks-Lambda | ,972 | ,897 ^a | 4,000 | 254,000 | ,466 | ,014 |
| | Hotelling-Spur | ,028 | ,893 | 4,000 | 252,000 | ,469 | ,014 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,023 | 1,456 ^b | 2,000 | 128,000 | ,237 | ,022 |

- a. Exakte Statistik
- b. Die Statistik ist eine Obergrenze auf F, die eine Untergrenze auf dem Signifikanzniveau ergibt.
- c. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLER

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

| Quelle | | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Partielles Eta-Quadrat |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------|---------------------|---------|-------------|------------------------|
| FEHLER | Sphärizität angenommen | 20527,590 | 2 | 10263,795 | 119,948 | ,000 | ,484 |
| | Greenhouse-Geisser | 20527,590 | 1,878 | 10929,292 | 119,948 | ,000 | ,484 |
| | Huynh-Feldt | 20527,590 | 1,980 | 10369,129 | 119,948 | ,000 | ,484 |
| | Untergrenze | 20527,590 | 1,000 | 20527,590 | 119,948 | ,000 | ,484 |
| FEHLER * ALTER_GR | Sphärizität angenommen | 1419,594 | 4 | 354,898 | 4,148 | ,003 | ,061 |
| | Greenhouse-Geisser | 1419,594 | 3,756 | 377,910 | 4,148 | ,004 | ,061 |
| | Huynh-Feldt | 1419,594 | 3,959 | 358,541 | 4,148 | ,003 | ,061 |
| | Untergrenze | 1419,594 | 2,000 | 709,797 | 4,148 | ,018 | ,061 |
| FEHLER * LRS | Sphärizität angenommen | 2956,400 | 2 | 1478,200 | 17,275 | ,000 | ,119 |
| | Greenhouse-Geisser | 2956,400 | 1,878 | 1574,045 | 17,275 | ,000 | ,119 |
| | Huynh-Feldt | 2956,400 | 1,980 | 1493,370 | 17,275 | ,000 | ,119 |
| | Untergrenze | 2956,400 | 1,000 | 2956,400 | 17,275 | ,000 | ,119 |
| FEHLER * ALTER_GR * LRS | Sphärizität angenommen | 346,109 | 4 | 86,527 | 1,011 | ,402 | ,016 |
| | Greenhouse-Geisser | 346,109 | 3,756 | 92,138 | 1,011 | ,399 | ,016 |
| | Huynh-Feldt | 346,109 | 3,959 | 87,415 | 1,011 | ,402 | ,016 |
| | Untergrenze | 346,109 | 2,000 | 173,055 | 1,011 | ,367 | ,016 |
| Fehler(FEHLER) | Sphärizität angenommen | 21905,503 | 256 | 85,568 | | | |
| | Greenhouse-Geisser | 21905,503 | 240,412 | 91,117 | | | |
| | Huynh-Feldt | 21905,503 | 253,399 | 86,447 | | | |
| | Untergrenze | 21905,503 | 128,000 | 171,137 | | | |

Tests der Innersubjektkontraste

Maß: MASS_1

| Quelle | FEHLER | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Partielles Eta-Quadrat |
|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-----|---------------------|--------|-------------|------------------------|
| FEHLER | Stufe 1 gegen Stufe 3 | 15050,599 | 1 | 15050,599 | 83,814 | ,000 | ,396 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 3 | 6133,124 | 1 | 6133,124 | 30,072 | ,000 | ,190 |
| FEHLER * ALTER_GR | Stufe 1 gegen Stufe 3 | 578,234 | 2 | 289,117 | 1,610 | ,204 | ,025 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 3 | 982,449 | 2 | 491,225 | 2,409 | ,094 | ,036 |
| FEHLER * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 3 | 1847,520 | 1 | 1847,520 | 10,289 | ,002 | ,074 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 3 | 1137,443 | 1 | 1137,443 | 5,577 | ,020 | ,042 |
| FEHLER * ALTER_GR * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 3 | 507,121 | 2 | 253,560 | 1,412 | ,247 | ,022 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 3 | 431,730 | 2 | 215,865 | 1,058 | ,350 | ,016 |
| Fehler(FEHLER) | Stufe 1 gegen Stufe 3 | 22985,027 | 128 | 179,571 | | | |
| | Stufe 2 gegen Stufe 3 | 26105,032 | 128 | 203,946 | | | |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

| | F | df1 | df2 | Signifikanz |
|----------|--------|-----|-----|-------------|
| PD_3SFPR | 20,120 | 5 | 128 | ,000 |
| PD_3NFPR | 9,312 | 5 | 128 | ,000 |
| PB_FPR | 5,432 | 5 | 128 | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLER

Tests der Zwischensubjekteffekte

Maß: MASS_1

Transformierte Variable: Mittel

| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Partielles Eta-Quadrat |
|----------------|--------------------------|-----|---------------------|---------|-------------|------------------------|
| Intercept | 42234,894 | 1 | 42234,894 | 455,955 | ,000 | ,781 |
| ALTER_GR | 6351,502 | 2 | 3175,751 | 34,284 | ,000 | ,349 |
| LRS | 11052,307 | 1 | 11052,307 | 119,317 | ,000 | ,482 |
| ALTER_GR * LRS | 1241,849 | 2 | 620,925 | 6,703 | ,002 | ,095 |
| Fehler | 11856,574 | 128 | 92,629 | | | |

Lesen und Schreiben (multiv. ALM ohne MW)

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|-------|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| RS_IQ | Gr1 | Kontrolle | 105,71665 | 11,784646 | 21 |
| | | LRS | 70,70986 | 9,194614 | 22 |
| | | Gesamt | 87,80620 | 20,540121 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 99,65957 | 11,969416 | 24 |
| | | LRS | 67,16065 | 13,878938 | 18 |
| | | Gesamt | 85,73146 | 20,620451 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 104,11531 | 13,933345 | 27 |
| | | LRS | 63,76073 | 10,989237 | 22 |
| | | Gesamt | 85,99692 | 23,859368 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 103,09712 | 12,768790 | 72 |
| | | LRS | 67,21362 | 11,535603 | 62 |
| | | Gesamt | 86,49431 | 21,693088 | 134 |
| ZLTF | Gr1 | Kontrolle | 100,0238 | 7,00397 | 21 |
| | | LRS | 77,4091 | 10,76053 | 22 |
| | | Gesamt | 88,4535 | 14,56311 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 103,1186 | 5,99827 | 24 |
| | | LRS | 82,1806 | 14,48194 | 18 |
| | | Gesamt | 94,1451 | 14,73517 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 109,7998 | 3,78258 | 27 |
| | | LRS | 97,9362 | 10,38580 | 22 |
| | | Gesamt | 104,4733 | 9,51245 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 104,7214 | 6,92216 | 72 |
| | | LRS | 86,0782 | 14,75613 | 62 |
| | | Gesamt | 96,0954 | 14,57756 | 134 |
| ZLTZ | Gr1 | Kontrolle | 103,7857 | 9,43076 | 21 |
| | | LRS | 71,2614 | 8,66660 | 22 |
| | | Gesamt | 87,1453 | 18,72206 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 108,4850 | 7,01535 | 24 |
| | | LRS | 83,2917 | 15,27860 | 18 |
| | | Gesamt | 97,6878 | 16,84124 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 111,4681 | 2,76372 | 27 |
| | | LRS | 101,0859 | 10,03759 | 22 |
| | | Gesamt | 106,8067 | 8,68560 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 108,2330 | 7,32426 | 72 |
| | | LRS | 85,3369 | 16,96291 | 62 |
| | | Gesamt | 97,6393 | 17,08556 | 134 |

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

| | |
|-------------|-----------|
| Box-M-Test | 131,667 |
| F | 4,120 |
| df1 | 30 |
| df2 | 33046,389 |
| Signifikanz | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

Multivariate Tests^c

| Effekt | | Wert | F | Hypothese df | Fehler df | Signifikanz | Partielles Eta-Quadrat |
|----------------|--|---------|-----------------------|--------------|-----------|-------------|------------------------|
| Intercept | Pillai-Spur | ,995 | 7778,233 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,995 |
| | Wilks-Lambda | ,005 | 7778,233 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,995 |
| | Hotelling-Spur | 185,196 | 7778,233 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,995 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | 185,196 | 7778,233 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,995 |
| ALTER_GR | Pillai-Spur | ,523 | 15,004 | 6,000 | 254,000 | ,000 | ,262 |
| | Wilks-Lambda | ,492 | 17,897 ^a | 6,000 | 252,000 | ,000 | ,299 |
| | Hotelling-Spur | 1,003 | 20,900 | 6,000 | 250,000 | ,000 | ,334 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,972 | 41,136 ^b | 3,000 | 127,000 | ,000 | ,493 |
| LRS | Pillai-Spur | ,787 | 155,234 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,787 |
| | Wilks-Lambda | ,213 | 155,234 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,787 |
| | Hotelling-Spur | 3,696 | 155,234 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,787 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | 3,696 | 155,234 ^a | 3,000 | 126,000 | ,000 | ,787 |
| ALTER_GR * LRS | Pillai-Spur | ,241 | 5,803 | 6,000 | 254,000 | ,000 | ,121 |
| | Wilks-Lambda | ,761 | 6,134 ^a | 6,000 | 252,000 | ,000 | ,127 |
| | Hotelling-Spur | ,310 | 6,462 | 6,000 | 250,000 | ,000 | ,134 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,299 | 12,668 ^b | 3,000 | 127,000 | ,000 | ,230 |

a. Exakte Statistik

b. Die Statistik ist eine Obergrenze auf F, die eine Untergrenze auf dem Signifikanzniveau ergibt.

c. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

| | F | df1 | df2 | Signifikanz |
|-------|--------|-----|-----|-------------|
| RS_IQ | 1,658 | 5 | 128 | ,149 |
| ZLTF | 8,865 | 5 | 128 | ,000 |
| ZLTZ | 10,022 | 5 | 128 | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

Tests der Zwischensubjekteffekte

| Quelle | Abhängige Variable | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Partielles Eta-Quadrat |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------|-----|---------------------|-----------|-------------|------------------------|
| Korrigiertes Modell | RS_IQ | 43882,181 ^a | 5 | 8776,436 | 60,054 | ,000 | ,701 |
| | ZLTF | 17820,459 ^b | 5 | 3564,092 | 43,686 | ,000 | ,631 |
| | ZLTZ | 28054,034 ^c | 5 | 5610,807 | 66,678 | ,000 | ,723 |
| Intercept | RS_IQ | 957692,626 | 1 | 957692,626 | 6553,121 | ,000 | ,981 |
| | ZLTF | 1192994,041 | 1 | 1192994,0 | 14622,932 | ,000 | ,991 |
| | ZLTZ | 1230550,022 | 1 | 1230550,0 | 14623,752 | ,000 | ,991 |
| ALTER_GR | RS_IQ | 599,035 | 2 | 299,518 | 2,049 | ,133 | ,031 |
| | ZLTF | 5707,274 | 2 | 2853,637 | 34,978 | ,000 | ,353 |
| | ZLTZ | 8083,389 | 2 | 4041,694 | 48,031 | ,000 | ,429 |
| LRS | RS_IQ | 42648,020 | 1 | 42648,020 | 291,824 | ,000 | ,695 |
| | ZLTF | 11257,767 | 1 | 11257,767 | 137,990 | ,000 | ,519 |
| | ZLTZ | 17000,772 | 1 | 17000,772 | 202,036 | ,000 | ,612 |
| ALTER_GR * LRS | RS_IQ | 365,422 | 2 | 182,711 | 1,250 | ,290 | ,019 |
| | ZLTF | 773,170 | 2 | 386,585 | 4,739 | ,010 | ,069 |
| | ZLTZ | 2930,346 | 2 | 1465,173 | 17,412 | ,000 | ,214 |
| Fehler | RS_IQ | 18706,301 | 128 | 146,143 | | | |
| | ZLTF | 10442,724 | 128 | 81,584 | | | |
| | ZLTZ | 10770,861 | 128 | 84,147 | | | |
| Gesamt | RS_IQ | 1065078,020 | 134 | | | | |
| | ZLTF | 1265663,364 | 134 | | | | |
| | ZLTZ | 1316305,244 | 134 | | | | |
| Korrigierte Gesamtvariation | RS_IQ | 62588,482 | 133 | | | | |
| | ZLTF | 28263,182 | 133 | | | | |
| | ZLTZ | 38824,895 | 133 | | | | |

a. R-Quadrat = ,701 (korrigiertes R-Quadrat = ,689)

b. R-Quadrat = ,631 (korrigiertes R-Quadrat = ,616)

c. R-Quadrat = ,723 (korrigiertes R-Quadrat = ,712)

Reaktionszeiten (ERTS-Daten) (ALM)

Innersubjektfaktoren

Maß: MASS_1

| REAKZEIT | Abhängige Variable |
|----------|--------------------|
| 1 | S_M_CU |
| 2 | BL_M_CU |
| 3 | HL_M_CU |
| 4 | NL_M_CU |
| 5 | NR_M_CU |

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|---------|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| S_M_CU | Gr1 | Kontrolle | 978,0131 | 166,9172 | 21 |
| | | LRS | 1018,1466 | 169,3171 | 22 |
| | | Gesamt | 998,5465 | 167,3723 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 864,5625 | 184,2509 | 24 |
| | | LRS | 890,2944 | 185,0963 | 18 |
| | | Gesamt | 875,5905 | 182,8003 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 819,1685 | 304,7788 | 27 |
| | | LRS | 860,9398 | 241,0397 | 22 |
| | | Gesamt | 837,9230 | 275,9981 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 880,6295 | 239,1453 | 72 |
| | | LRS | 925,2452 | 210,6744 | 62 |
| | | Gesamt | 901,2726 | 226,6832 | 134 |
| BL_M_CU | Gr1 | Kontrolle | 2300,6286 | 385,5765 | 21 |
| | | LRS | 2488,2932 | 482,3160 | 22 |
| | | Gesamt | 2396,6430 | 442,8527 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 1826,8729 | 288,7945 | 24 |
| | | LRS | 2163,9167 | 393,3135 | 18 |
| | | Gesamt | 1971,3202 | 373,3996 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 1629,1952 | 298,9287 | 27 |
| | | LRS | 1912,2568 | 585,4192 | 22 |
| | | Gesamt | 1756,2841 | 467,5210 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 1890,9225 | 422,7339 | 72 |
| | | LRS | 2189,7194 | 548,9026 | 62 |
| | | Gesamt | 2029,1718 | 505,9134 | 134 |
| HL_M_CU | Gr1 | Kontrolle | 1620,4910 | 464,6799 | 21 |
| | | LRS | 2279,3209 | 552,7328 | 22 |
| | | Gesamt | 1957,5667 | 605,4892 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 1331,8588 | 309,0089 | 24 |
| | | LRS | 1866,1083 | 456,8684 | 18 |
| | | Gesamt | 1560,8229 | 460,1260 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 1072,0559 | 370,8078 | 27 |
| | | LRS | 1533,9527 | 567,6998 | 22 |
| | | Gesamt | 1279,4382 | 518,9976 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 1318,6171 | 438,4509 | 72 |
| | | LRS | 1894,8705 | 612,2307 | 62 |
| | | Gesamt | 1585,2418 | 598,0904 | 134 |
| NL_M_CU | Gr1 | Kontrolle | 2048,5929 | 471,8258 | 21 |
| | | LRS | 2711,2295 | 542,7565 | 22 |
| | | Gesamt | 2387,6163 | 604,6704 | 43 |

