



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 heraus gearbeitet 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.

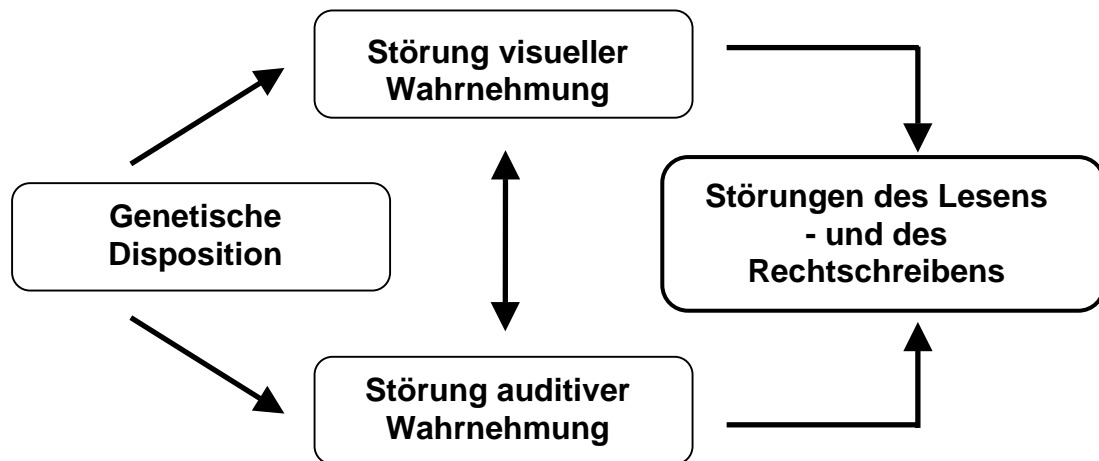


Abbildung 1: Ursachenmodell zur LRS (vgl. Schulte-Körne, 1999, S. 4).

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.

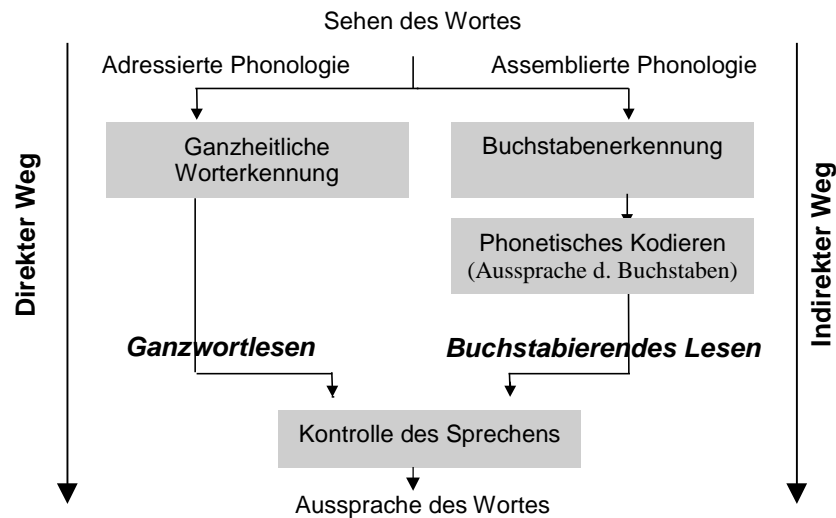


Abbildung 2: Duales Lesemodell (modifizierte Abbildung aus Paap & Noel, 1991).

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.

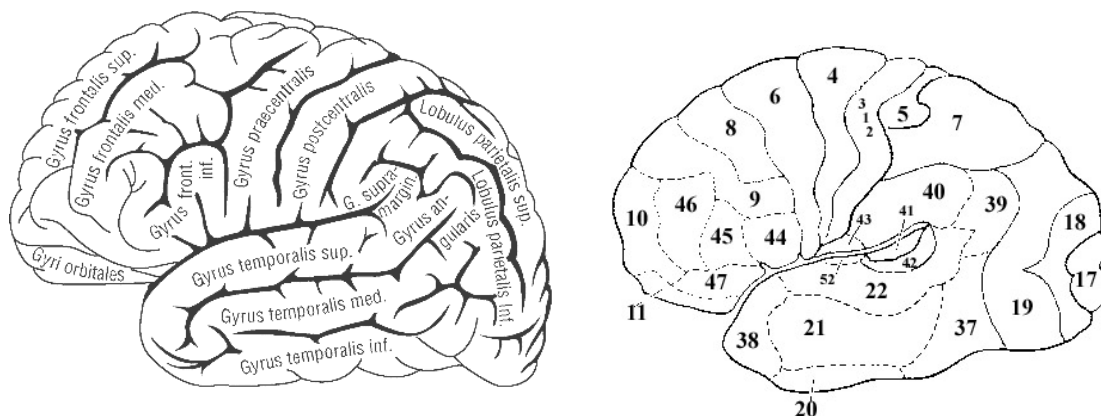
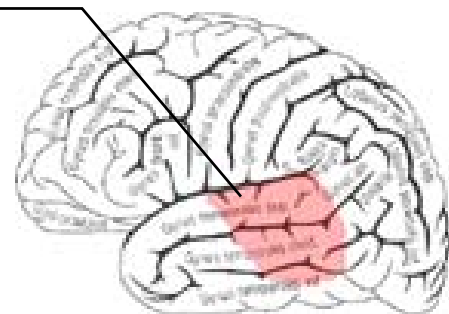


Abbildung 3: Links: Wesentliche Anatomische Lokalisationen; Rechts: Einteilung nach Brodmann (BA).

Studien zur ungestörten auditorischen Sprachverarbeitung

Temporaler Kortex (incl. Wernicke-Areal)

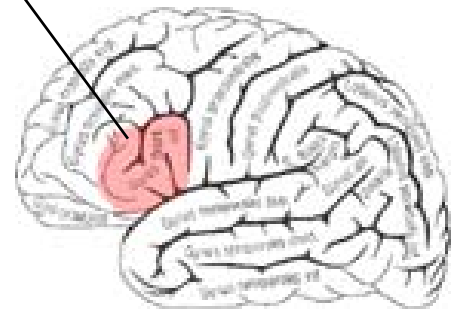
Im Rahmen einer PET-Studie konnte Burton et al. (2001) darlegen, dass der posterior superior temporale Gyrus eine wesentliche Rolle bei der auditorischen Sprachverarbeitung spielt. Ferner beobachteten Binder et al. (1995), dass der primär auditorische Kortex gleichartig auf nichtsprachliche und sprachliche 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).

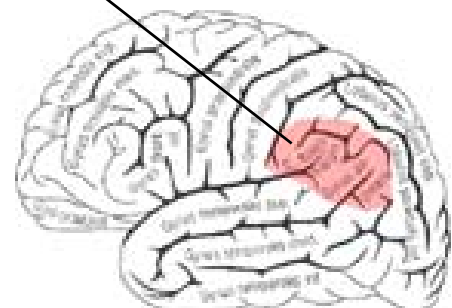
Inferior frontaler Kortex (incl. Broca-Areal)

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

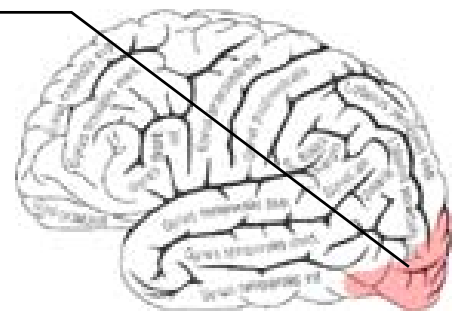
Laut Demonet und Thierry (2001) konnten Studien belegen, dass je nach in der Untersuchung verwendeten Paradigma und theoretischem Modell, beim Leseprozess eine Vielzahl an verschiedenen Arealen aktiviert ist. So beschreiben Fiez und Petersen (1998) den linken *occipito-temporalen Kortex* (BA18/19/37) 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)

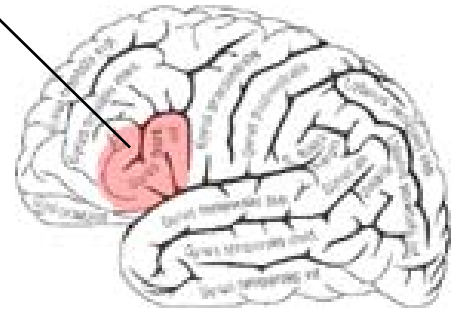
Die stärkste Aktivierung wurde beim „maximalen Kontrast“ im medialen occipitalen Kortex und in sprachverarbeitenden Arealen beobachtet. Diese beobachteten Aktivierungen zeigten sich jedoch nicht mehr, wenn die Aktivierung der Pseudowörter von den gleich langen „false font“-Strings abgezogen wurden. Da 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.