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|---------|-----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| NL_M_CU | Gr2 | Kontrolle | 1668,5729 | 405,0134 | 24 |
| | | LRS | 2283,0889 | 381,0531 | 18 |
| | | Gesamt | 1931,9369 | 496,9527 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 1351,1019 | 349,0635 | 27 |
| | | LRS | 1970,1545 | 687,5620 | 22 |
| | | Gesamt | 1629,0439 | 607,9541 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 1660,3604 | 491,3667 | 72 |
| | | LRS | 2323,9685 | 635,8907 | 62 |
| | | Gesamt | 1967,4030 | 651,6522 | 134 |
| NR_M_CU | Gr1 | Kontrolle | 2072,6476 | 594,4816 | 21 |
| | | LRS | 2851,9023 | 683,0962 | 22 |
| | | Gesamt | 2471,3360 | 746,2840 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 1748,2849 | 416,6859 | 24 |
| | | LRS | 2463,5056 | 549,2383 | 18 |
| | | Gesamt | 2054,8080 | 592,2930 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 1545,9866 | 435,5821 | 27 |
| | | LRS | 2395,8500 | 660,1968 | 22 |
| | | Gesamt | 1927,5579 | 689,8330 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | 1767,0288 | 521,1542 | 72 | |
| | LRS | 2577,3169 | 661,5519 | 62 | |
| | Gesamt | 2141,9382 | 714,2635 | 134 | |

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

| | |
|-------------|-----------|
| Box-M-Test | 168,626 |
| F | 2,019 |
| df1 | 75 |
| df2 | 24837,137 |
| Signifikanz | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

a.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: REAKZEIT

Multivariate Tests

| Effekt | | Wert | F | Hypothese df | Fehler df | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|---------------------------|--|--------|----------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| REAKZEIT | Pillai-Spur | ,923 | 375,657 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,923 |
| | Wilks-Lambda | ,077 | 375,657 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,923 |
| | Hotelling-Spur | 12,021 | 375,657 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,923 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | 12,021 | 375,657 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,923 |
| REAKZEIT * ALTER_GR | Pillai-Spur | ,311 | 5,799 | 8,000 | 252,000 | ,000 | ,155 |
| | Wilks-Lambda | ,693 | 6,288 ^a | 8,000 | 250,000 | ,000 | ,168 |
| | Hotelling-Spur | ,437 | 6,777 | 8,000 | 248,000 | ,000 | ,179 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,424 | 13,348 ^b | 4,000 | 126,000 | ,000 | ,298 |
| REAKZEIT * LRS | Pillai-Spur | ,411 | 21,798 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,411 |
| | Wilks-Lambda | ,589 | 21,798 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,411 |
| | Hotelling-Spur | ,698 | 21,798 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,411 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,698 | 21,798 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,411 |
| REAKZEIT * ALTER_GR * LRS | Pillai-Spur | ,046 | ,748 | 8,000 | 252,000 | ,649 | ,023 |
| | Wilks-Lambda | ,954 | ,744 ^a | 8,000 | 250,000 | ,653 | ,023 |
| | Hotelling-Spur | ,048 | ,739 | 8,000 | 248,000 | ,657 | ,023 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,035 | 1,099 ^b | 4,000 | 126,000 | ,360 | ,034 |

a. Exakte Statistik

b. Die Statistik ist eine Obergrenze auf F, die eine Untergrenze auf dem Signifikanzniveau ergibt.

Mauchly-Test auf Sphärizität
Maß: MASS_1

| Innersubjekteffekt | Mauchly-W | Approximiertes Chi-Quadrat | df | Signifikanz | Epsilon ^a | | |
|--------------------|-----------|----------------------------|----|-------------|----------------------|-------------|-------------|
| | | | | | Greenhouse-Geisser | Huynh-Feldt | Untergrenze |
| REAKZEIT | 652 | 54,018 | 9 | ,000 | ,830 | ,889 | ,250 |

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

- a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

| Quelle | | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|---------------------------|------------------------|--------------------------|---------|---------------------|---------|-------------|-------------|
| REAKZEIT | Sphärizität angenommen | 141646854,808 | 4 | 35411714 | 396,570 | ,000 | ,756 |
| | Greenhouse-Geisser | 141646854,808 | 3,322 | 42641635 | 396,570 | ,000 | ,756 |
| | Huynh-Feldt | 141646854,808 | 3,554 | 39854314 | 396,570 | ,000 | ,756 |
| | Untergrenze | 141646854,808 | 1,000 | 141646855 | 396,570 | ,000 | ,756 |
| REAKZEIT * ALTER_GR | Sphärizität angenommen | 4657357,627 | 8 | 582169,703 | 6,520 | ,000 | ,092 |
| | Greenhouse-Geisser | 4657357,627 | 6,644 | 701029,838 | 6,520 | ,000 | ,092 |
| | Huynh-Feldt | 4657357,627 | 7,108 | 655206,190 | 6,520 | ,000 | ,092 |
| | Untergrenze | 4657357,627 | 2,000 | 2328678,8 | 6,520 | ,002 | ,092 |
| REAKZEIT * LRS | Sphärizität angenommen | 11792325,938 | 4 | 2948081,5 | 33,015 | ,000 | ,205 |
| | Greenhouse-Geisser | 11792325,938 | 3,322 | 3549983,9 | 33,015 | ,000 | ,205 |
| | Huynh-Feldt | 11792325,938 | 3,554 | 3317935,0 | 33,015 | ,000 | ,205 |
| | Untergrenze | 11792325,938 | 1,000 | 11792326 | 33,015 | ,000 | ,205 |
| REAKZEIT * ALTER_GR * LRS | Sphärizität angenommen | 451550,558 | 8 | 56443,820 | ,632 | ,751 | ,010 |
| | Greenhouse-Geisser | 451550,558 | 6,644 | 67967,813 | ,632 | ,721 | ,010 |
| | Huynh-Feldt | 451550,558 | 7,108 | 63525,017 | ,632 | ,732 | ,010 |
| | Untergrenze | 451550,558 | 2,000 | 225775,279 | ,632 | ,533 | ,010 |
| Fehler(REAKZEIT) | Sphärizität angenommen | 45719061,465 | 512 | 89295,042 | | | |
| | Greenhouse-Geisser | 45719061,465 | 425,190 | 107526,188 | | | |
| | Huynh-Feldt | 45719061,465 | 454,927 | 100497,611 | | | |
| | Untergrenze | 45719061,465 | 128,000 | 357180,168 | | | |

Tests der Innersubjektkontraste

Maß: MASS_1

| Quelle | REAKZEIT | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|-----|---------------------|---------|-------------|-------------|
| REAKZEIT | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 214369889,132 | 1 | 214369889 | 763,771 | ,000 | ,856 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 2100791,995 | 1 | 2100792,0 | 9,135 | ,003 | ,067 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 41741309,373 | 1 | 41741309 | 213,558 | ,000 | ,625 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 4006552,688 | 1 | 4006552,7 | 19,566 | ,000 | ,133 |
| | Greenhouse-Geisser | | | | | | |
| REAKZEIT * ALTER_GR | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 2630312,645 | 2 | 1315156,3 | 4,686 | ,011 | ,068 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 420707,769 | 2 | 210353,884 | ,915 | ,403 | ,014 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 770578,210 | 2 | 385289,105 | 1,971 | ,143 | ,030 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 1335387,895 | 2 | 667693,947 | 3,261 | ,042 | ,048 |
| | Greenhouse-Geisser | | | | | | |
| REAKZEIT * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 18339688,998 | 1 | 18339689 | 65,342 | ,000 | ,338 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 8655251,228 | 1 | 8655251,2 | 37,637 | ,000 | ,227 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 1742091,179 | 1 | 1742091,2 | 8,913 | ,003 | ,065 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 736190,647 | 1 | 736190,647 | 3,595 | ,060 | ,027 |
| | Greenhouse-Geisser | | | | | | |
| REAKZEIT * ALTER_GR * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 79806,440 | 2 | 39903,220 | ,142 | ,868 | ,002 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 288052,571 | 2 | 144026,286 | ,626 | ,536 | ,010 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 454582,412 | 2 | 227291,206 | 1,163 | ,316 | ,018 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 115740,113 | 2 | 57870,057 | ,283 | ,754 | ,004 |
| | Greenhouse-Geisser | | | | | | |
| Fehler(REAKZEIT) | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 35926140,414 | 128 | 280672,972 | | | |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 29435613,759 | 128 | 229965,732 | | | |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 25018466,993 | 128 | 195496,773 | | | |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 26210555,806 | 128 | 204769,967 | | | |
| | Greenhouse-Geisser | | | | | | |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

| | F | df1 | df2 | Signifikanz |
|---------|-------|-----|-----|-------------|
| S_M_CU | ,904 | 5 | 128 | ,481 |
| BL_M_CU | 2,281 | 5 | 128 | ,050 |
| HL_M_CU | 2,181 | 5 | 128 | ,060 |
| NL_M_CU | 2,480 | 5 | 128 | ,035 |
| NR_M_CU | 1,128 | 5 | 128 | ,349 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

- a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: REAKZEIT

Tests der Zwischensubjekteffekte

Maß: MASS_1

Transformierte Variable: Mittel

| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|----------------|--------------------------|-----|---------------------|----------|-------------|-------------|
| Intercept | 405193028,080 | 1 | 405193028 | 3272,719 | ,000 | ,962 |
| ALTER_GR | 6409381,975 | 2 | 3204691,0 | 25,884 | ,000 | ,288 |
| LRS | 6802180,575 | 1 | 6802180,6 | 54,941 | ,000 | ,300 |
| ALTER_GR * LRS | 2340,716 | 2 | 1170,358 | ,009 | ,991 | ,000 |
| Fehler | 15847588,958 | 128 | 123809,289 | | | |

Fehler-Prozent (ERTS-Daten) (ALM)

Innersubjektfaktoren

Maß: MASS_1

| FEHLERP | Abhängige Variable |
|---------|--------------------|
| 1 | FPROZSLG |
| 2 | FPROZBL |
| 3 | FPROZHL |
| 4 | FPROZNL |
| 5 | FPROZNR |

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|----------|-----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| FPROZSLG | Gr1 | Kontrolle | 3,6693 | 3,3058 | 21 |
| | | LRS | 5,6430 | 6,4747 | 22 |
| | | Gesamt | 4,6791 | 5,2117 | 43 |
| Gr2 | Kontrolle | | 2,7279 | 1,8079 | 24 |
| | LRS | | 3,7192 | 2,7310 | 18 |
| | Gesamt | | 3,1527 | 2,2743 | 42 |
| Gr3 | Kontrolle | | 1,7393 | 1,3355 | 27 |
| | LRS | | 2,1980 | 2,1155 | 22 |
| | Gesamt | | 1,9452 | 1,7254 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | | 2,6318 | 2,3270 | 72 |
| | LRS | | 3,8621 | 4,4944 | 62 |
| | Gesamt | | 3,2010 | 3,5404 | 134 |

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|---------|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| FPROZBL | Gr1 | Kontrolle | 8,4217 | 6,1699 | 21 |
| | | LRS | 10,3500 | 7,8808 | 22 |
| | | Gesamt | 9,4082 | 7,0804 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 8,4487 | 7,3509 | 24 |
| | | LRS | 6,4510 | 3,3050 | 18 |
| | | Gesamt | 7,5925 | 5,9869 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 4,2602 | 2,3326 | 27 |
| | | LRS | 7,1327 | 10,1854 | 22 |
| | | Gesamt | 5,5499 | 7,1006 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 6,8701 | 5,8622 | 72 |
| | | LRS | 8,0764 | 7,9438 | 62 |
| | | Gesamt | 7,4282 | 6,9031 | 134 |
| FPROZHL | Gr1 | Kontrolle | 6,7460 | 6,7735 | 21 |
| | | LRS | 8,9778 | 6,7955 | 22 |
| | | Gesamt | 7,8878 | 6,7979 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 4,3179 | 2,5391 | 24 |
| | | LRS | 5,4940 | 4,1747 | 18 |
| | | Gesamt | 4,8220 | 3,3451 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 2,1905 | 1,5582 | 27 |
| | | LRS | 4,6518 | 5,8990 | 22 |
| | | Gesamt | 3,2956 | 4,2508 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 4,2283 | 4,3998 | 72 |
| | | LRS | 6,4314 | 6,0394 | 62 |
| | | Gesamt | 5,2476 | 5,3178 | 134 |
| FPROZNL | Gr1 | Kontrolle | 9,0108 | 7,2451 | 21 |
| | | LRS | 14,4290 | 7,3297 | 22 |
| | | Gesamt | 11,7829 | 7,7051 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 7,1296 | 4,4417 | 24 |
| | | LRS | 8,9223 | 5,4524 | 18 |
| | | Gesamt | 7,8979 | 4,9194 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 3,2489 | 1,8852 | 27 |
| | | LRS | 7,3790 | 8,0856 | 22 |
| | | Gesamt | 5,1032 | 5,9022 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 6,2230 | 5,3309 | 72 |
| | | LRS | 10,3287 | 7,6859 | 62 |
| | | Gesamt | 8,1227 | 6,8181 | 134 |
| FPROZNR | Gr1 | Kontrolle | 6,5617 | 7,7124 | 21 |
| | | LRS | 17,0269 | 10,9646 | 22 |
| | | Gesamt | 11,9160 | 10,7913 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | 4,6821 | 4,7555 | 24 |
| | | LRS | 9,5339 | 7,5470 | 18 |
| | | Gesamt | 6,7614 | 6,4968 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 2,1915 | 1,9475 | 27 |
| | | LRS | 6,3628 | 4,4706 | 22 |
| | | Gesamt | 4,0643 | 3,8978 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 4,2963 | 5,3594 | 72 |
| | | LRS | 11,0675 | 9,2535 | 62 |
| | | Gesamt | 7,4293 | 8,1296 | 134 |