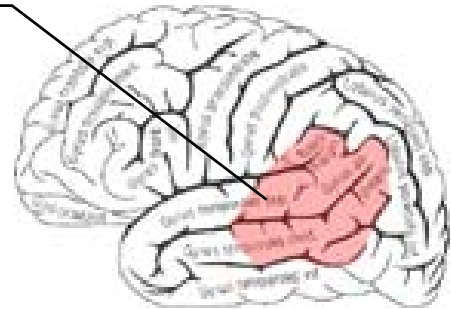


In einer fMRI-Untersuchung von Paulesu et al. (1997) sollten sechs Probanden phonematische und semantische Aufgaben bearbeiten. Die Ergebnisse für beide Aufgaben ergaben gemeinsame Aktivierungen im anterioren triangulären Teil des linken IFG (BA45) und im linken Thalamus. Die semantische Aufgabe ergab 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)

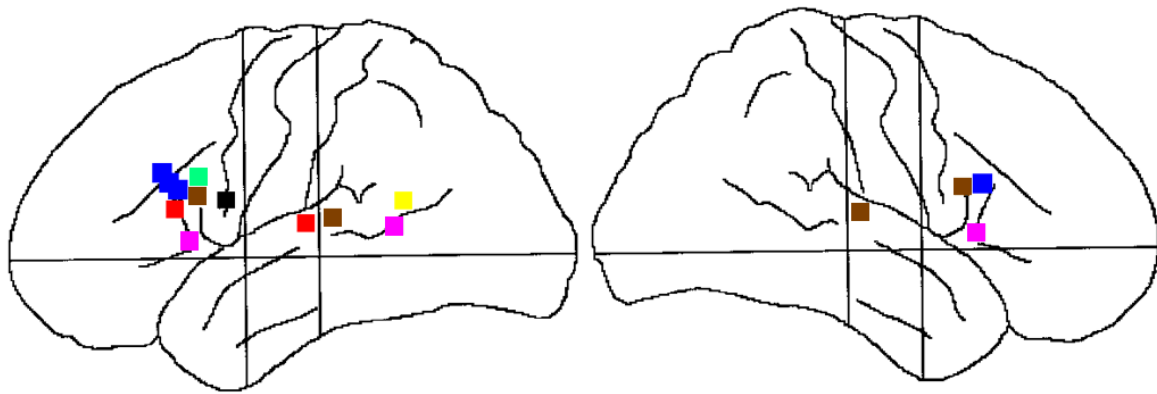
Fiebach et al. (2002) untersuchten Probanden, die lexikalische Entscheidungen bezogen auf hochfrequente und niedrigfrequente Wörter und Nonwörter treffen mussten. Mittels efMRI fanden die Autoren Hinweise für unterschiedliche funktionelle Beiträge verschiedener Gehirnregionen für den Zugriff auf das 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

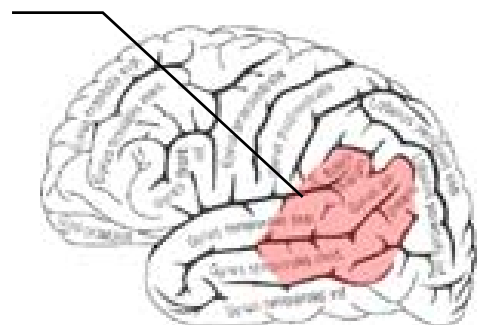
Eden et al. (1996) untersuchten die Rolle der visuellen Verarbeitung bei der LRS, indem sie ihren Probanden bewegliche Stimuli präsentierten. Diese Stimuli führten zu Aktivierungen in visuellen Regionen (V5) bei Kontrollprobanden, jedoch nicht bei Probanden mit LRS. Nichtbewegliche Stimuli führten hingegen 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).



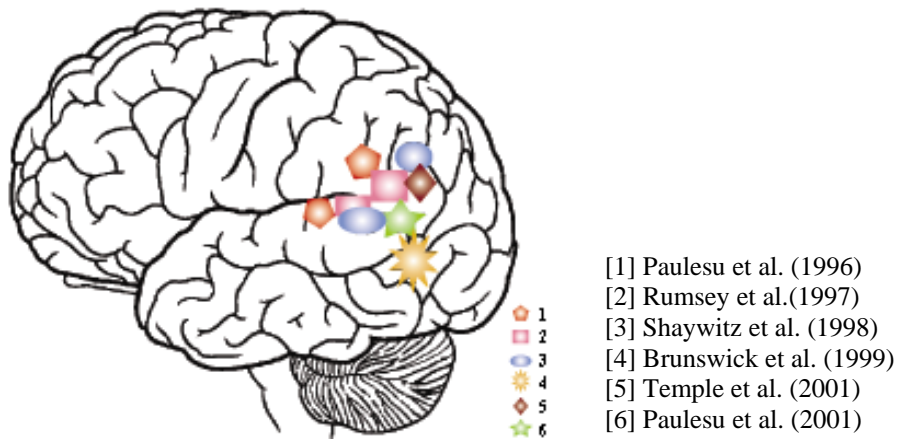


Abbildung 5: Neuronale Unterbrechung bei phonologischer Verarbeitung bei Probanden mit LRS. Modifizierte Abbildung aus Temple (2002).

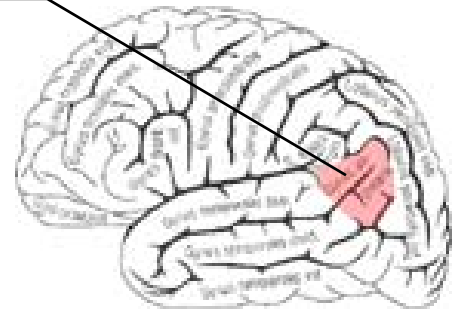
Im Rahmen einer PET-Untersuchung von Rumsey et al. (1992) sollten 14 Probanden mit LRS akustisch präsentierte Wörter reimen. Sie zeigten hierbei verminderte Aktivierungen in linken temporo-parietalen Regionen (angularer Gyrus). In einer weiteren Studie von Rumsey et al. (1994) wurden die Aspekte syntaktischer 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

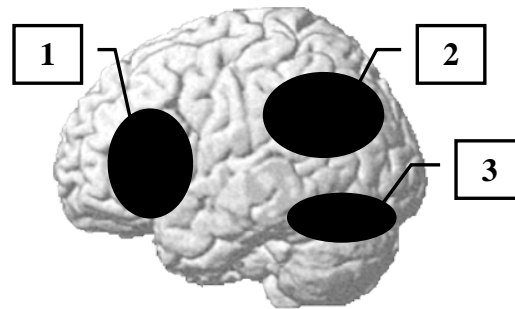
französische Leser bestätigt werden. Wenn jedoch die Probanden mit LRS in Abhängigkeit von der Muttersprache verglichen wurden, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass Probanden mit LRS ein weniger ausgebildetes Lesesystem besitzen, welches nicht in der Lage 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 Gedächtnisbasierten Erinnerungssystems. Einige Forscher betrachten das dorsale Netzwerk als wesentlichen Bestandteil bei der Verbindung von der visuellen Repräsentation 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-temporaler Kortexareale führen. Aufgaben mit vorrangig adressierter Verarbeitung (Wortlesen) hingegen sollen zu Aktivierungen occipito-temporaler 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:

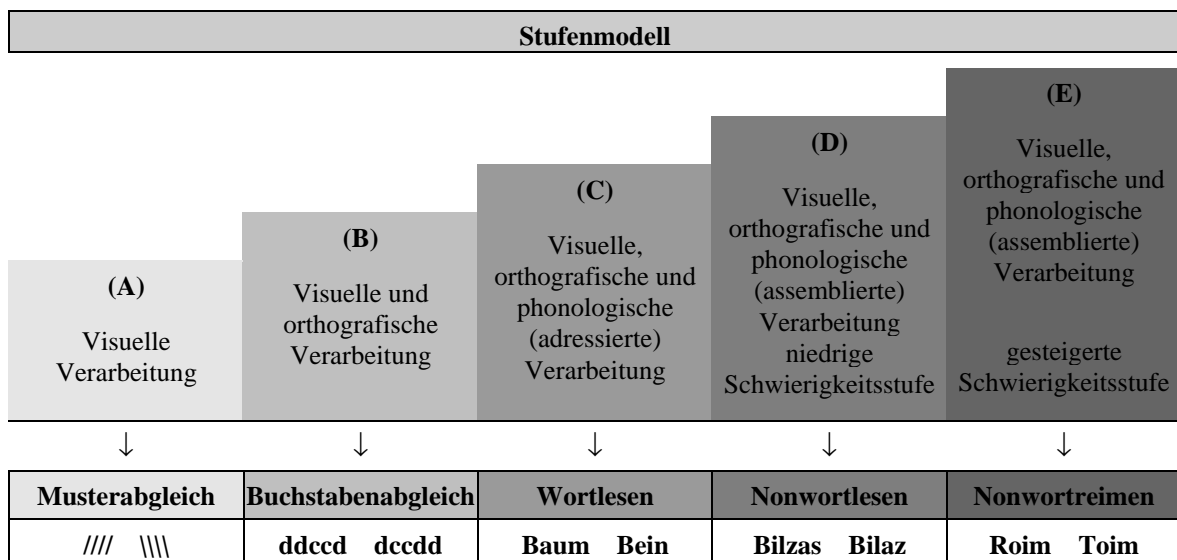


Abbildung 7: Stufenmodell mit steigender phonologischer Anforderung.

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)	
	M	SD	M	SD	M	SD	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).

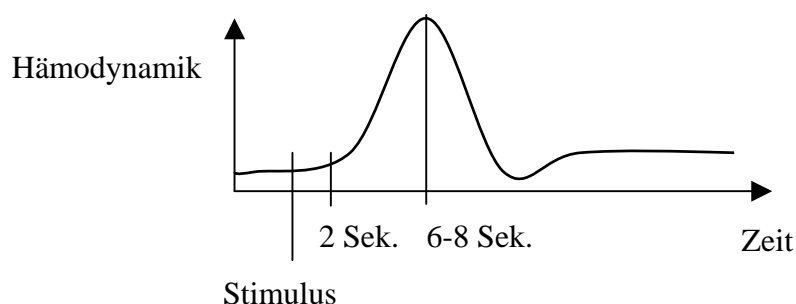


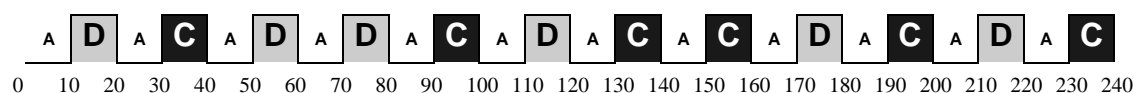
Abbildung 8: Darstellung der hämodynamischen Antwortfunktion (vgl. Ligges, 1999).

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

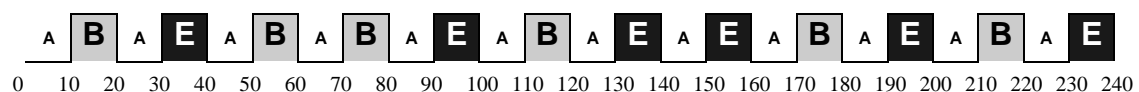


Abbildung 9: Stimulationsreihenfolge für Teil 1 und 2. (A) Slashpaarabgleich; (B) Buchstabenabgleich; (C) Wortlesen; (D) Nonwortlesen; (E) Nonwortreimen. Zahlen - Scanfolge.

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:

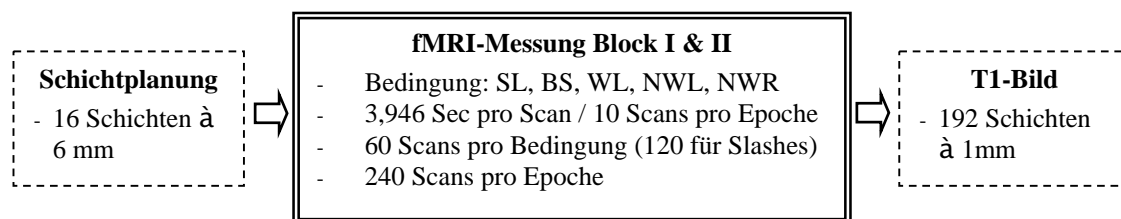


Abbildung 10: Darstellung des Versuchsaufbaus.

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.

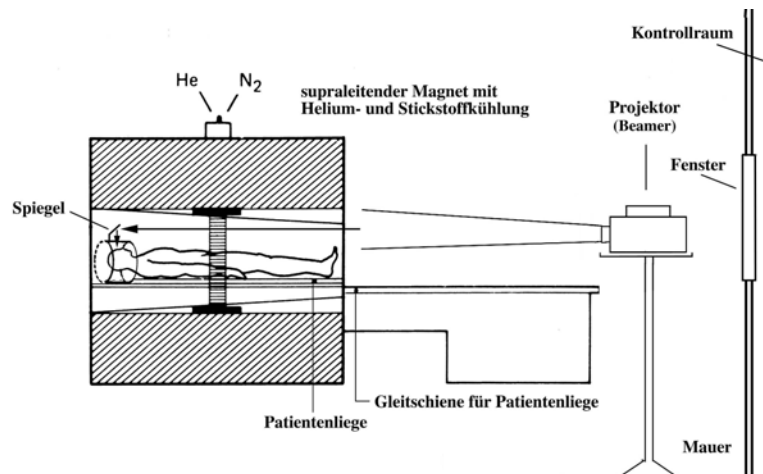


Abbildung 11: Schematischer Aufbau der MRI-Versuchsanordnung.

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.

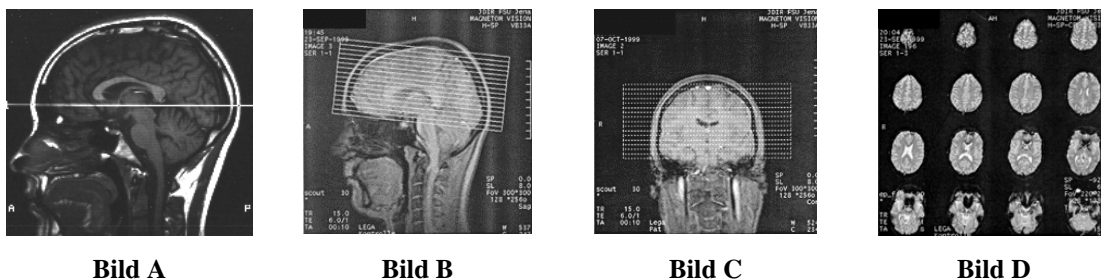


Abbildung 12: Schichtplanungsbilder.

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.

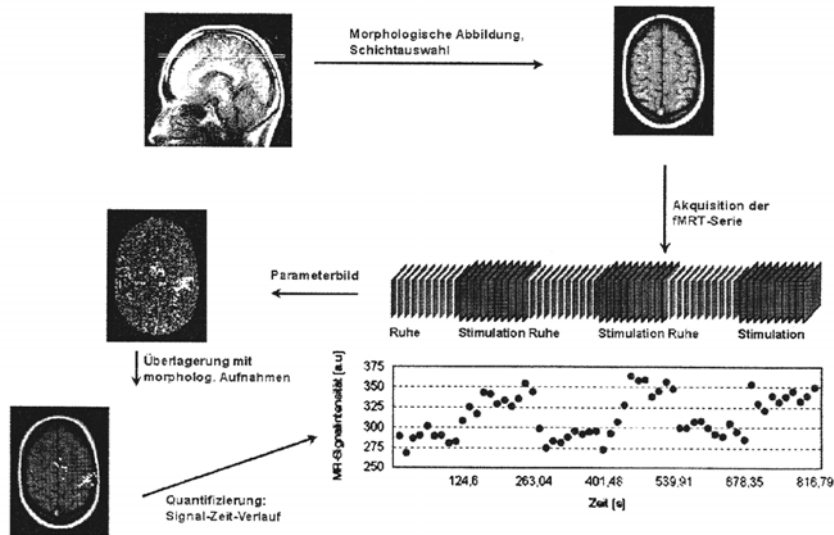


Abbildung 13: Schema der fMRI-Datenakquisition und -Datenanalyse (Reiser & Semmler, 1997, S. 806).

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:

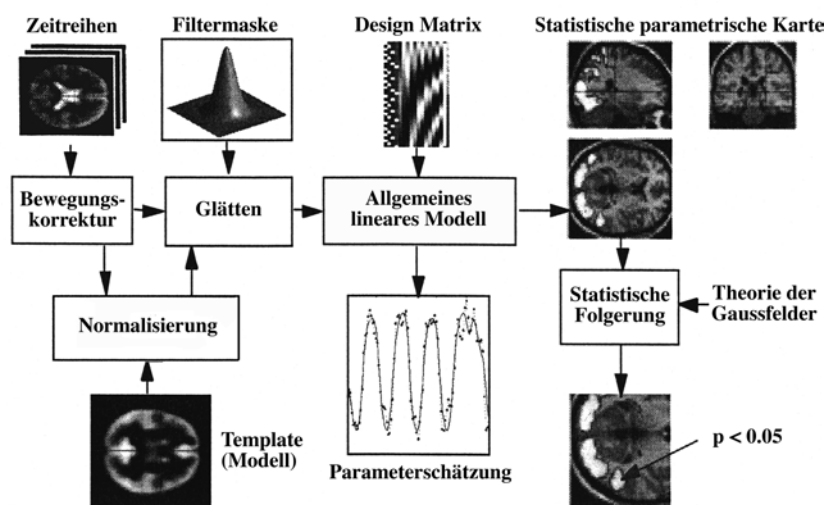


Abbildung 14: Überblick der SPM-Analyse.

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.