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

| | |
|-------------|-----------|
| Box-M-Test | 402,998 |
| F | 4,826 |
| df1 | 75 |
| df2 | 24837,137 |
| Signifikanz | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

- a.
Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLERP

Multivariate Tests^c

| Effekt | | Wert | F | Hypothese df | Fehler df | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|--------------------------|--|-------|---------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| FEHLERP | Pillai-Spur | ,590 | 44,934 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,590 |
| | Wilks-Lambda | ,410 | 44,934 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,590 |
| | Hotelling-Spur | 1,438 | 44,934 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,590 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | 1,438 | 44,934 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,590 |
| FEHLERP * ALTER_GR | Pillai-Spur | ,153 | 2,601 | 8,000 | 252,000 | ,010 | ,076 |
| | Wilks-Lambda | ,848 | 2,681 ^a | 8,000 | 250,000 | ,008 | ,079 |
| | Hotelling-Spur | ,178 | 2,759 | 8,000 | 248,000 | ,006 | ,082 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,173 | 5,437 ^b | 4,000 | 126,000 | ,000 | ,147 |
| FEHLERP * LRS | Pillai-Spur | ,216 | 8,626 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,216 |
| | Wilks-Lambda | ,784 | 8,626 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,216 |
| | Hotelling-Spur | ,276 | 8,626 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,216 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,276 | 8,626 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,216 |
| FEHLERP * ALTER_GR * LRS | Pillai-Spur | ,102 | 1,701 | 8,000 | 252,000 | ,099 | ,051 |
| | Wilks-Lambda | ,900 | 1,690 ^a | 8,000 | 250,000 | ,101 | ,051 |
| | Hotelling-Spur | ,108 | 1,678 | 8,000 | 248,000 | ,104 | ,051 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,066 | 2,075 ^b | 4,000 | 126,000 | ,088 | ,062 |

- a. Exakte Statistik
b. Die Statistik ist eine Obergrenze auf F, die eine Untergrenze auf dem Signifikanzniveau ergibt.

c.
Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLERP

Mauchly-Test auf Sphärität^b

Maß: MASS_1

| Innersubjekteffekt | Mauchly-W | Approximiertes Chi-Quadrat | df | Signifikanz | Epsilon ^a | | |
|--------------------|-----------|----------------------------|----|-------------|----------------------|-------------|-------------|
| | | | | | Greenhouse-Geisser | Huynh-Feldt | Untergrenze |
| FEHLERP | ,575 | 70,056 | 9 | ,000 | ,783 | ,837 | ,250 |

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

- a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.
b.
Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLERP

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

| Quelle | | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|--------------------------|------------------------|--------------------------|---------|---------------------|--------|-------------|-------------|
| FEHLERP | Sphärizität angenommen | 2311,902 | 4 | 577,976 | 38,725 | ,000 | ,232 |
| | Greenhouse-Geisser | 2311,902 | 3,133 | 737,864 | 38,725 | ,000 | ,232 |
| | Huynh-Feldt | 2311,902 | 3,346 | 690,863 | 38,725 | ,000 | ,232 |
| | Untergrenze | 2311,902 | 1,000 | 2311,902 | 38,725 | ,000 | ,232 |
| FEHLERP * ALTER_GR | Sphärizität angenommen | 369,615 | 8 | 46,202 | 3,096 | ,002 | ,046 |
| | Greenhouse-Geisser | 369,615 | 6,266 | 58,983 | 3,096 | ,005 | ,046 |
| | Huynh-Feldt | 369,615 | 6,693 | 55,226 | 3,096 | ,004 | ,046 |
| | Untergrenze | 369,615 | 2,000 | 184,807 | 3,096 | ,049 | ,046 |
| FEHLERP * LRS | Sphärizität angenommen | 710,901 | 4 | 177,725 | 11,908 | ,000 | ,085 |
| | Greenhouse-Geisser | 710,901 | 3,133 | 226,891 | 11,908 | ,000 | ,085 |
| | Huynh-Feldt | 710,901 | 3,346 | 212,438 | 11,908 | ,000 | ,085 |
| | Untergrenze | 710,901 | 1,000 | 710,901 | 11,908 | ,001 | ,085 |
| FEHLERP * ALTER_GR * LRS | Sphärizität angenommen | 257,532 | 8 | 32,192 | 2,157 | ,029 | ,033 |
| | Greenhouse-Geisser | 257,532 | 6,266 | 41,097 | 2,157 | ,044 | ,033 |
| | Huynh-Feldt | 257,532 | 6,693 | 38,479 | 2,157 | ,040 | ,033 |
| | Untergrenze | 257,532 | 2,000 | 128,766 | 2,157 | ,120 | ,033 |
| Fehler(FEHLERP) | Sphärizität angenommen | 7641,608 | 512 | 14,925 | | | |
| | Greenhouse-Geisser | 7641,608 | 401,054 | 19,054 | | | |
| | Huynh-Feldt | 7641,608 | 428,339 | 17,840 | | | |
| | Untergrenze | 7641,608 | 128,000 | 59,700 | | | |

Tests der Innersubjektkontraste

Maß: MASS_1

| Quelle | FEHLERP | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----|---------------------|--------|-------------|-------------|
| FEHLERP | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 2605,952 | 1 | 2605,952 | 66,749 | ,000 | ,343 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 6,145 | 1 | 6,145 | ,118 | ,731 | ,001 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 716,542 | 1 | 716,542 | 21,056 | ,000 | ,141 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 51,847 | 1 | 51,847 | 1,326 | ,252 | ,010 |
| FEHLERP * ALTER_GR | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 545,065 | 2 | 272,532 | 6,981 | ,001 | ,098 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 348,576 | 2 | 174,288 | 3,355 | ,038 | ,050 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 215,911 | 2 | 107,956 | 3,172 | ,045 | ,047 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 32,747 | 2 | 16,373 | ,419 | ,659 | ,006 |
| FEHLERP * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 946,070 | 1 | 946,070 | 24,233 | ,000 | ,159 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 1020,576 | 1 | 1020,576 | 19,644 | ,000 | ,133 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 679,949 | 1 | 679,949 | 19,980 | ,000 | ,135 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 243,343 | 1 | 243,343 | 6,223 | ,014 | ,046 |
| FEHLERP * ALTER_GR * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 161,290 | 2 | 80,645 | 2,066 | ,131 | ,031 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 331,197 | 2 | 165,598 | 3,187 | ,045 | ,047 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 250,952 | 2 | 125,476 | 3,687 | ,028 | ,054 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 145,863 | 2 | 72,932 | 1,865 | ,159 | ,028 |
| Fehler(FEHLERP) | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 4997,280 | 128 | 39,041 | | | |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 6650,056 | 128 | 51,954 | | | |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 4355,937 | 128 | 34,031 | | | |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 5005,438 | 128 | 39,105 | | | |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

| | F | df1 | df2 | Signifikanz |
|----------|-------|-----|-----|-------------|
| FPROZSLG | 3,228 | 5 | 128 | ,009 |
| FPROZBL | 2,063 | 5 | 128 | ,074 |
| FPROZHL | 4,762 | 5 | 128 | ,001 |
| FPROZNL | 3,956 | 5 | 128 | ,002 |
| FPROZNR | 9,832 | 5 | 128 | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: FEHLERP

Tests der Zwischensubjekteffekte

Maß: MASS_1

Transformierte Variable: Mittel

| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|----------------|--------------------------|-----|---------------------|---------|-------------|-------------|
| Intercept | 5497,000 | 1 | 5497,000 | 269,314 | ,000 | ,678 |
| ALTER_GR | 560,700 | 2 | 280,350 | 13,735 | ,000 | ,177 |
| LRS | 270,189 | 1 | 270,189 | 13,237 | ,000 | ,094 |
| ALTER_GR * LRS | 48,657 | 2 | 24,328 | 1,192 | ,307 | ,018 |
| Fehler | 2612,621 | 128 | 20,411 | | | |

nichtgelöste Aufgaben (ERTS-Daten) (ALM)

Innersubjektfaktoren

Maß: MASS_1

| NICHTGEL | Abhängige Variable |
|----------|--------------------|
| 1 | S_NN |
| 2 | BL_NN |
| 3 | HL_NN |
| 4 | NL_NN |
| 5 | NR_NN |

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|--------|-----------|-----------|------------|--------------------|----|
| S_NN | Gr1 | Kontrolle | ,5714 | 1,3161 | 21 |
| | | LRS | 1,1136 | 2,1153 | 22 |
| | | Gesamt | ,8488 | 1,7712 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | ,2083 | ,8198 | 24 |
| | | LRS | 1,0556 | 2,9149 | 18 |
| | | Gesamt | ,5714 | 2,0199 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | 1,0926 | 5,4808 | 27 |
| | | LRS | ,8636 | 1,8720 | 22 |
| | | Gesamt | ,9898 | 4,2211 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | ,6458 | 3,4421 | 72 | |
| | LRS | 1,0081 | 2,2643 | 62 | |
| | Gesamt | ,8134 | 2,9512 | 134 | |
| BL_NN | Gr1 | Kontrolle | 2,524 | 3,341 | 21 |
| | | LRS | 4,182 | 4,171 | 22 |
| | | Gesamt | 3,372 | 3,836 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | ,792 | 1,318 | 24 |
| | | LRS | 2,056 | 3,262 | 18 |
| | | Gesamt | 1,333 | 2,406 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | ,370 | ,839 | 27 |
| | | LRS | ,682 | 1,129 | 22 |
| | | Gesamt | ,510 | ,982 | 49 |
| Gesamt | Kontrolle | 1,139 | 2,190 | 72 | |
| | LRS | 2,323 | 3,411 | 62 | |
| | Gesamt | 1,687 | 2,872 | 134 | |
| HL_NN | Gr1 | Kontrolle | 1,048 | 1,564 | 21 |
| | | LRS | 5,091 | 5,089 | 22 |
| | | Gesamt | 3,116 | 4,277 | 43 |

Deskriptive Statistiken

| | ALTER_GR | LRS | Mittelwert | Standardabweichung | N |
|-------|----------|-----------|------------|--------------------|-----|
| HL_NN | Gr2 | Kontrolle | ,208 | ,658 | 24 |
| | | LRS | 1,611 | 1,787 | 18 |
| | | Gesamt | ,810 | 1,435 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | ,296 | 1,031 | 27 |
| | | LRS | ,636 | 1,529 | 22 |
| | | Gesamt | ,449 | 1,276 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | ,486 | 1,163 | 72 |
| | | LRS | 2,500 | 3,810 | 62 |
| | | Gesamt | 1,418 | 2,897 | 134 |
| NL_NN | Gr1 | Kontrolle | 2,190 | 3,628 | 21 |
| | | LRS | 7,364 | 5,438 | 22 |
| | | Gesamt | 4,837 | 5,282 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | ,667 | 1,049 | 24 |
| | | LRS | 3,056 | 2,859 | 18 |
| | | Gesamt | 1,690 | 2,332 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | ,407 | 1,927 | 27 |
| | | LRS | 1,318 | 2,033 | 22 |
| | | Gesamt | ,816 | 2,007 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 1,014 | 2,452 | 72 |
| | | LRS | 3,968 | 4,563 | 62 |
| | | Gesamt | 2,381 | 3,866 | 134 |
| NR_NN | Gr1 | Kontrolle | 2,857 | 3,582 | 21 |
| | | LRS | 8,500 | 6,442 | 22 |
| | | Gesamt | 5,744 | 5,916 | 43 |
| | Gr2 | Kontrolle | ,667 | 1,007 | 24 |
| | | LRS | 3,111 | 3,008 | 18 |
| | | Gesamt | 1,714 | 2,412 | 42 |
| | Gr3 | Kontrolle | ,407 | 1,047 | 27 |
| | | LRS | 2,409 | 3,390 | 22 |
| | | Gesamt | 1,306 | 2,576 | 49 |
| | Gesamt | Kontrolle | 1,208 | 2,343 | 72 |
| | | LRS | 4,774 | 5,348 | 62 |
| | | Gesamt | 2,858 | 4,386 | 134 |

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

| | |
|-------------|-----------|
| Box-M-Test | 775,344 |
| F | 9,284 |
| df1 | 75 |
| df2 | 24837,137 |
| Signifikanz | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

- a. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: NICHTGEL

Multivariate Tests^c

| Effekt | | Wert | F | Hypothese df | Fehler df | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|---------------------------|--|------|---------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| NICHTGEL | Pillai-Spur | ,318 | 14,547 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,318 |
| | Wilks-Lambda | ,682 | 14,547 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,318 |
| | Hotelling-Spur | ,466 | 14,547 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,318 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,466 | 14,547 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,318 |
| NICHTGEL * ALTER_GR | Pillai-Spur | ,257 | 4,638 | 8,000 | 252,000 | ,000 | ,128 |
| | Wilks-Lambda | ,750 | 4,841 ^a | 8,000 | 250,000 | ,000 | ,134 |
| | Hotelling-Spur | ,325 | 5,042 | 8,000 | 248,000 | ,000 | ,140 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,296 | 9,336 ^b | 4,000 | 126,000 | ,000 | ,229 |
| NICHTGEL * LRS | Pillai-Spur | ,175 | 6,640 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,175 |
| | Wilks-Lambda | ,825 | 6,640 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,175 |
| | Hotelling-Spur | ,212 | 6,640 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,175 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,212 | 6,640 ^a | 4,000 | 125,000 | ,000 | ,175 |
| NICHTGEL * ALTER_GR * LRS | Pillai-Spur | ,097 | 1,598 | 8,000 | 252,000 | ,126 | ,048 |
| | Wilks-Lambda | ,904 | 1,617 ^a | 8,000 | 250,000 | ,120 | ,049 |
| | Hotelling-Spur | ,106 | 1,636 | 8,000 | 248,000 | ,115 | ,050 |
| | Größte charakteristische Wurzel nach Roy | ,099 | 3,124 ^b | 4,000 | 126,000 | ,017 | ,090 |

a. Exakte Statistik

b. Die Statistik ist eine Obergrenze auf F, die eine Untergrenze auf dem Signifikanzniveau ergibt.