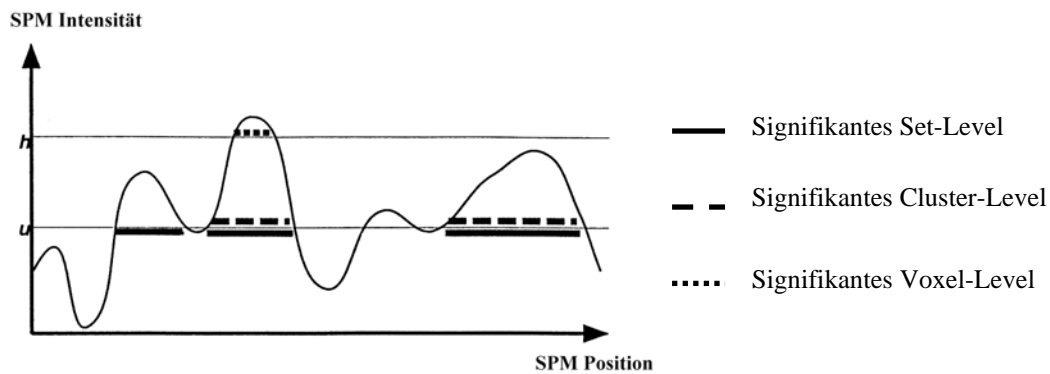


Abbildung 15: Darstellung der Set; Cluster- und Voxel- Level (vgl. Ligges, 1999).

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*2*3 mm normalisiert. Das Glätten der Daten erfolgte mit einem Filter von 8*8*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 Mittelwertvergleiche (t-Tests) für die nonverbale Intelligenz zeigt folgende Ergebnisse:

Tabelle 4: Mittelwertvergleiche (*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:

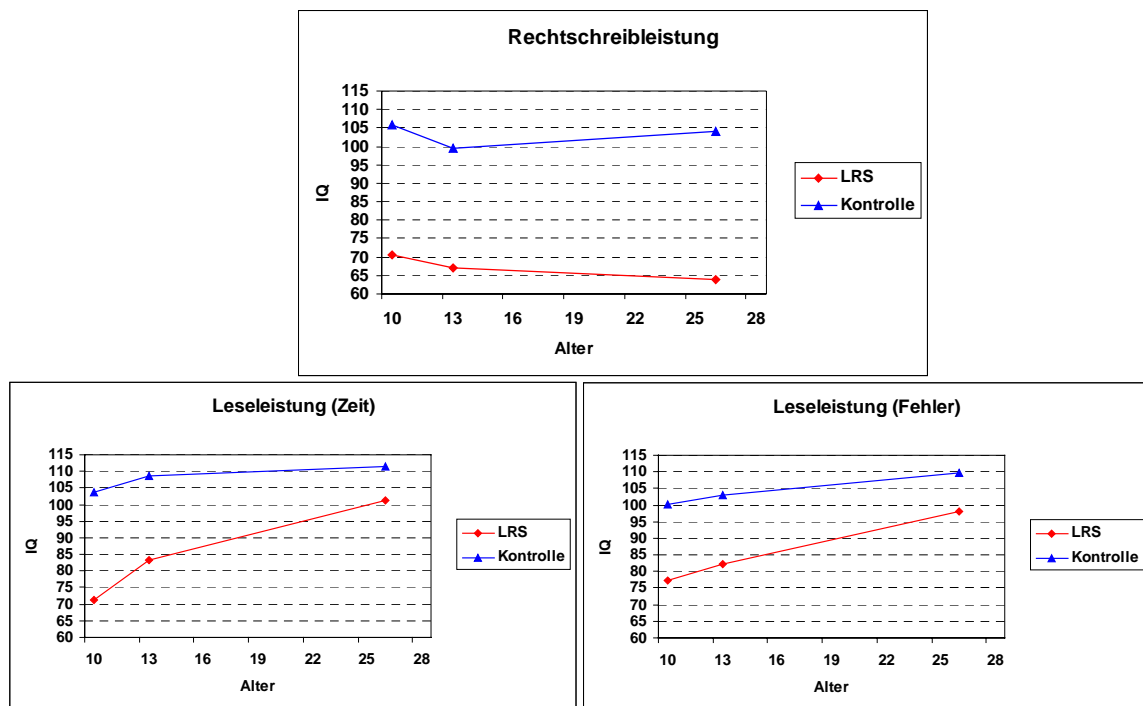


Abbildung 16: Rechtschreibleistung und Leseleistung (Zeit und Fehler). Alter 10-Kinder; 13-Jugendliche; 26-Erwachsene.

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:

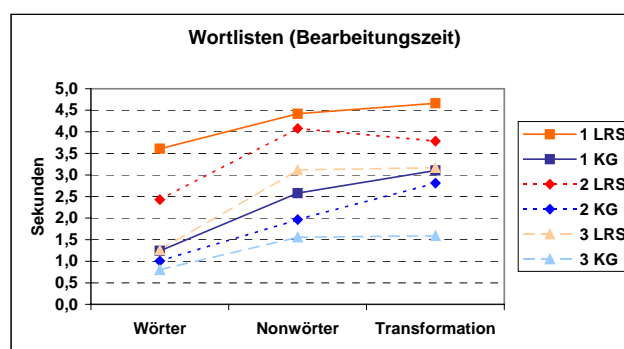


Abbildung 17: Wortlisten Bearbeitungszeit. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

Die Berechnung der Mittelwertvergleiche (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:

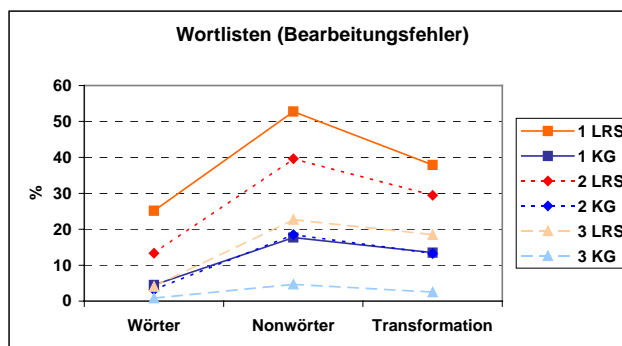


Abbildung 18: Wortlisten Bearbeitungsfehler. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

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:

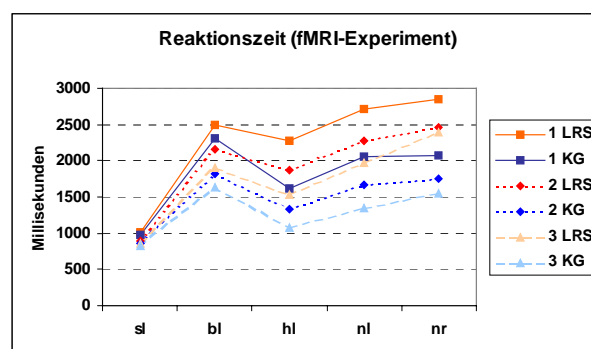


Abbildung 19: fMRI-Experiment Reaktionszeit. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

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:

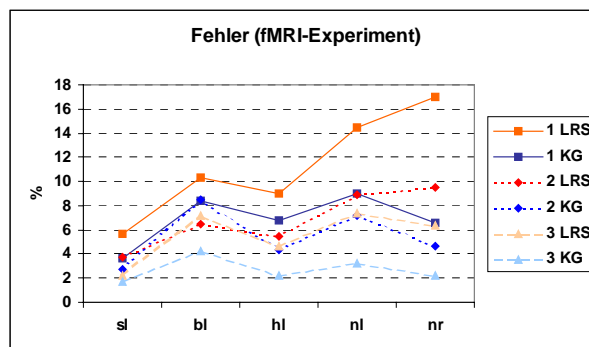


Abbildung 20: fMRI-Experiment Fehler. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

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:

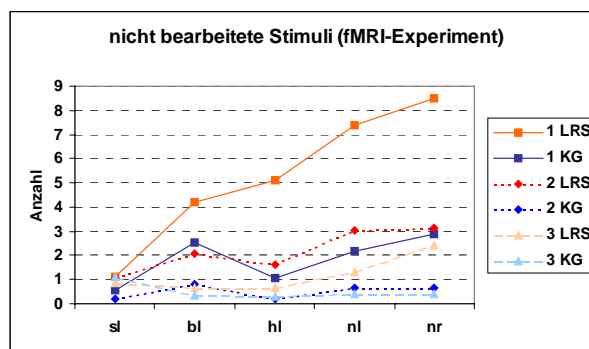


Abbildung 21: fMRI-Experiment nicht bearbeitete Stimuli. 1=Kinder; 2=Jugendliche; 3=Erwachsene. LRS=Probanden mit LRS; KG=Kontrollprobanden.

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

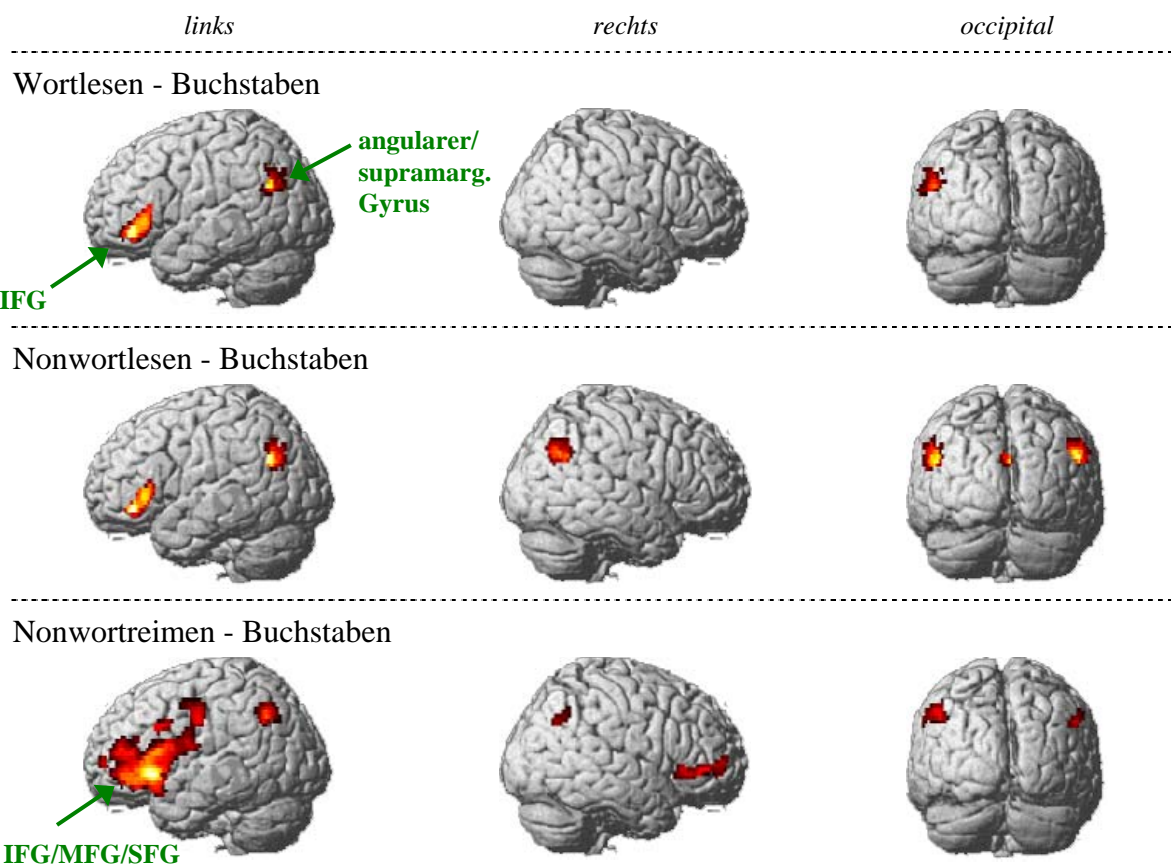
Die nicht bearbeiteten Stimuli liefern ein heterogeneres Bild und lassen zwei Schlüsse zu: Da das maximale „Zeitfenster“ aller Bedingungen für die fMRI-Untersuchung auf fünf Sekunden festgelegt wurde, scheint es so zu sein, dass alle Probanden die Aufgaben in diesem Zeitrahmen lösen konnten. Nur in der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

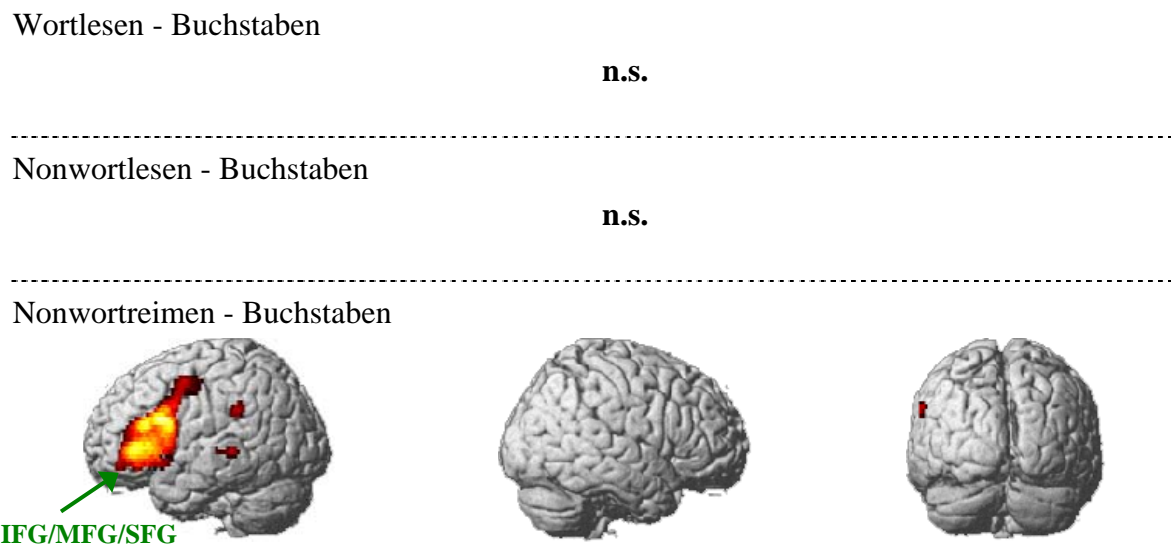
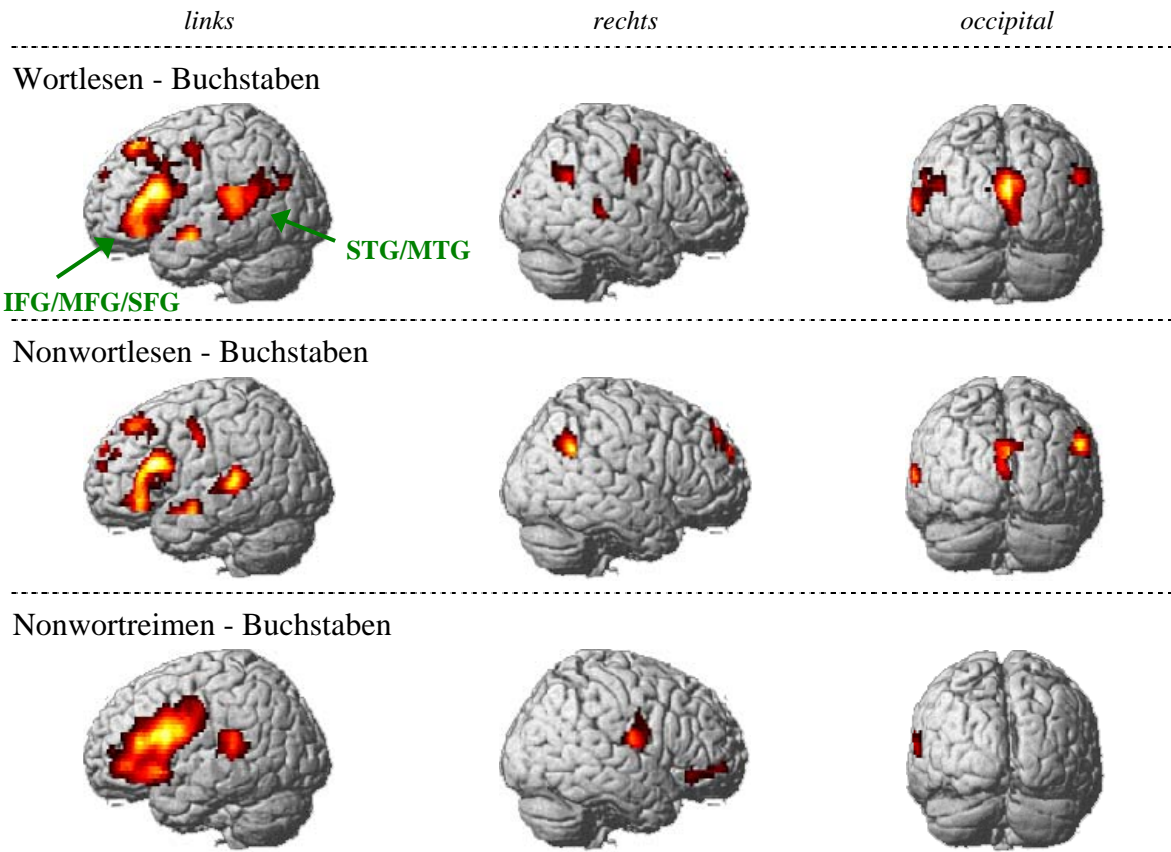


Abbildung 22: Gruppenanalyse für Kinder.