c.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: NICHTGEL

Mauchly-Test auf Sphärizität^b

Maß: MASS_1

| Innersubjekteffekt | Mauchly-W | Approximiertes Chi-Quadrat | df | Signifikanz | Epsilon ^a | | |
|--------------------|-----------|----------------------------|----|-------------|----------------------|-------------|-------------|
| | | | | | Greenhouse-Geisser | Huynh-Feldt | Untergrenze |
| NICHTGEL | ,470 | 95,383 | 9 | ,000 | ,725 | ,773 | ,250 |

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

b. Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS
Innersubjekt-Design: NICHTGEL

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

| Quelle | | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|---------------------------|------------------------|--------------------------|---------|---------------------|--------|-------------|-------------|
| NICHTGEL | Sphärizität angenommen | 384,847 | 4 | 96,212 | 20,817 | ,000 | ,140 |
| | Greenhouse-Geisser | 384,847 | 2,900 | 132,715 | 20,817 | ,000 | ,140 |
| | Huynh-Feldt | 384,847 | 3,090 | 124,542 | 20,817 | ,000 | ,140 |
| | Untergrenze | 384,847 | 1,000 | 384,847 | 20,817 | ,000 | ,140 |
| NICHTGEL * ALTER_GR | Sphärizität angenommen | 299,915 | 8 | 37,489 | 8,111 | ,000 | ,112 |
| | Greenhouse-Geisser | 299,915 | 5,800 | 51,713 | 8,111 | ,000 | ,112 |
| | Huynh-Feldt | 299,915 | 6,180 | 48,528 | 8,111 | ,000 | ,112 |
| | Untergrenze | 299,915 | 2,000 | 149,957 | 8,111 | ,000 | ,112 |
| NICHTGEL * LRS | Sphärizität angenommen | 196,634 | 4 | 49,158 | 10,636 | ,000 | ,077 |
| | Greenhouse-Geisser | 196,634 | 2,900 | 67,810 | 10,636 | ,000 | ,077 |
| | Huynh-Feldt | 196,634 | 3,090 | 63,633 | 10,636 | ,000 | ,077 |
| | Untergrenze | 196,634 | 1,000 | 196,634 | 10,636 | ,001 | ,077 |
| NICHTGEL * ALTER_GR * LRS | Sphärizität angenommen | 74,278 | 8 | 9,285 | 2,009 | ,044 | ,030 |
| | Greenhouse-Geisser | 74,278 | 5,800 | 12,807 | 2,009 | ,066 | ,030 |
| | Huynh-Feldt | 74,278 | 6,180 | 12,019 | 2,009 | ,061 | ,030 |
| | Untergrenze | 74,278 | 2,000 | 37,139 | 2,009 | ,138 | ,030 |
| Fehler(NICHTGEL) | Sphärizität angenommen | 2366,344 | 512 | 4,622 | | | |
| | Greenhouse-Geisser | 2366,344 | 371,174 | 6,375 | | | |
| | Huynh-Feldt | 2366,344 | 395,533 | 5,983 | | | |
| | Untergrenze | 2366,344 | 128,000 | 18,487 | | | |

Tests der Innersubjektkontraste

Maß: MASS_1

| Quelle | NICHTGEL | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|-----|---------------------|--------|-------------|-------------|
| NICHTGEL | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 623,945 | 1 | 623,945 | 34,164 | ,000 | ,211 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 197,844 | 1 | 197,844 | 24,203 | ,000 | ,159 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 300,959 | 1 | 300,959 | 36,496 | ,000 | ,222 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 31,891 | 1 | 31,891 | 3,787 | ,054 | ,029 |
| NICHTGEL * ALTER_GR | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 486,145 | 2 | 243,073 | 13,309 | ,000 | ,172 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 81,517 | 2 | 40,759 | 4,986 | ,008 | ,072 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 79,144 | 2 | 39,572 | 4,799 | ,010 | ,070 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 16,203 | 2 | 8,102 | ,962 | ,385 | ,015 |
| NICHTGEL * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 292,236 | 1 | 292,236 | 16,001 | ,000 | ,111 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 172,295 | 1 | 172,295 | 21,077 | ,000 | ,141 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 67,872 | 1 | 67,872 | 8,230 | ,005 | ,060 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 9,575 | 1 | 9,575 | 1,137 | ,288 | ,009 |
| NICHTGEL * ALTER_GR * LRS | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 74,784 | 2 | 37,392 | 2,047 | ,133 | ,031 |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 47,877 | 2 | 23,939 | 2,928 | ,057 | ,044 |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 2,498 | 2 | 1,249 | ,151 | ,860 | ,002 |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 6,120 | 2 | 3,060 | ,363 | ,696 | ,006 |
| Fehler(NICHTGEL) | Stufe 1 gegen Stufe 5 | 2337,683 | 128 | 18,263 | | | |
| | Stufe 2 gegen Stufe 5 | 1046,335 | 128 | 8,174 | | | |
| | Stufe 3 gegen Stufe 5 | 1055,545 | 128 | 8,246 | | | |
| | Stufe 4 gegen Stufe 5 | 1078,020 | 128 | 8,422 | | | |

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

| | F | df1 | df2 | Signifikanz |
|-------|--------|-----|-----|-------------|
| S_NN | 1,314 | 5 | 128 | ,262 |
| BL_NN | 7,616 | 5 | 128 | ,000 |
| HL_NN | 14,886 | 5 | 128 | ,000 |
| NL_NN | 12,318 | 5 | 128 | ,000 |
| NR_NN | 14,668 | 5 | 128 | ,000 |

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a.

Design: Intercept+ALTER_GR+LRS+ALTER_GR * LRS

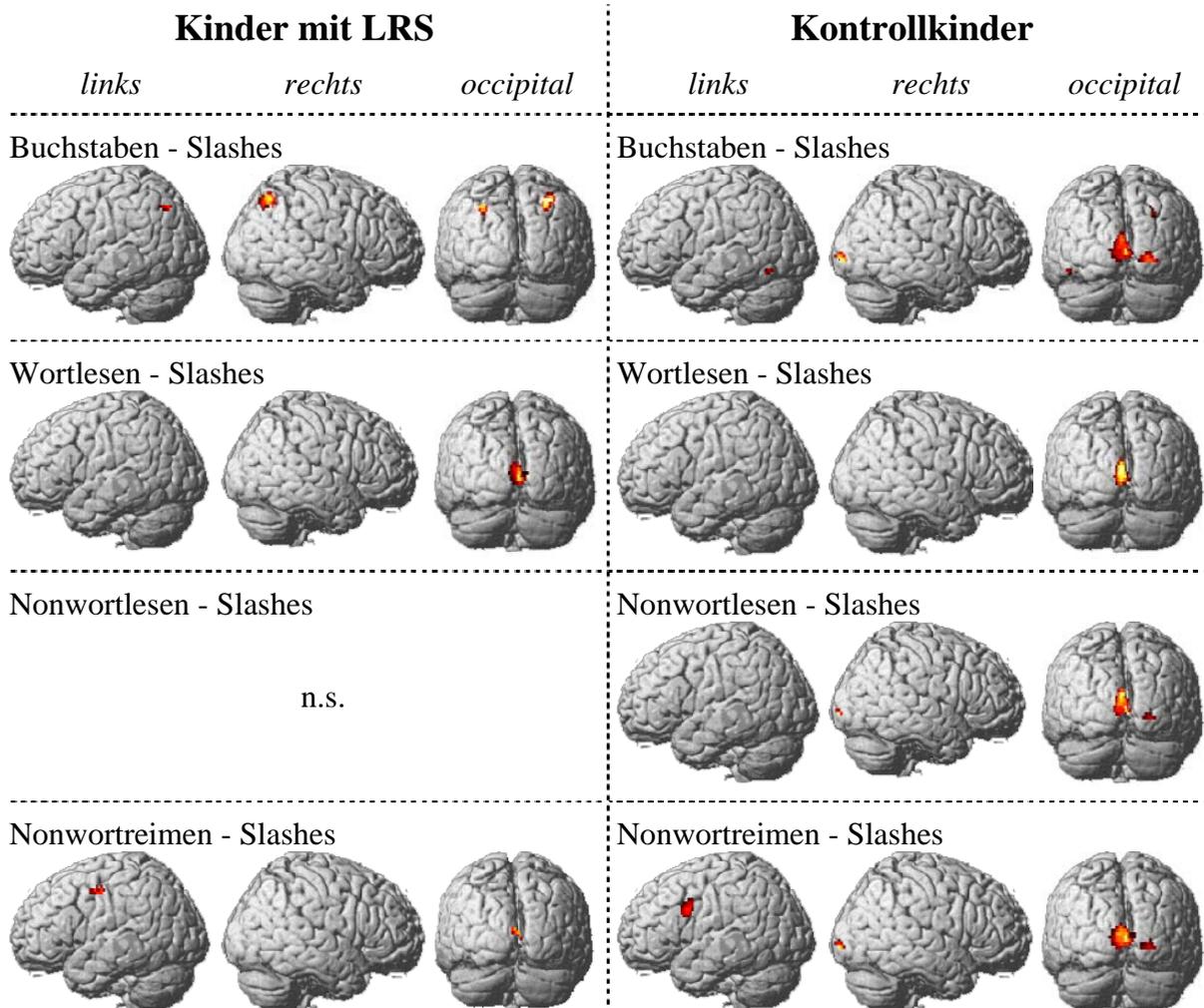
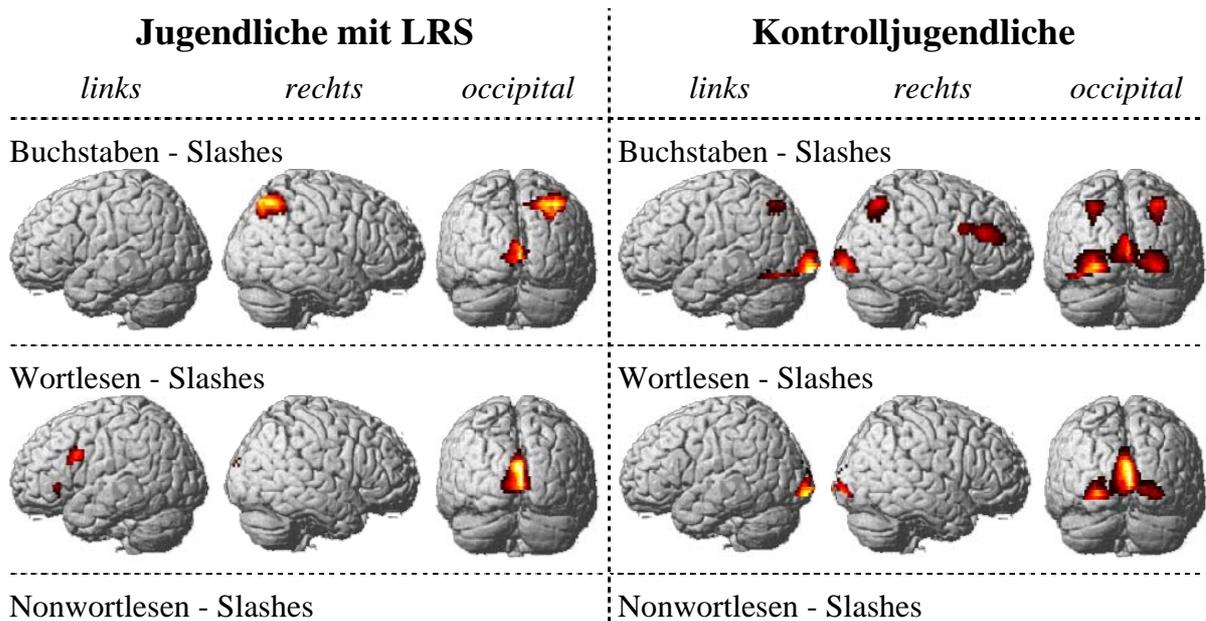
Innersubjekt-Design: NICHTGEL

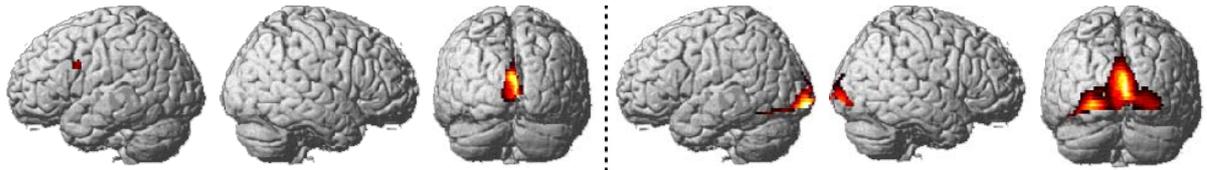
Tests der Zwischensubjekteffekte

Maß: MASS_1

Transformierte Variable: Mittel

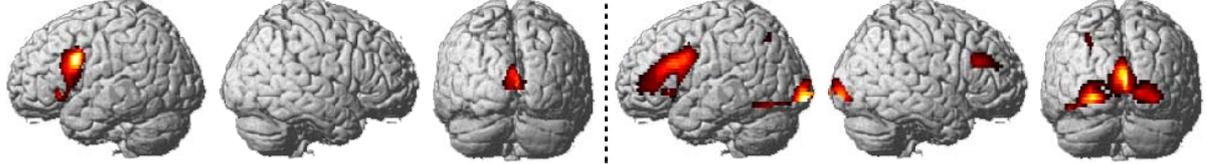
| Quelle | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F | Signifikanz | Eta-Quadrat |
|----------------|--------------------------|-----|---------------------|--------|-------------|-------------|
| Intercept | 482,354 | 1 | 482,354 | 97,325 | ,000 | ,432 |
| ALTER_GR | 182,475 | 2 | 91,238 | 18,409 | ,000 | ,223 |
| LRS | 121,133 | 1 | 121,133 | 24,441 | ,000 | ,160 |
| ALTER_GR * LRS | 43,501 | 2 | 21,751 | 4,389 | ,014 | ,064 |
| Fehler | 634,381 | 128 | 4,956 | | | |

Gruppenanalyse (Kinder)Gruppenanalyse (Jugendliche)



Nonwortreimen - Slashes

Nonwortreimen - Slashes



Gruppenanalyse (Erwachsene)

Erwachsene mit LRS

Kontrollerwachsene

links

rechts

occipital

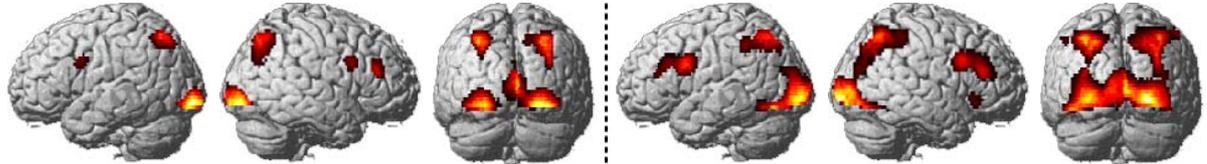
links

rechts

occipital

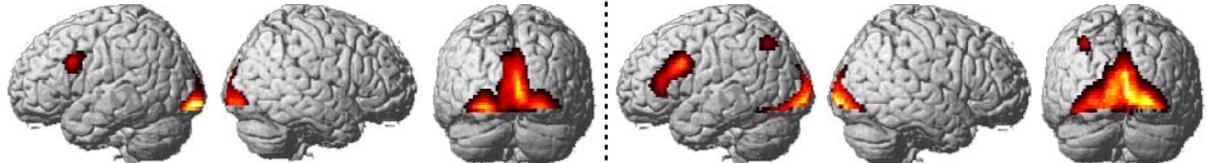
Buchstaben - Slashes

Buchstaben - Slashes



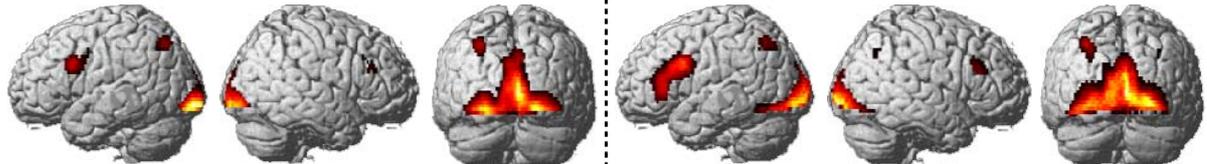
Wortlesen - Slashes

Wortlesen - Slashes



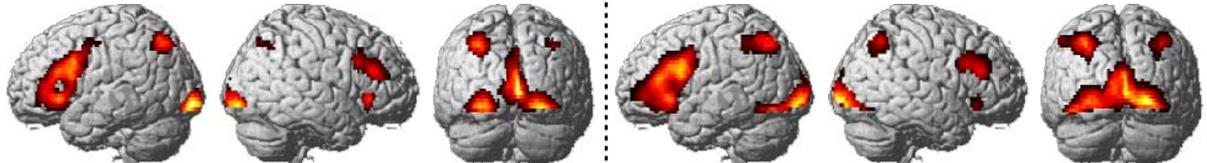
Nonwortlesen - Slashes

Nonwortlesen - Slashes



Nonwortreimen - Slashes

Nonwortreimen - Slashes



Gruppenanalyse (Kinder)

| Kinder mit LRS | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----|-----|----|-------------------|----|--------------------------|----|-----|----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Buchstaben - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 19 | Parietal, Precuneus | -28 | -68 | 42 | 3.05 | 7 | Parietal, SPL | 32 | -64 | 51 | 3.41 |
| Lesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 0 | -70 | 0 | 2.33 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -76 | 6 | 3.03 |
| | | | | | | 18 | Occipital, Cuneus | 2 | -78 | 9 | 2.84 |
| Nonwortlesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Nonwortreimen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -52 | -4 | 48 | 3.03 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 8 | -74 | 6 | 2.82 |
| | | | | | | 17 | Occipital, Cuneus | 2 | -82 | 9 | 2.60 |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 47 | Frontal, IFG | -46 | 32 | 0 | 3.83 | - | - | - | - | - | - |
| 11 | Frontal, MFG | -36 | 38 | -9 | 3.50 | | | | | | |
| 29 | Limbic, Post. Cingulate | -4 | -54 | 12 | 3.80 | | | | | | |
| 31 | Limbic, Cingulate Gyrus | -2 | -44 | 30 | 2.43 | | | | | | |
| 39 | Temporal, Angular G. | -52 | -68 | 30 | 3.58 | | | | | | |
| 39 | Temporal, STG | -58 | -60 | 24 | 2.99 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -58 | -58 | 39 | 2.77 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 39 | Parietal, Angular Gyrus | -52 | -66 | 36 | 3.59 | 39 | Temporal, Angular G. | 54 | -68 | 30 | 3.88 |
| 19 | Parietal, Precuneus | -44 | -72 | 39 | 2.50 | 40 | Parietal, Supramarg. G. | 58 | -60 | 33 | 3.41 |
| 47 | Frontal, MFG | -44 | 36 | -6 | 3.49 | 7 | Occipital, Cuneus | 0 | -72 | 30 | 2.92 |
| 47 | Frontal, IFG | -46 | 30 | 0 | 3.43 | 23 | Limbic, Post. Cingulate | 8 | -54 | 12 | 2.86 |
| 23 | Limbic, Post. Cingulate | -6 | -56 | 18 | 3.48 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 47 | Frontal, IFG | -48 | 22 | -3 | 4.38 | 47 | Frontal, MFG | 50 | 40 | -3 | 3.10 |
| 44 | Frontal, IFG | -60 | 10 | 15 | 4.01 | 10 | Frontal, SFG | 32 | 54 | -3 | 2.98 |
| 47 | Frontal, MFG | -48 | 46 | -9 | 3.49 | 10 | Frontal, IFG | 42 | 44 | 0 | 2.91 |
| 8 | Frontal, MeFG | -6 | 30 | 42 | 3.66 | 39 | Parietal, Angular Gyrus | 52 | -66 | 36 | 2.72 |
| - | Thalamus | -2 | -12 | 15 | 3.54 | 40 | Parietal, IPL | 56 | -58 | 42 | 2.61 |
| 40 | Parietal, IPL | -50 | -60 | 45 | 3.51 | | | | | | |
| 39 | Parietal, Angular Gyrus | -42 | -58 | 36 | 2.90 | | | | | | |
| 10 | Frontal, MFG | -30 | 58 | 3 | 2.97 | | | | | | |
| 9 | Frontal, MFG | -42 | 16 | 33 | 2.94 | | | | | | |

| Kontrollkinder | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|------|----|--------------------------|----|-----|----|------|
| Buchstaben - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Cuneus | -4 | -78 | 6 | 3.97 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 8 | -74 | 6 | 3.25 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -2 | -68 | 0 | 3.30 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 24 | -98 | -3 | 3.88 |
| 37 | Temporal, Fusiform G. | -48 | -64 | -12 | 2.57 | 7 | Parietal, Precuneus | 28 | -66 | 39 | 2.90 |
| Lesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 17 | Occipital, Cuneus | -2 | -80 | 9 | 2.53 | - | - | - | - | - | - |
| Nonwortlesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 17 | Occipital, Cuneus | -2 | -80 | 9 | 2.63 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 26 | -98 | -3 | 2.51 |
| Nonwortreimen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 17 | Occipital, Cuneus | -4 | -82 | 6 | 4.12 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 8 | -74 | 6 | 3.32 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -4 | -70 | 0 | 3.63 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 26 | -98 | -3 | 3.63 |
| 9 | Frontal, IFG | -50 | 10 | 30 | 3.24 | | | | | | |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Nonwortreimen - Buchstab. | | | | | | | | | | | |
| 9 | Frontal, MFG | -50 | 14 | 27 | 4.47 | - | - | - | - | - | - |
| 44 | Frontal, Precentral Gyrus | -58 | 12 | 6 | 4.27 | | | | | | |
| 47 | Frontal, IFG | -54 | 18 | -6 | 3.95 | | | | | | |
| 6 | Frontal, SFG | -4 | 24 | 57 | 3.50 | | | | | | |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -50 | -4 | 51 | 3.26 | | | | | | |

Gruppenanalyse (Jugendliche)

| Jugendliche mit LRS | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-------------------|----|---------------------------|----|-----|----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Buchstaben - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -8 | -78 | 6 | 4.46 | 7 | Parietal, Precuneus | 24 | -72 | 45 | 4.53 |
| | | | | | | 7 | Parietal, SPL | 38 | -64 | 54 | 4.01 |
| | | | | | | 7 | Parietal, SPL | 32 | -54 | 45 | 3.29 |
| | | | | | | 23 | Occipital, Cuneus | 8 | -72 | 9 | 3.70 |
| | | | | | | 17 | Occipital Cuneus | 8 | -80 | 6 | 3.59 |
| Lesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -4 | -74 | 6 | 5.52 | 18 | Occipital, Cuneus | 2 | -88 | 21 | 4.39 |
| 9 | Frontal, IFG | -50 | 8 | 30 | 3.31 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 8 | -66 | 6 | 4.01 |
| 47 | Frontal, IFG | -50 | 30 | 0 | 2.84 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Cuneus | -2 | -74 | 9 | 4.31 | 18 | Occipital, Cuneus | 0 | -88 | 18 | 3.73 |
| 9 | Frontal, IFG | -50 | 8 | 30 | 2.89 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -66 | 6 | 3.63 |
| Nonwortreimen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 9 | Frontal, IFG | -52 | 8 | 30 | 5.13 | 30 | Occipital, Cuneus | 10 | -70 | 9 | 3.70 |
| 44 | Frontal, IFG | -62 | 8 | 15 | 2.97 | | | | | | |
| 47 | Frontal, IFG | -42 | 26 | -3 | 2.70 | | | | | | |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -8 | -78 | 6 | 3.98 | | | | | | |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 8 | Frontal, SFG | -18 | 28 | 45 | 5.09 | 19 | Occipital, Cuneus | 4 | -82 | 30 | 4.72 |
| 47 | Frontal, IFG | -50 | 28 | -9 | 5.03 | - | Caudate | 10 | 4 | 3 | 3.97 |
| 45 | Frontal, IFG | -50 | 22 | 18 | 4.97 | - | Caudate | 12 | 8 | 12 | 3.85 |
| 23 | Limbic, Post. Cingulate | -6 | -54 | 15 | 5.02 | - | Caudate | 16 | 6 | 21 | 3.28 |
| - | Thalamus | -4 | -24 | 15 | 3.99 | 9 | Frontal, SFG | 4 | 58 | 30 | 2.91 |
| 21 | Temporal, MTG | -56 | -4 | -15 | 4.11 | 4 | Frontal, Precentral Gyrus | 52 | -8 | 48 | 3.32 |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -52 | -8 | 48 | 3.48 | 39 | Parietal, Angular Gyrus | 56 | -64 | 30 | 3.04 |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -50 | -10 | 39 | 2.80 | | | | | | |
| 9 | Frontal, SFG | -8 | 56 | 30 | 3.48 | | | | | | |
| 13 | Insula | -36 | -14 | 21 | 2.90 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 11 | Frontal, MFG | -42 | 32 | -9 | 4.57 | 40 | Parietal, Supramarg. G. | 56 | -56 | 33 | 5.15 |
| 45 | Frontal, IFG | -50 | 24 | 18 | 4.30 | 9 | Frontal, SFG | 6 | 58 | 24 | 4.24 |
| 47 | Frontal, IFG | -50 | 28 | -9 | 4.28 | 19 | Occipital, Cuneus | 2 | -84 | 33 | 3.64 |
| 8 | Frontal, SFG | -22 | 30 | 45 | 4.55 | 24 | Limbic, Cingulate Gyrus | 2 | -20 | 36 | 3.38 |
| 9 | Frontal, SFG | -2 | 58 | 27 | 3.98 | 31 | Limbic, Cingulate Gyrus | 14 | -24 | 33 | 2.69 |
| 31 | Occipital, Precuneus | -12 | -58 | 30 | 3.97 | | | | | | |
| 18 | Occipital, Cuneus | -2 | -94 | 21 | 3.44 | | | | | | |
| 22 | Temporal, STG | -66 | -34 | 6 | 3.79 | | | | | | |
| 22 | Temporal, STG | -62 | -38 | 12 | 3.67 | | | | | | |
| 21 | Temporal, STG | -64 | -22 | 0 | 3.09 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -58 | -4 | -15 | 3.65 | | | | | | |
| 38 | Temporal, STG | -46 | 8 | -15 | 2.84 | | | | | | |
| 34 | Limbic, Parahippoc. G. | -18 | -10 | -18 | 3.50 | | | | | | |
| - | Limbic, Parahippoc. G. | -28 | -8 | -9 | 3.28 | | | | | | |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -50 | -10 | 39 | 3.09 | | | | | | |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -50 | -4 | 51 | 2.80 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 45 | Frontal, IFG | -52 | 12 | 21 | 5.92 | 43 | Parietal, Postcentral G. | 50 | -12 | 18 | 4.32 |
| 9 | Frontal, IFG | -54 | 20 | 21 | 5.25 | 43 | Parietal, Postcentral G. | 66 | -10 | 15 | 3.91 |
| 46 | Frontal, MFG | -42 | 30 | 15 | 5.16 | 4 | Frontal, Precentral Gyrus | 58 | -10 | 21 | 3.91 |
| 41 | Temporal, STG | -52 | -34 | 9 | 4.23 | 47 | Frontal, MFG | 50 | 46 | -6 | 3.42 |
| 40 | Parietal, IPL | -62 | -34 | 21 | 3.92 | 47 | Frontal, IFG | 50 | 34 | -9 | 3.41 |
| 41 | Temporal, STG | -42 | -40 | 12 | 3.17 | 10 | Frontal, MFG | 42 | 56 | -3 | 3.25 |