Jugendliche mit LRS



Kontrolljugendliche

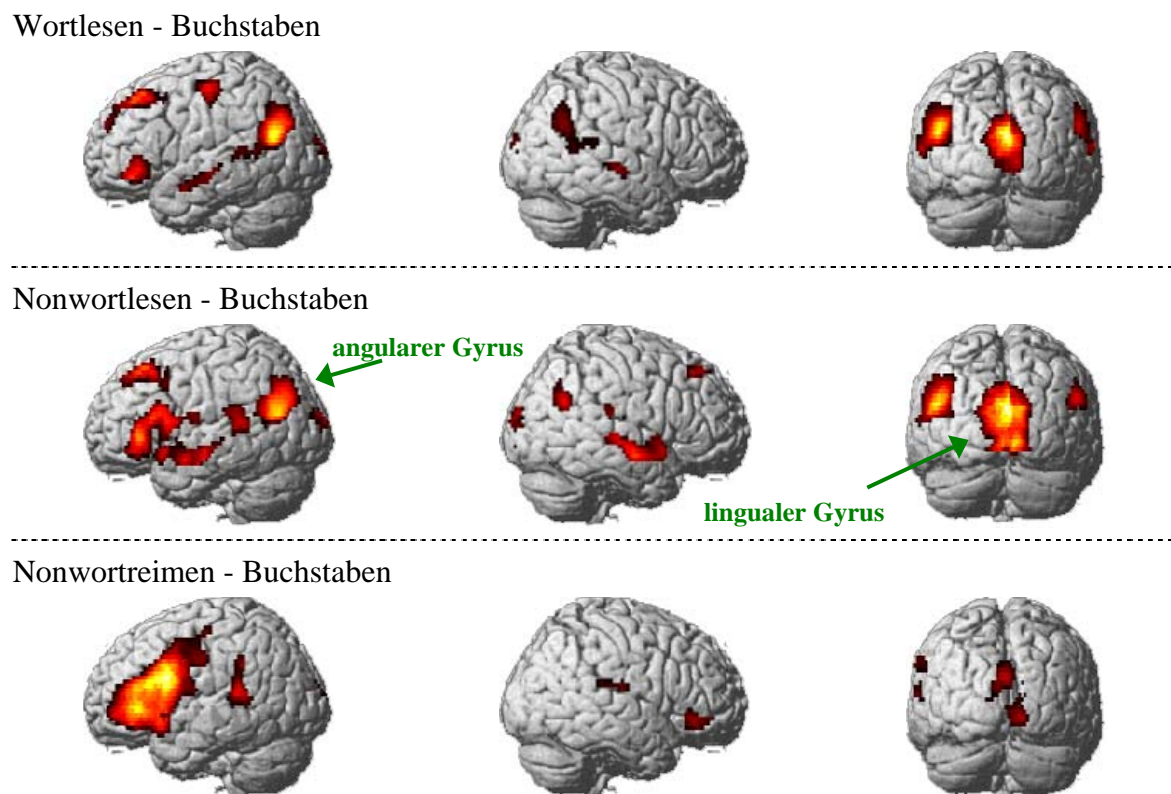


Abbildung 23: Gruppenanalyse für Jugendliche.

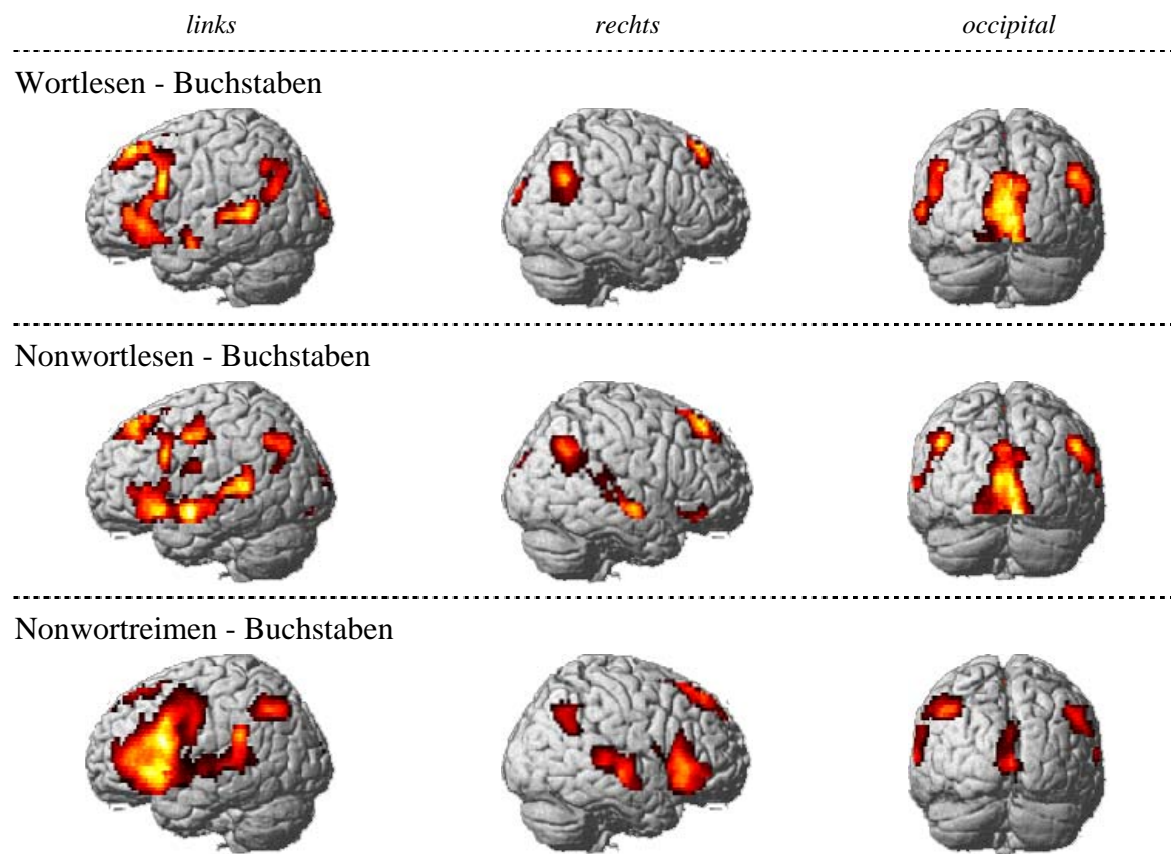
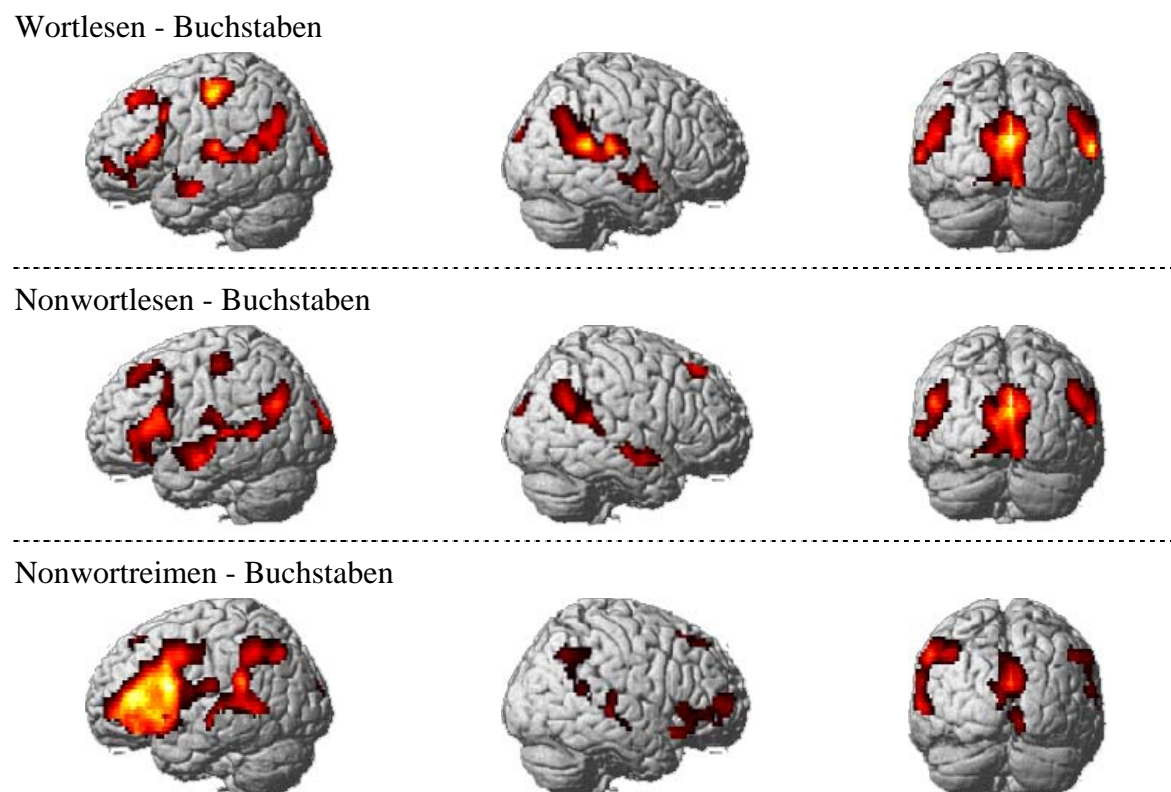
Erwachsene mit LRS**Kontrollerwachsene**

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).