| Kontrolljugendliche | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------------|-----|------|-----|-------------------|----|--------------------------|----|------|-----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Buchstaben - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 17 | Occipital, IOG | -26 | -100 | -9 | 6.71 | 7 | Parietal, SPL | 32 | -64 | 51 | 5.32 |
| 19 | Occipital, Fusiform G. | -42 | -68 | -15 | 4.63 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -78 | 6 | 5.25 |
| 19 | Occipital, Fusiform G. | -34 | -64 | -15 | 4.15 | 18 | Occipital, Cuneus | 2 | -82 | 9 | 4.99 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -10 | -76 | 6 | 4.83 | 18 | Occipital, IOG | 30 | -92 | -9 | 5.01 |
| 7 | Parietal, SPL | -28 | -64 | 48 | 4.44 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 26 | -98 | -3 | 4.99 |
| <hr/> | | | | | | | | | | | |
| Lesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Cuneus | -26 | -104 | -6 | 5.66 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 2 | -82 | 6 | 5.79 |
| 18 | Occipital, Cuneus | -20 | -104 | 6 | 3.56 | 18 | Occipital, Cuneus | 2 | -80 | 18 | 5.48 |
| <hr/> | | | | | | | | | | | |
| Nonwortlesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 17 | Occipital, IOG | -26 | -98 | -9 | 6.15 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 2 | -82 | 6 | 6.54 |
| 30 | Occipital, Parahippoc. | -6 | -38 | 0 | 2.66 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 20 | -100 | -3 | 4.78 |
| <hr/> | | | | | | | | | | | |
| Nonwortreimen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 17 | Occipital, IOG | -24 | -100 | -9 | 6.27 | 17 | Occipital, Cuneus | 2 | -82 | 12 | 5.85 |
| 18 | Occipital, Cuneus | -20 | -104 | 6 | 4.03 | 18 | Occipital, Cuneus | 18 | -104 | 0 | 4.80 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -8 | -76 | 6 | 5.34 | 18 | Occipital, IOG | 30 | -92 | -9 | 4.77 |
| 9 | Frontal, IFG | -46 | 6 | 30 | 4.44 | 46 | Frontal, MFG | 50 | 36 | 27 | 4.02 |
| 46 | Frontal, MFG | -48 | 20 | 24 | 4.17 | 10 | Frontal, MFG | 46 | 46 | 21 | 2.84 |
| 46 | Frontal, MFG | -46 | 30 | 18 | 3.81 | 8 | Frontal, MeFG | 2 | 22 | 45 | 3.48 |
| 19 | Occipital, Fusiform G. | -42 | -66 | -15 | 4.17 | | | | | | |
| 19 | Occipital, Fusiform G. | -32 | -80 | -12 | 2.89 | | | | | | |
| 7 | Parietal, SPL | -28 | -64 | 45 | 3.14 | | | | | | |
| 47 | Frontal, IFG | -52 | 22 | -6 | 2.81 | | | | | | |
| 47 | Frontal, IFG | -32 | 26 | 0 | 2.55 | | | | | | |
| <hr/> | | | | | | | | | | | |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Cuneus | -2 | -78 | 21 | 5.52 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 12 | -66 | -9 | 4.33 |
| 39 | Temporal, MTG | -46 | -66 | 21 | 5.46 | 22 | Temporal, STG | 64 | -54 | 12 | 3.65 |
| 19 | Occipital, SOG | -44 | -78 | 30 | 5.18 | 39 | Parietal, Angular Gyrus | 56 | -64 | 36 | 3.57 |
| 22 | Temporal, STG | -56 | -42 | 9 | 2.97 | 22 | Temporal, STG | 66 | -38 | 15 | 2.83 |
| 8 | Frontal, SFG | -26 | 30 | 48 | 4.79 | - | Temporal, MTG | 56 | -10 | -3 | 3.05 |
| 9 | Frontal, IFG | -14 | 56 | 30 | 3.43 | 21 | Temporal, MTG | 56 | -28 | 0 | 2.62 |
| 6 | Frontal, SFG | -6 | 26 | 57 | 2.75 | | | | | | |
| 47 | Frontal, IFG | -48 | 32 | -6 | 4.59 | | | | | | |
| 47 | Frontal, MFG | -40 | 38 | -9 | 4.19 | | | | | | |
| 3 | Parietal, Postcentral G. | -46 | -16 | 57 | 4.52 | | | | | | |
| 34 | Frontal, Subcallosal G. | -26 | 4 | -9 | 3.86 | | | | | | |
| 28 | Limbic, Parahippoc. G. | -22 | -18 | -15 | 3.30 | | | | | | |
| - | Limbic, Parahippoc. G. | -20 | -6 | -12 | 3.22 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -52 | -22 | -6 | 3.34 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -50 | 0 | -18 | 2.63 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -60 | -12 | -9 | 2.61 | | | | | | |
| <hr/> | | | | | | | | | | | |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Cuneus | -4 | -80 | 21 | 5.65 | 29 | Limbic, Post. Cingulate | 8 | -48 | 15 | 5.20 |
| 29 | Limbic, Post. Cingulate | -8 | -44 | 15 | 5.16 | 21 | Temporal, MTG | 58 | -12 | -9 | 4.19 |
| 8 | Frontal, SFG | -22 | 28 | 45 | 4.85 | 21 | Temporal, MTG | 58 | 4 | -15 | 3.87 |
| 8 | Frontal, MFG | -36 | 22 | 45 | 3.26 | 22 | Temporal, STG | 62 | 4 | -3 | 3.67 |
| 8 | Frontal, SFG | -18 | 42 | 45 | 3.25 | 8 | Frontal, SFG | 28 | 32 | 48 | 4.12 |
| 39 | Temporal, MTG | -46 | -68 | 21 | 4.49 | 8 | Frontal, SFG | 20 | 38 | 48 | 4.12 |
| 39 | Temporal, MTG | -46 | -76 | 30 | 4.43 | - | Limbic, Parahippoc. G. | 22 | -10 | -12 | 3.98 |
| 22 | Temporal, MTG | -38 | -54 | 18 | 3.95 | 36 | Limbic, Parahippoc. G. | 36 | -32 | -9 | 3.42 |
| 34 | Limbic, Parahippoc. G. | -26 | 2 | -12 | 4.49 | - | Limbic, Parahippoc. G. | 30 | -20 | -12 | 3.22 |
| 35 | Limbic, Parahippoc. G. | -22 | -22 | -15 | 4.42 | 39 | Parietal, Angular Gyrus | 52 | -64 | 30 | 3.62 |
| - | Limbic, Parahippoc. G. | -18 | -8 | -12 | 4.17 | 13 | Insula | 48 | -30 | 21 | 3.36 |
| 47 | Frontal, MFG | -42 | 32 | 0 | 4.41 | 13 | Insula | 40 | -18 | 18 | 3.13 |
| 38 | Temporal, STG | -48 | 16 | -12 | 3.71 | 13 | Insula | 38 | -32 | 18 | 3.05 |
| 45 | Frontal, IFG | -52 | 22 | 18 | 3.71 | | | | | | |
| 22 | Temporal, STG | -52 | -40 | 6 | 3.87 | | | | | | |
| <hr/> | | | | | | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstab. | | | | | | | | | | | |
| 9 | Frontal, IFG | -50 | 12 | 24 | 6.37 | 47 | Frontal, MFG | 40 | 38 | -9 | 3.66 |
| 9 | Frontal, IFG | -46 | 32 | 3 | 6.32 | 47 | Frontal, IFG | 44 | 30 | -6 | 2.86 |
| 46 | Frontal, MFG | -46 | 22 | 21 | 5.93 | 17 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -90 | -3 | 3.63 |
| 18 | Occipital, Cuneus | -10 | -106 | 9 | 2.94 | 17 | Occipital, Cuneus | 16 | -80 | 9 | 2.95 |
| 22 | Temporal, STG | -56 | -40 | 9 | 3.36 | 13 | Insula | 40 | -20 | 18 | 2.92 |
| 40 | Parietal, Supramarg. G. | -60 | -42 | 36 | 3.12 | 13 | Insula | 50 | -34 | 21 | 2.69 |
| <hr/> | | | | | | | | | | | |
| 8 | Frontal, SFG | -4 | 26 | 48 | 3.08 | 43 | Parietal, Postcentral G. | 54 | -18 | 18 | 2.78 |
| 6 | Frontal, MFG | -4 | 4 | 60 | 2.93 | | | | | | |
| 6 | Frontal, SFG | -4 | 14 | 51 | 2.62 | | | | | | |

Gruppenanalyse (Erwachsene)

| Erwachsene mit LRS | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----|------|-----|-------------------|----|---------------------------|----|------|-----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Buchstaben - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -24 | -102 | -6 | 5.65 | 17 | Occipital, Lingual Gyrus | 22 | -100 | -9 | 5.81 |
| 18 | Occipital, IOG | -30 | -96 | -9 | 5.57 | 18 | Occipital, IOG | 32 | -90 | -9 | 5.65 |
| 18 | Occipital, Cuneus | -12 | -104 | -3 | 2.58 | 17 | Occipital, Cuneus | 10 | -102 | -3 | 3.93 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -8 | -78 | 6 | 4.29 | 19 | Parietal, Precuneus | 30 | -68 | 42 | 4.92 |
| 7 | Parietal, SPL | -30 | -66 | 51 | 4.34 | 7 | Parietal, Precuneus | 16 | -74 | 54 | 2.72 |
| 9 | Frontal, IFG | -44 | 4 | 30 | 3.65 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 12 | -72 | 6 | 4.42 |
| | | | | | | 17 | Occipital, Cuneus | 6 | -80 | 9 | 4.26 |
| | | | | | | 46 | Frontal, MFG | 50 | 36 | 27 | 3.66 |
| | | | | | | 9 | Frontal, IFG | 46 | 8 | 27 | 3.28 |
| Lesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Fusiform | -30 | -94 | -12 | 6.73 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 22 | -100 | -6 | 5.60 |
| 17 | Occipital, Lingual Gyrus | -22 | -100 | -9 | 6.68 | | | | | | |
| 9 | Frontal, MFG | -44 | 12 | 27 | 3.83 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Fusiform G. | -28 | -96 | -12 | 6.44 | 17 | Occipital, Lingual Gyrus | 22 | -100 | -9 | 6.73 |
| 9 | Frontal, MFG | -46 | 14 | 27 | 3.98 | 17 | Occipital, Cuneus | 4 | -80 | 6 | 5.37 |
| 7 | Parietal, SPL | -28 | -68 | 45 | 3.45 | 8 | Frontal, MeFG | 6 | 22 | 45 | 3.04 |
| | | | | | | 8 | Frontal, MeFG | 4 | 30 | 42 | 2.89 |
| | | | | | | 46 | Frontal, MFG | 54 | 30 | 27 | 2.73 |
| | | | | | | 45 | Frontal, IFG | 48 | 26 | 21 | 2.49 |
| | | | | | | 9 | Frontal, MFG | 54 | 24 | 33 | 2.67 |
| Nonwortreimen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, IOG | -30 | -94 | -9 | 5.96 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 12 | -72 | 6 | 5.80 |
| 9 | Frontal, IFG | -46 | 12 | 24 | 5.07 | 17 | Occipital, IOG | 28 | -92 | -9 | 5.74 |
| 45 | Frontal, IFG | -46 | 24 | 21 | 4.44 | 17 | Occipital, Cuneus | 8 | -80 | 6 | 5.57 |
| 47 | Frontal, IFG | -48 | 26 | -6 | 3.83 | 46 | Frontal, MFG | 50 | 36 | 24 | 4.20 |
| 7 | Parietal, SPL | -30 | -66 | 48 | 4.54 | 8 | Frontal, MeFG | 50 | 16 | 30 | 3.35 |
| 6 | Frontal, Superior Frontal | -4 | 6 | 63 | 3.29 | 47 | Frontal, IFG | 6 | 24 | 45 | 4.16 |
| | | | | | | 7 | Parietal, SPL | 46 | 26 | -6 | 3.64 |
| | | | | | | 7 | Parietal, IPL | 38 | -60 | 42 | 2.64 |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -58 | -48 | 9 | 4.76 | 18 | Occipital, Cuneus | 2 | -92 | 0 | 4.30 |
| 22 | Temporal, MTG | -52 | -32 | 3 | 3.47 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -66 | -6 | 4.29 |
| 22 | Temporal, MTG | -64 | -36 | 6 | 2.90 | 39 | Temporal, STG | 60 | -60 | 21 | 4.33 |
| 18 | Occipital, Cuneus | -6 | -98 | 18 | 4.51 | 40 | Parietal, Supramargin. G. | 60 | -58 | 30 | 4.26 |
| 9 | Frontal, MFG | -48 | 16 | 27 | 4.17 | 39 | Parietal, IPL | 54 | -62 | 39 | 4.14 |
| 8 | Frontal, SFG | -4 | 40 | 54 | 4.03 | | | | | | |
| 6 | Frontal, SFG | -16 | 30 | 57 | 4.02 | | | | | | |
| 39 | Parietal, Angular Gyrus | -48 | -72 | 39 | 3.71 | | | | | | |
| 39 | Temporal, MTG | -54 | -66 | 24 | 3.39 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -52 | -58 | 42 | 3.28 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -62 | -2 | -12 | 3.65 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -52 | -6 | -18 | 3.21 | | | | | | |
| 21 | Temporal, Sub-Gyral | -44 | -14 | -12 | 2.47 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 9 | Frontal, MFG | -54 | 14 | 33 | 4.39 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -74 | -9 | 4.25 |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -52 | -8 | 45 | 4.03 | 39 | Parietal, Angular Gyrus | 54 | -64 | 39 | 4.16 |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -44 | -8 | 57 | 3.25 | 39 | Temporal, STG | 60 | -60 | 27 | 3.98 |
| 7 | Parietal, Precuneus | -8 | -52 | 39 | 4.34 | 22 | Temporal, STG | 64 | -52 | 21 | 3.00 |
| 21 | Temporal, MTG | -62 | -2 | -9 | 4.33 | 6 | Frontal, SFG | 6 | 26 | 60 | 3.68 |
| 39 | Parietal, IPL | -46 | -68 | 39 | 3.97 | 21 | Temporal, MTG | 56 | -10 | -12 | 3.70 |
| 40 | Parietal, IPL | -54 | -60 | 42 | 3.16 | 21 | Temporal, MTG | 66 | -16 | -9 | 3.65 |
| 39 | Temporal, MTG | -56 | -66 | 21 | 2.64 | 22 | Temporal, STG | 68 | -36 | 9 | 3.48 |
| 8 | Frontal, SFG | -10 | 40 | 54 | 3.73 | 11 | Frontal, MFG | 32 | 34 | -12 | 3.13 |
| 6 | Frontal, SFG | -12 | 32 | 57 | 3.64 | 47 | Frontal, IFG | 36 | 22 | -12 | 2.57 |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -60 | -6 | 21 | 3.13 | 13 | Frontal, IFG | 30 | 14 | -12 | 2.53 |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -62 | 2 | 18 | 2.78 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 44 | Frontal, IFG | -52 | 16 | 18 | 5.94 | 8 | Frontal, SFG | 16 | 38 | 51 | 4.26 |
| 47 | Frontal, IFG | -48 | 28 | -6 | 5.64 | 6 | Frontal, SFG | 8 | 26 | 60 | 4.24 |
| 46 | Frontal, MFG | -52 | 28 | 18 | 5.02 | 47 | Frontal, IFG | 50 | 26 | -12 | 4.71 |
| 6 | Frontal, SFG | -4 | 4 | 63 | 4.98 | 45 | Frontal, IFG | 50 | 24 | 6 | 4.54 |
| 40 | Parietal, IPL | -48 | -58 | 45 | 4.45 | 38 | Temporal, STG | 54 | 18 | -12 | 3.89 |
| 7 | Parietal, IPL | -40 | -66 | 45 | 4.33 | 39 | Parietal, Angular Gyrus | 56 | -62 | 36 | 4.41 |
| 40 | Parietal, IPL | -56 | -50 | 42 | 2.94 | 7 | Parietal, IPL | 46 | -66 | 45 | 4.33 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -2 | -76 | 3 | 4.23 | 40 | Parietal, Supramarg. G. | 62 | -52 | 27 | 3.04 |
| | | | | | | 21 | Temporal, MTG | 68 | -18 | -9 | 4.26 |
| | | | | | | 21 | Temporal, MTG | 56 | -20 | -9 | 3.82 |
| | | | | | | 21 | Temporal, MTG | 56 | -12 | -12 | 3.64 |
| | | | | | | 18 | Occipital, Cuneus | 0 | -96 | 6 | 3.62 |
| | | | | | | 17 | Occipital, Lingual Gyrus | 2 | -88 | 3 | 3.30 |