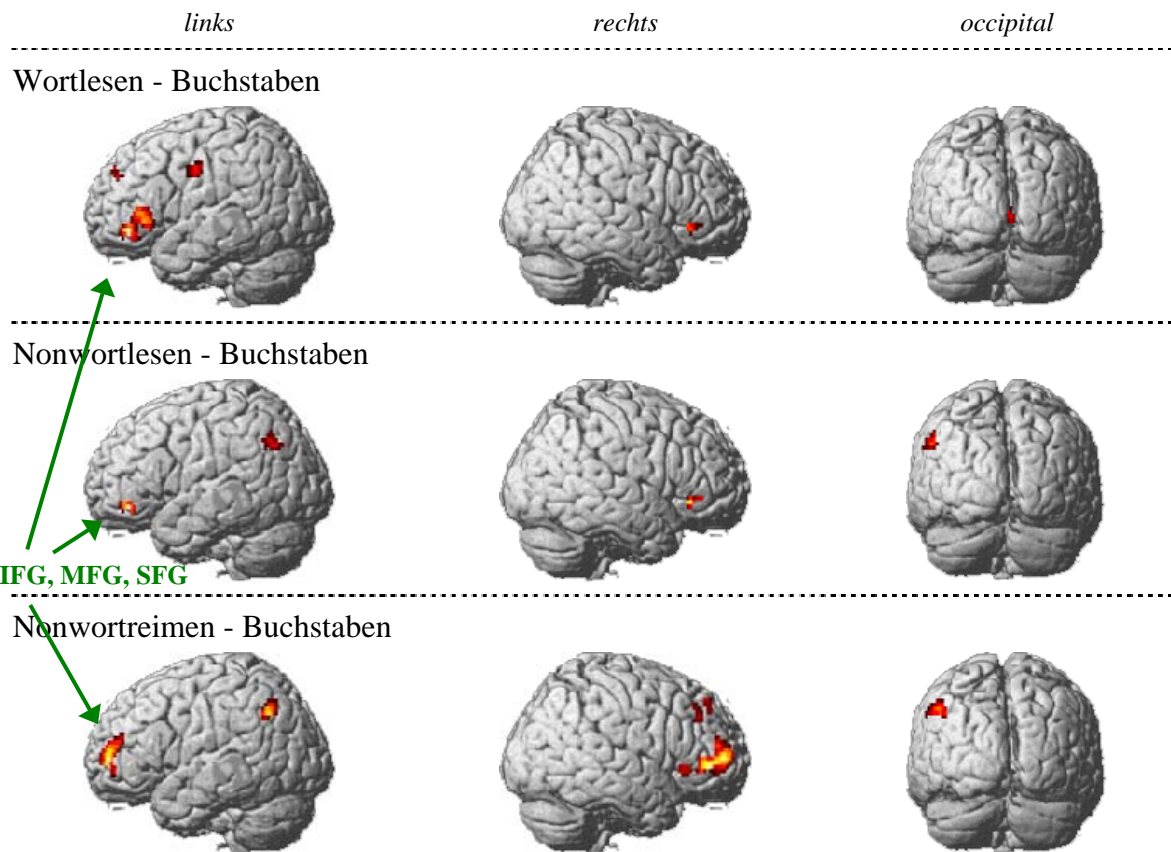
Beim Vergleich der Bedingungen gegen die Buchstaben zeigen sich bei Jugendlichen mit und ohne LRS gleichermaßen bilaterale Aktivierungen in extrastriären (lingualer Gyrus; BA17/18/19), parietalen (angularer und supramarginaler Gyrus; BA39/40), temporalen (MTG, STG; BA21/22/39) und frontalen Regionen (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

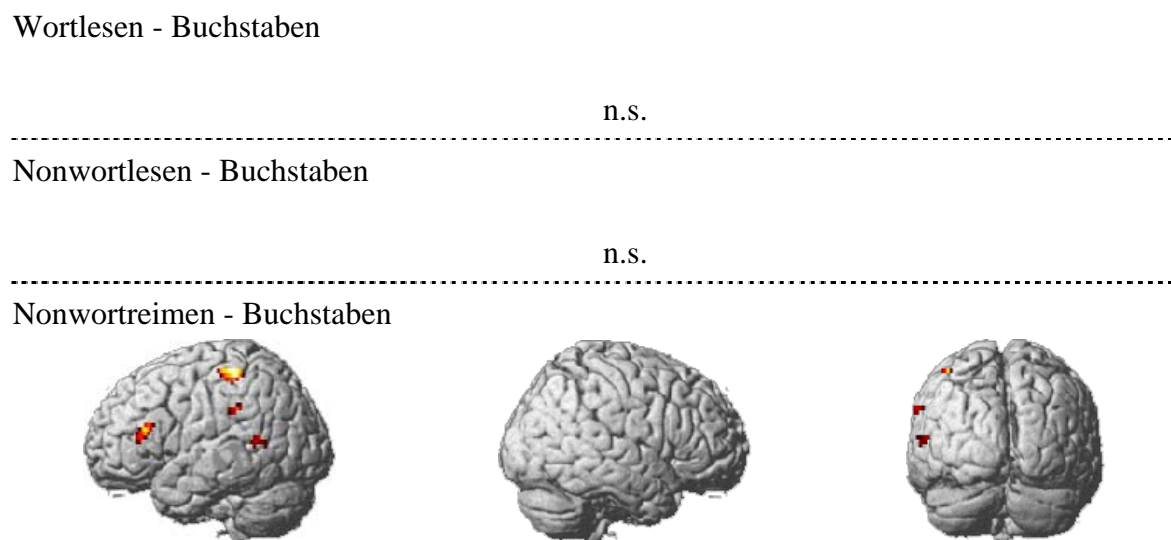
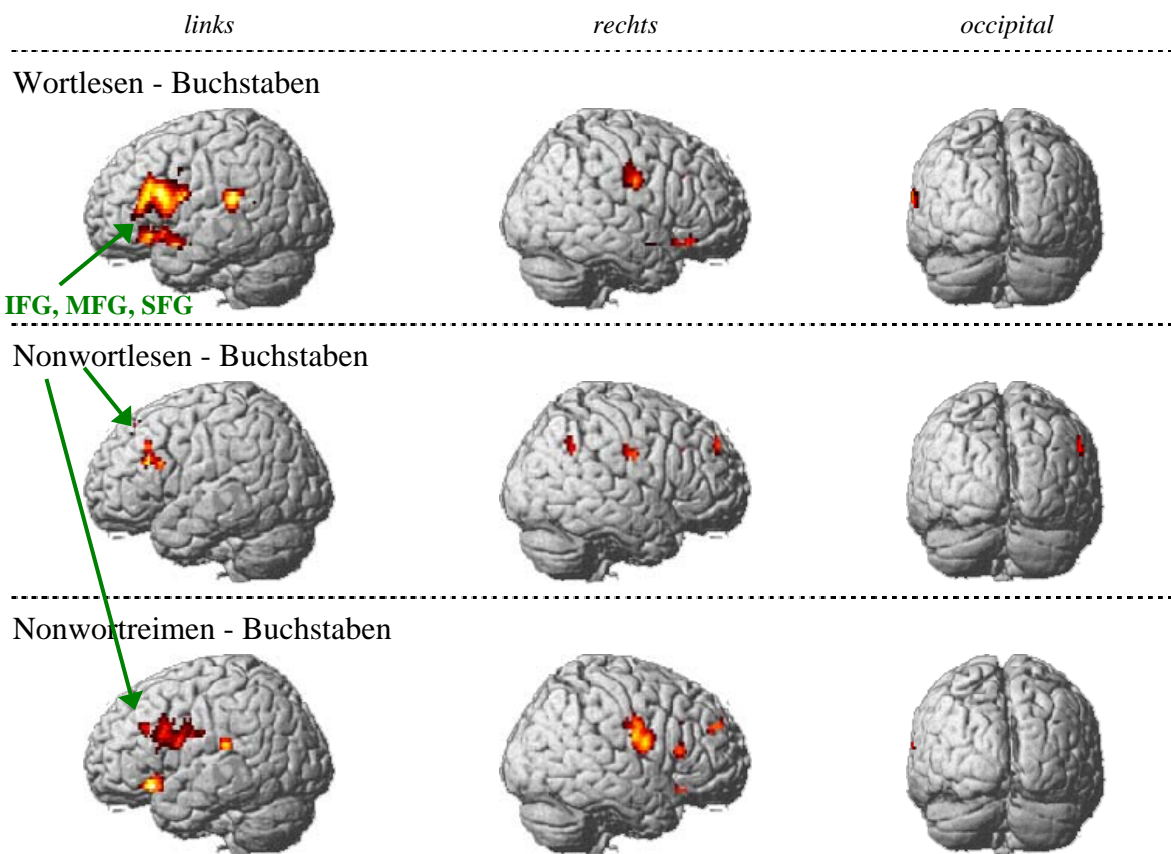


Abbildung 25: Gruppenunterschiede bei Kindern.