| Kontrollerwachsene | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------|-----|------|-----|-------------------|----|---------------------------|----|------|-----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Buchstaben - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, IOG | -30 | -94 | -6 | 7.11 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 24 | -98 | -3 | 7.50 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -10 | -80 | 3 | 6.86 | 8 | Frontal, MeFG | 6 | 18 | 45 | 5.10 |
| 7 | Parietal, SPL | -30 | -58 | 45 | 6.18 | 47 | Frontal, IFG | 36 | 24 | -6 | 4.50 |
| 7 | Parietal, Precuneus | -22 | -70 | 48 | 6.09 | 9 | Frontal, MFG | 50 | 12 | 30 | 4.49 |
| 40 | Parietal, IPL | -44 | -44 | 45 | 3.98 | 46 | Frontal, MFG | 52 | 34 | 24 | 4.40 |
| 9 | Frontal, IFG | -46 | 8 | 27 | 5.50 | | | | | | |
| 9 | Frontal, MFG | -50 | 28 | 30 | 4.04 | | | | | | |
| 9 | Frontal, MFG | -50 | 36 | 18 | 3.07 | | | | | | |
| Lesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -12 | -84 | -3 | 7.30 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 24 | -100 | -3 | 7.02 |
| 9 | Frontal, IFG | -44 | 12 | 24 | 5.48 | 17 | Occipital, IOG | 24 | -92 | -9 | 6.95 |
| 46 | Frontal, IFG | -52 | 34 | 9 | 4.16 | | | | | | |
| 46 | Frontal, IFG | -50 | 22 | 21 | 4.10 | | | | | | |
| 7 | Parietal, SPL | -32 | -60 | 45 | 3.83 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| - | Occipital, Lingual Gyrus | -8 | -70 | 0 | 7.62 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 24 | -98 | -3 | 7.38 |
| 9 | Frontal, IFG | -46 | 10 | 27 | 5.84 | 17 | Occipital, Inferior Occi. | 28 | -92 | -9 | 7.37 |
| - | Frontal, MFG | -50 | 34 | 15 | 4.17 | 46 | Frontal, MFG | 54 | 28 | 27 | 3.86 |
| 9 | Frontal, MFG | -54 | 22 | 27 | 3.96 | 19 | Parietal, Precuneus | 32 | -64 | 39 | 2.91 |
| 7 | Parietal, SPL | -30 | -60 | 48 | 4.13 | | | | | | |
| 7 | Parietal, SPL | -26 | -66 | 42 | 3.88 | | | | | | |
| 8 | Frontal, Superior Frontal | -2 | 18 | 48 | 3.15 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Slashes | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, IOG | -30 | -94 | -6 | 7.04 | 17 | Occipital, IOG | 24 | -94 | -6 | 7.45 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -8 | -78 | 6 | 6.71 | 46 | Frontal, MFG | 52 | 32 | 27 | 4.87 |
| 44 | Frontal, IFG | -48 | 12 | 21 | 6.70 | 9 | Frontal, MFG | 46 | 14 | 30 | 3.87 |
| 46 | Frontal, MFG | -50 | 22 | 27 | 5.60 | 7 | Parietal, SPL | 40 | -62 | 54 | 4.84 |
| 46 | Frontal, MFG | -48 | 34 | 15 | 5.54 | 47 | Frontal, IFG | 36 | 26 | -6 | 4.04 |
| 19 | Parietal, Precuneus | -28 | -66 | 42 | 6.11 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -54 | -46 | 51 | 3.26 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -44 | -44 | 42 | 3.01 | | | | | | |
| 8 | Frontal, Superior Frontal | -2 | 20 | 51 | 5.46 | | | | | | |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 3 | Parietal, Postcentral | -38 | -24 | 51 | 5.61 | 18 | Occipital, Cuneus | 2 | -90 | 18 | 5.60 |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -36 | -24 | 63 | 4.70 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 8 | -66 | -9 | 4.87 |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -28 | -14 | 63 | 3.10 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -82 | -12 | 4.63 |
| 10 | Frontal, SFG | -30 | 54 | -3 | 4.83 | 22 | Temporal, STG | 64 | -50 | 15 | 5.25 |
| 45 | Frontal, IFG | -48 | 24 | 15 | 4.46 | 22 | Temporal, STG | 62 | -42 | 15 | 5.24 |
| 8 | Frontal, MFG | -50 | 16 | 39 | 3.43 | 42 | Temporal, STG | 66 | -26 | 15 | 4.28 |
| 41 | Temporal, Trans. TG | -54 | -22 | 12 | 4.25 | 21 | Temporal, MTG | 58 | 2 | -15 | 3.56 |
| 22 | Temporal, MTG | -60 | -50 | 9 | 4.17 | 21 | Temporal, MTG | 58 | -20 | -6 | 2.78 |
| 22 | Temporal, STG | -52 | -30 | 3 | 3.47 | | | | | | |
| 8 | Frontal, SFG | -20 | 38 | 48 | 3.67 | | | | | | |
| 8 | Frontal, MFG | -24 | 24 | 45 | 3.28 | | | | | | |
| 6 | Frontal, SFG | -12 | 24 | 57 | 3.02 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -56 | -4 | -18 | 3.60 | | | | | | |
| 21 | Temporal, ITG | -64 | -8 | -18 | 3.42 | | | | | | |
| 38 | Temporal, STG | -54 | 6 | -9 | 2.74 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 18 | Occipital, Cuneus | -6 | -94 | 21 | 5.48 | 19 | Occipital, Cuneus | 2 | -80 | 30 | 5.80 |
| 18 | Occipital, MOG | -10 | -100 | 15 | 5.48 | 39 | Parietal, IPL | 52 | -64 | 39 | 4.64 |
| 21 | Temporal, MTG | -64 | -20 | -6 | 4.94 | 22 | Temporal, STG | 64 | -48 | 18 | 4.43 |
| 39 | Temporal, MTG | -52 | -66 | 27 | 4.70 | 39 | Temporal, STG | 46 | -58 | 21 | 2.81 |
| 13 | Frontal, IFG | -44 | 26 | 9 | 4.61 | 21 | Temporal, MTG | 58 | 4 | -15 | 3.89 |
| 11 | Frontal, MFG | -34 | 36 | -15 | 4.21 | 21 | Temporal, MTG | 54 | -14 | -15 | 3.21 |
| 45 | Frontal, IFG | -56 | 20 | 15 | 4.07 | 21 | Temporal, MTG | 56 | -20 | -9 | 3.17 |
| 6 | Frontal, SFG | -20 | 38 | 42 | 4.01 | 6 | Frontal, SFG | 16 | 30 | 54 | 3.73 |
| 6 | Frontal, SFG | -18 | 22 | 51 | 3.47 | 10 | Frontal, SFG | 22 | 50 | 15 | 3.37 |
| 6 | Frontal, SFG | -20 | 32 | 54 | 3.31 | 41 | Temporal, Trans. TG | 34 | -36 | 9 | 3.24 |
| 47 | Frontal, IFG | -30 | 8 | -15 | 3.37 | | | | | | |
| 3 | Parietal, Postcentral G. | -38 | -24 | 63 | 3.34 | | | | | | |
| 4 | Frontal, Precentral G. | -36 | -26 | 63 | 3.10 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstab. | | | | | | | | | | | |
| 46 | Frontal, IFG | -46 | 38 | 6 | 7.06 | 31 | Occipital, Precuneus | 6 | -72 | 27 | 4.75 |
| 44 | Frontal, IFG | -48 | 10 | 18 | 6.89 | 18 | Occipital, Cuneus | 8 | -84 | 21 | 4.34 |
| 11 | Frontal, MFG | -38 | 36 | -12 | 6.39 | 39 | Parietal, IPL | 52 | -62 | 42 | 4.18 |
| 7 | Parietal, SPL | -40 | -70 | 45 | 5.57 | 40 | Parietal, Supramarg. G. | 60 | -56 | 33 | 3.52 |
| 40 | Parietal, IPL | -54 | -50 | 48 | 5.30 | 22 | Temporal, STG | 64 | -50 | 15 | 3.09 |
| 40 | Parietal, IPL | -58 | -42 | 21 | 4.77 | 41 | Temporal, STG | 48 | -28 | 6 | 3.86 |
| 8 | Frontal, MeFG | -6 | 24 | 45 | 4.91 | 21 | Temporal, MTG | 68 | -28 | 3 | 3.03 |
| 8 | Frontal, SFG | -4 | 34 | 51 | 4.21 | 21 | Temporal, MTG | 68 | -18 | -9 | 2.85 |
| 6 | Frontal, SFG | -6 | 8 | 60 | 4.09 | 10 | Frontal, MFG | 42 | 60 | 3 | 3.73 |
| 18 | Occipital, Cuneus | -4 | -96 | 18 | 4.23 | 47 | Frontal, MFG | 50 | 42 | -6 | 3.37 |
| | | | | | | 47 | Frontal, IFG | 40 | 24 | -18 | 3.12 |
| | | | | | | 17 | Occipital, Lingual Gyrus | 6 | -90 | 0 | 3.23 |
| | | | | | | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 10 | -68 | -9 | 3.19 |
| | | | | | | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 12 | -82 | -12 | 2.74 |

Gruppenunterschiede (Kinder)

| Kinder mit LRS > Kontrollkinder | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------|-----|-----|----|-------------------|----|--------------------------|----|-----|----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 11 | Frontal, MFG | -34 | 38 | -9 | 2.71 | 47 | Frontal, IFG | 48 | 28 | -6 | 2.45 |
| 46 | Frontal, IFG | -42 | 32 | 6 | 2.45 | 47 | Frontal, IFG | 54 | 38 | -3 | 1.94 |
| 11 | Frontal, MFG | -42 | 44 | -9 | 2.43 | 29 | Limbic, Posterior Cin- | 2 | -56 | 9 | 2.56 |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -54 | -8 | 39 | 1.89 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 2 | -64 | 0 | 2.34 |
| 9 | Frontal, SFG | -18 | 48 | 33 | 1.86 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 0 | -74 | -6 | 2.28 |
| | | | | | | 30 | Limbic, Posterior Cin- | 18 | -52 | 9 | 2.11 |
| Nonwortlesen- Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 39 | Parietal, Angular Gyrus | -52 | -66 | 36 | 2.31 | 47 | Frontal, IFG | 46 | 28 | -6 | 2.39 |
| 40 | Parietal, IPL | -56 | -56 | 39 | 1.95 | 47 | Frontal, IFG | 54 | 38 | -3 | 2.08 |
| 11 | Frontal, MFG | -36 | 40 | -9 | 2.28 | 31 | Frontal, Paracentral | 2 | -32 | 45 | 1.99 |
| 47 | Frontal, MFG | -48 | 46 | -6 | 1.97 | 31 | Frontal, Paracentral | 4 | -20 | 42 | 1.91 |
| 30 | Limbic, Posterior Cin- | -2 | -58 | 9 | 1.90 | | | | | | |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 0 | -62 | 0 | 1.95 | | | | | | |
| Nonwortreimen- Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 10 | Frontal, MFG | -30 | 56 | 3 | 2.72 | 46 | Frontal, MFG | 44 | 50 | 15 | 2.70 |
| 46 | Frontal, MFG | -40 | 48 | 18 | 2.14 | 10 | Frontal, MFG | 34 | 54 | 0 | 2.63 |
| 30 | Limbic, Parahippocam- | -18 | -38 | -3 | 2.51 | 10 | Frontal, IFG | 40 | 46 | 0 | 2.63 |
| 39 | Parietal, IPL | -52 | -60 | 42 | 2.35 | - | Sub-lobar, Thalamus | 20 | -26 | 6 | 2.35 |
| 40 | Parietal, IPL | -44 | -58 | 39 | 2.22 | 9 | Frontal, MFG | 40 | 34 | 36 | 2.05 |
| | | | | | | 47 | Frontal, IFG | 52 | 26 | -3 | 1.99 |
| | | | | | | 8 | Frontal, SFG | 22 | 42 | 45 | 1.88 |

| Kontrollkinder > Kinder mit LRS | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|-----|-----|----|-------------------|----|---------------|---|----|----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Nonwortreimen- Buchstab. | | | | | | | | | | | |
| 2 | Parietal, Postcentral | -38 | -34 | 60 | 3.04 | 6 | Frontal, MeFG | 4 | -8 | 48 | 1.88 |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -26 | -26 | 57 | 2.06 | | | | | | |
| 46 | Frontal, MFG | -40 | 26 | 18 | 2.23 | | | | | | |
| 46 | Frontal, MFG | -50 | 32 | 12 | 2.14 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -64 | -34 | 30 | 2.05 | | | | | | |
| 40 | Parietal, Supramarginal | -54 | -38 | 33 | 1.85 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -60 | -58 | 9 | 2.02 | | | | | | |
| 22 | Temporal, STG | -54 | -50 | 9 | 1.86 | | | | | | |

Gruppenunterschiede (Jugendliche)

| Jugendliche mit LRS > Kontrolljugendliche | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|-----|-----|-----|-------------------|----|---------------------------|----|-----|-----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 42 | Temporal, STG | -64 | -32 | 18 | 3.03 | 47 | Frontal, IFG | 30 | 10 | -15 | 2.91 |
| 13 | Temporal, STG | -36 | -48 | 18 | 2.86 | 47 | Frontal, IFG | 42 | 30 | -15 | 2.91 |
| 41 | Temporal, Trans. TG | -34 | -36 | 12 | 2.62 | 38 | Temporal, STG | 38 | 2 | -15 | 2.23 |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 6 | Frontal, MeFG | -2 | 34 | 36 | 2.53 | 6 | Frontal, MeFG | 8 | 32 | 36 | 3.17 |
| 9 | Frontal, MFG | -38 | 28 | 36 | 2.76 | 9 | Frontal, MFG | 30 | 22 | 27 | 2.76 |
| 7 | Parietal, Precuneus | -14 | -62 | 36 | 2.76 | 6 | Frontal, SFG | 0 | 8 | 60 | 2.54 |
| 46 | Frontal, MFG | -52 | 28 | 27 | 2.53 | 6 | Frontal, Precentral Gyrus | 46 | -16 | 30 | 2.49 |
| 46 | Frontal, MFG | -46 | 18 | 24 | 2.14 | 2 | Parietal, Postcentral | 38 | -22 | 30 | 2.35 |
| 9 | Frontal, MFG | -44 | 24 | 30 | 1.99 | 4 | Frontal, Precentral Gyrus | 56 | -10 | 30 | 2.07 |
| | | | | | | 6 | Frontal, Precentral Gyrus | 30 | 0 | 27 | 1.91 |
| | | | | | | 40 | Parietal, Supramarginal | 56 | -56 | 33 | 1.97 |
| Nonwortreimen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -62 | 4 | 21 | 3.15 | 9 | Frontal, MFG | 32 | 18 | 30 | 3.21 |
| 9 | Frontal, IFG | -58 | 16 | 27 | 2.96 | 9 | Frontal, SFG | 30 | 46 | 30 | 3.02 |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -64 | -4 | 24 | 2.18 | 4 | Frontal, Precentral Gy- | 58 | -10 | 21 | 2.79 |
| 40 | Parietal, Sub-Gyral | -34 | -44 | 33 | 2.79 | 6 | Frontal, Precentral Gyrus | 54 | -2 | 18 | 2.46 |
| 47 | Frontal, IFG | -38 | 22 | -9 | 2.43 | 45 | Frontal, IFG | 54 | 22 | 12 | 2.41 |
| 47 | Frontal, IFG | -42 | 30 | -12 | 2.33 | 6 | Frontal, Precentral Gyrus | 46 | -16 | 30 | 2.12 |
| 42 | Temporal, STG | -60 | -30 | 18 | 2.35 | 47 | Frontal, IFG | 34 | 20 | -15 | 2.05 |
| 9 | Frontal, MFG | -50 | 28 | 30 | 2.19 | | | | | | |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -44 | -10 | 27 | 2.05 | | | | | | |

| Kontrolljugendliche > Jugendliche mit LRS | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|-----|-----|-----|-------------------|----|---------------------------|----|-----|-----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 3 | Parietal, Postcentral | -42 | -18 | 54 | 2.58 | 44 | Frontal, Precentral Gyrus | 60 | 4 | 6 | 2.59 |
| 5 | Frontal, Paracentral | -2 | -30 | 48 | 2.14 | | | | | | |
| 6 | Frontal, MeFG | 0 | -10 | 51 | 2.02 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 30 | Parahippocampal Gyrus | -8 | -46 | -3 | 3.08 | 29 | Limbic, Posterior Cin- | 6 | -46 | 9 | 3.51 |
| 3 | Parietal, Postcentral | -44 | -22 | 60 | 3.31 | 19 | Occipital, Lingual Gyrus | 6 | -62 | -3 | 3.19 |
| 1 | Parietal, Postcentral | -52 | -20 | 54 | 2.44 | - | Limbic, Parahippocam- | 28 | -22 | -12 | 2.51 |
| 1 | Parietal, Postcentral | -64 | -18 | 27 | 3.08 | 35 | Limbic, Parahippocam- | 20 | -28 | -15 | 2.21 |
| 43 | Parietal, Postcentral | -52 | -18 | 18 | 2.25 | 36 | Limbic, Parahippocam- | 34 | -32 | -12 | 2.10 |
| 13 | Frontal, Precentral Gyrus | -48 | -12 | 12 | 2.01 | | | | | | |
| 28 | Limbic, Parahippocam- | -24 | -20 | -12 | 2.58 | | | | | | |
| - | Temporal, Sub-Gyral | -30 | -32 | -6 | 1.86 | | | | | | |
| 39 | Temporal, MTG | -42 | -66 | 15 | 2.26 | | | | | | |
| 19 | Parietal, Precuneus | -34 | -76 | 39 | 2.18 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstab. | | | | | | | | | | | |
| 17 | Occipital, Lingual Gyrus | -12 | -84 | 0 | 1.99 | 18 | Occipital, Cuneus | 14 | -96 | 21 | 3.56 |
| 3 | Parietal, Postcentral | -42 | -20 | 57 | 3.25 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 16 | -92 | 0 | 3.18 |
| 30 | Parahippocampal Gyrus | -8 | -44 | -3 | 2.56 | 30 | Parahippocampal Gyrus | 12 | -38 | 3 | 2.99 |
| 10 | Frontal, MFG | -44 | 42 | 12 | 2.88 | 19 | Occipital, Lingual Gyrus | 8 | -58 | -3 | 2.42 |
| 47 | Frontal, MFG | -44 | 36 | 0 | 2.74 | 47 | Frontal, IFG | 42 | 34 | 0 | 2.64 |
| 10 | Frontal, IFG | -36 | 44 | 0 | 1.98 | 9 | Frontal, MeFG | 18 | 42 | 15 | 2.42 |
| 24 | Limbic, Anterior Cingu- | -2 | 18 | 21 | 2.85 | 32 | Limbic, Anterior Cingu- | 16 | 30 | 18 | 1.78 |
| 21 | Temporal, MTG | -52 | -44 | 9 | 2.63 | | | | | | |
| 8 | Frontal, MFG | -30 | 16 | 42 | 2.57 | | | | | | |
| 44 | Frontal, Precentral Gyrus | -46 | 10 | 12 | 2.29 | | | | | | |
| 21 | Temporal, MTG | -58 | -58 | 3 | 2.16 | | | | | | |
| 19 | Occipital, MTG | -56 | -68 | 15 | 2.13 | | | | | | |

Gruppenunterschiede (Erwachsene)

| Erwachsene mit LRS > Kontrollerwachsene | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|-----|-----|-----|-------------------|----|---------------------------|----|-----|-----|------|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 6 | Frontal, MFG | -54 | 4 | 42 | 3.35 | 47 | Frontal, IFG | 36 | 28 | -15 | 3.31 |
| 41 | Temporal, STG | -44 | -28 | 3 | 2.78 | 47 | Frontal, MFG | 40 | 40 | -9 | 2.43 |
| 22 | Temporal, MTG | -52 | -42 | 3 | 2.56 | 8 | Frontal, MeFG | 16 | 32 | 36 | 3.30 |
| 47 | Frontal, IFG | -44 | 20 | -9 | 2.75 | 9 | Frontal, MeFG | 18 | 26 | 30 | 2.80 |
| 21 | Temporal, MTG | -46 | -2 | -12 | 2.72 | 8 | Frontal, SFG | 2 | 36 | 45 | 2.40 |
| 47 | Frontal, IFG | -36 | 22 | -12 | 2.57 | 31 | Frontal, Paracentral | 4 | -14 | 45 | 2.56 |
| 17 | Occipital, Lingual Gyrus | -14 | -86 | 3 | 2.74 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 22 | -72 | 0 | 2.13 |
| 19 | Occipital, Lingual Gyrus | -16 | -64 | 3 | 2.48 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 16 | -78 | -3 | 2.11 |
| 7 | Parietal, Precuneus | -10 | -52 | 45 | 2.42 | | | | | | |
| 5 | Frontal, Paracentral | -8 | -40 | 51 | 2.18 | | | | | | |
| Nonwortlesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -46 | -2 | 42 | 3.64 | 47 | Frontal, IFG | 36 | 26 | -12 | 4.18 |
| 8 | Frontal, MFG | -40 | 32 | 39 | 2.99 | 47 | Frontal, IFG | 28 | 28 | 0 | 3.40 |
| 9 | Frontal, MFG | -50 | 16 | 30 | 2.68 | 8 | Frontal, MeFG | 10 | 26 | 39 | 3.59 |
| 19 | Occipital, Lingual Gyrus | -8 | -58 | -6 | 2.57 | 32 | Frontal, MeFG | 8 | 10 | 45 | 2.58 |
| 3 | Parietal, Postcentral | -22 | -32 | 45 | 3.10 | 6 | Frontal, Precentral Gyrus | 54 | -2 | 27 | 2.83 |
| 3 | Parietal, Postcentral | -12 | -38 | 57 | 2.72 | 40 | Parietal, Postcentral | 42 | -26 | 48 | 2.68 |
| 13 | Temporal, STG | -46 | -2 | -9 | 3.07 | 4 | Frontal, Precentral Gyrus | 48 | -10 | 48 | 2.29 |
| 41 | Temporal, Transverse | -32 | -28 | 9 | 2.79 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 18 | -78 | -6 | 2.52 |
| 22 | Temporal, STG | -48 | -12 | 0 | 2.71 | 18 | Occipital, Lingual Gyrus | 14 | -84 | -12 | 2.27 |
| 47 | Frontal, IFG | -46 | 18 | -6 | 3.01 | 21 | Temporal, MTG | 66 | -16 | -9 | 2.44 |
| 47 | Frontal, IFG | -36 | 26 | -6 | 2.68 | 21 | Temporal, MTG | 60 | -10 | -6 | 2.38 |
| 17 | Occipital, Lingual Gyrus | -12 | -84 | 0 | 2.90 | 20 | Temporal, Sub-Gyral | 48 | -14 | -15 | 2.25 |
| 18 | Occipital, Lingual Gyrus | -6 | -78 | -3 | 2.78 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -44 | -56 | 42 | 2.59 | | | | | | |
| 39 | Parietal, IPL | -36 | -64 | 42 | 2.27 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| - | Occipital, Lingual Gyrus | -6 | -78 | 0 | 3.31 | 22 | Sub-lobar, Insula | 46 | -26 | -9 | 3.21 |
| 47 | Frontal, IFG | -30 | 14 | -18 | 3.09 | 22 | Temporal, STG | 64 | -34 | 9 | 3.19 |
| 47 | Frontal, IFG | -48 | 28 | -3 | 2.80 | 8 | Frontal, MeFG | 14 | 24 | 39 | 2.80 |
| 47 | Frontal, IFG | -38 | 28 | -3 | 2.56 | 18 | Occipital, Cuneus | 4 | -96 | 9 | 2.19 |
| 22 | Temporal, STG | -46 | -14 | 0 | 3.08 | 19 | Occipital, Lingual Gyrus | 18 | -66 | -6 | 2.03 |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -50 | -6 | 48 | 2.99 | 45 | Frontal, IFG | 48 | 28 | 0 | 3.21 |
| 6 | Frontal, Precentral Gyrus | -48 | -8 | 33 | 2.18 | 47 | Frontal, IFG | 34 | 26 | -6 | 2.93 |
| 6 | Frontal, SFG | -12 | 6 | 60 | 2.91 | 45 | Frontal, IFG | 50 | 20 | 12 | 2.79 |
| 6 | Frontal, SFG | -8 | -2 | 63 | 2.85 | 3 | Parietal, Postcentral | 56 | -10 | 48 | 2.96 |
| | | | | | | 6 | Frontal, MFG | 52 | 4 | 45 | 2.48 |
| | | | | | | 6 | Frontal, Precentral Gyrus | 48 | -10 | 33 | 2.18 |
| | | | | | | 6 | Frontal, SFG | 8 | 12 | 60 | 2.62 |
| | | | | | | 40 | Parietal, Supramarginal | 52 | -58 | 33 | 2.79 |
| | | | | | | 39 | Parietal, IPL | 44 | -64 | 39 | 2.74 |
| | | | | | | 6 | Frontal, Paracentral | 12 | -26 | 48 | 2.09 |

| Kontrollerwachsene > Erwachsene mit LRS | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|-----|-----|----|-------------------|----|--------|---|---|---|---|
| Linke Hemisphäre | | | | | Rechte Hemisphäre | | | | | | |
| BA | Region | x | y | z | Z | BA | Region | x | y | z | Z |
| Lesen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -38 | -20 | 57 | 2.40 | | | | | | |
| Nonwortreimen - Buchstaben | | | | | | | | | | | |
| 4 | Frontal, Precentral Gyrus | -34 | -22 | 63 | 3.48 | - | - | - | - | - | - |
| 32 | Limbic, Anterior Cingu- | -22 | 32 | 6 | 2.64 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -56 | -42 | 42 | 2.38 | | | | | | |
| 40 | Parietal, IPL | -52 | -46 | 51 | 1.71 | | | | | | |
| 19 | Temporal, ITG | -50 | -58 | 0 | 2.32 | | | | | | |

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass mir die geltende Promotionsordnung der Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist.

Die vorliegende Arbeit wurde von mir ohne unzulässige Hilfe Dritter angefertigt. Alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönliche Mitteilungen und Quellen sind in der Arbeit angegeben. Die Umsetzung der Stimulation für das fMRI-Experiment hat Herr Dr. U. Möller realisiert. Desweiteren hat mir Herr Dr. U. Möller bei der Auswertung der fMRI-Daten (SPM99) unentgeltlich geholfen.

Ferner erkläre ich, dass ich nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen habe und Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Tätigkeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Arbeit stehen.

Die Arbeit wurde weder im In- noch Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Weder früher noch gegenwärtig habe ich an einer anderen Hochschule eine Dissertation eingereicht.

Ich versichere, dass ich nach bestem Wissen und Gewissen die Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Jena, den 22.06.2002

Marc Ligges