Jugendliche mit LRS > Kontrolljugendliche



Kontrolljugendliche > Jugendliche mit LRS

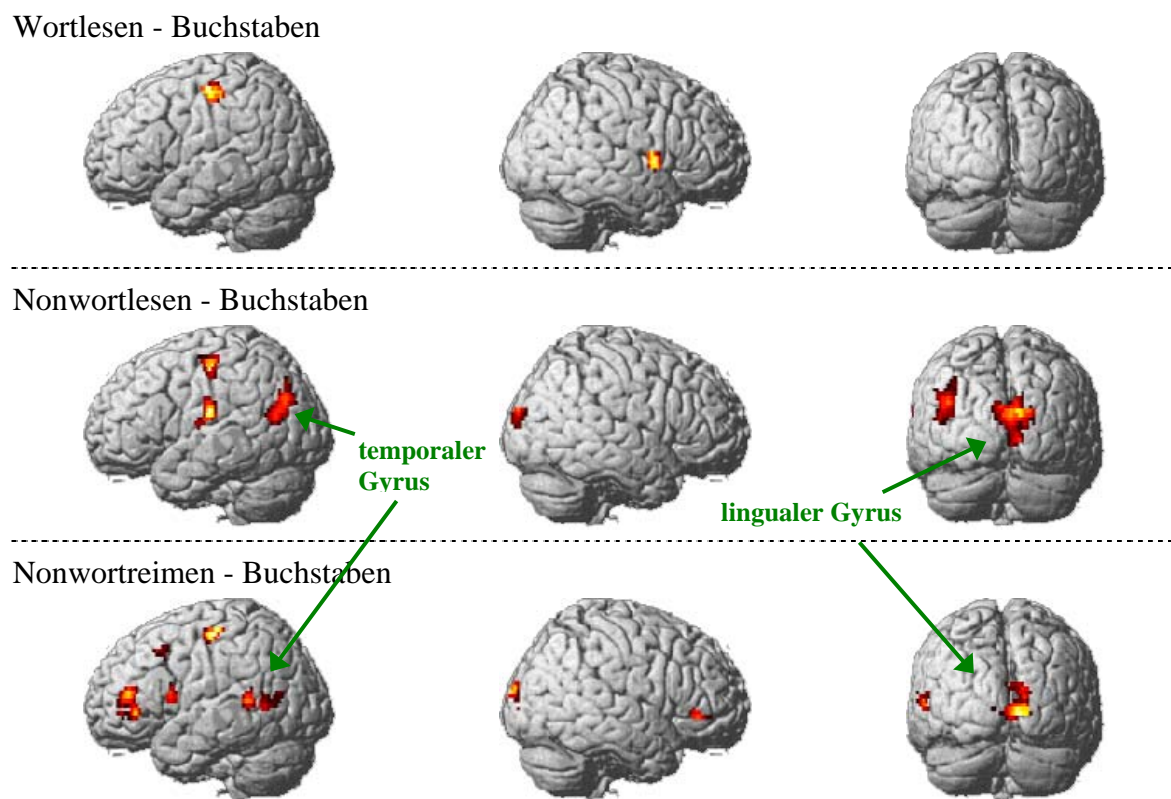
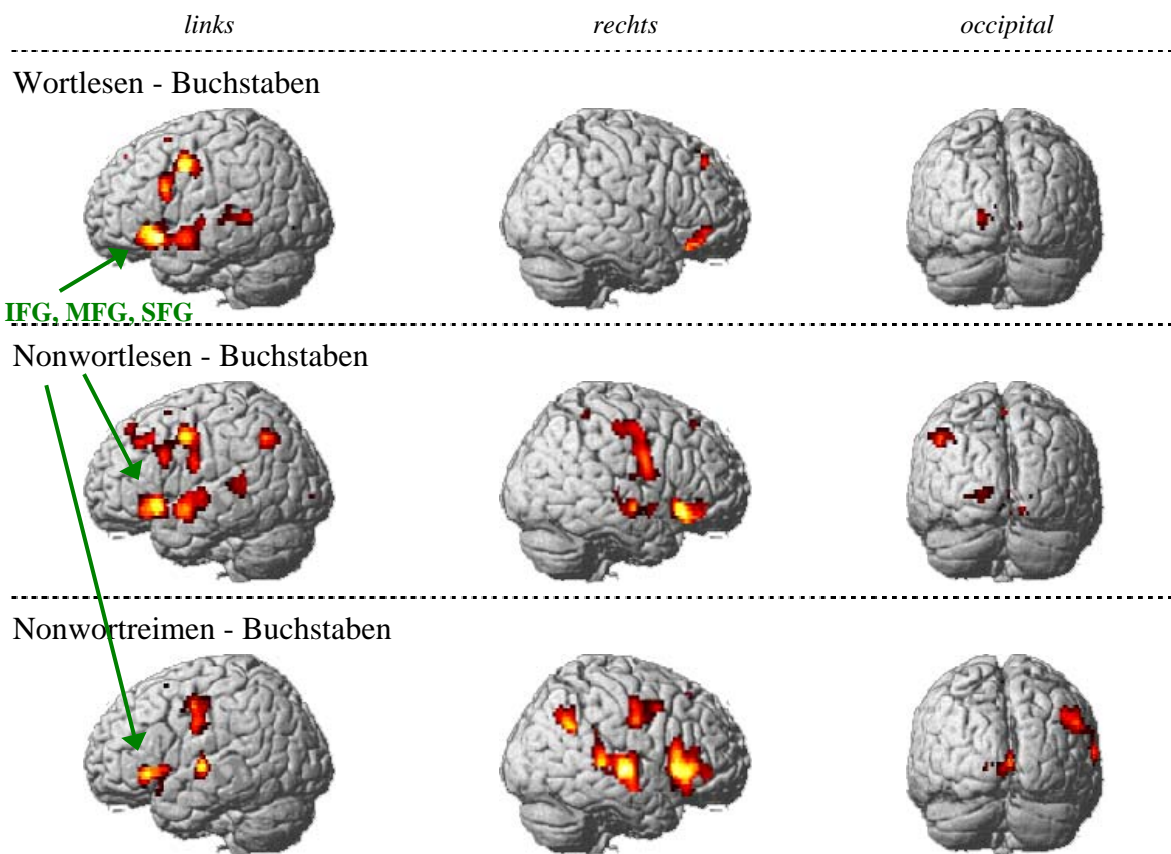


Abbildung 26: Gruppenunterschiede bei Jugendlichen

Erwachsene mit LRS > Kontrollerwachsene



Kontrollerwachsene > Erwachsene mit LRS

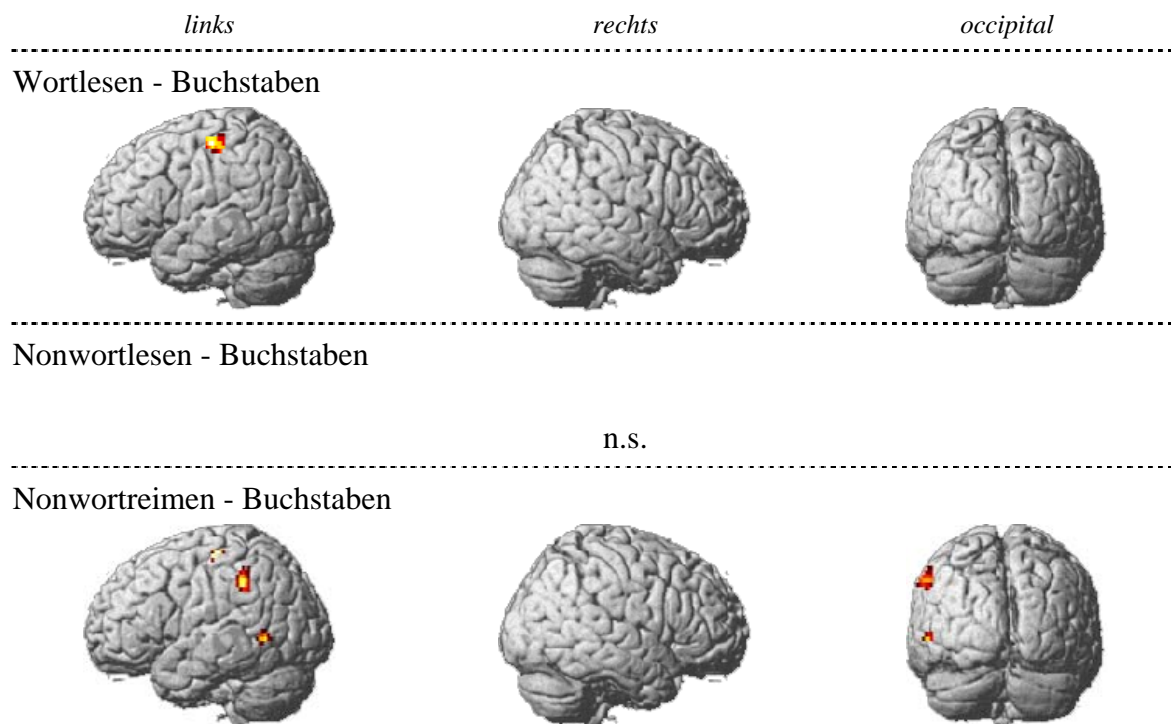


Abbildung 27: Gruppenunterschiede bei Erwachsenen.

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 Kontrolljünglingen 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.

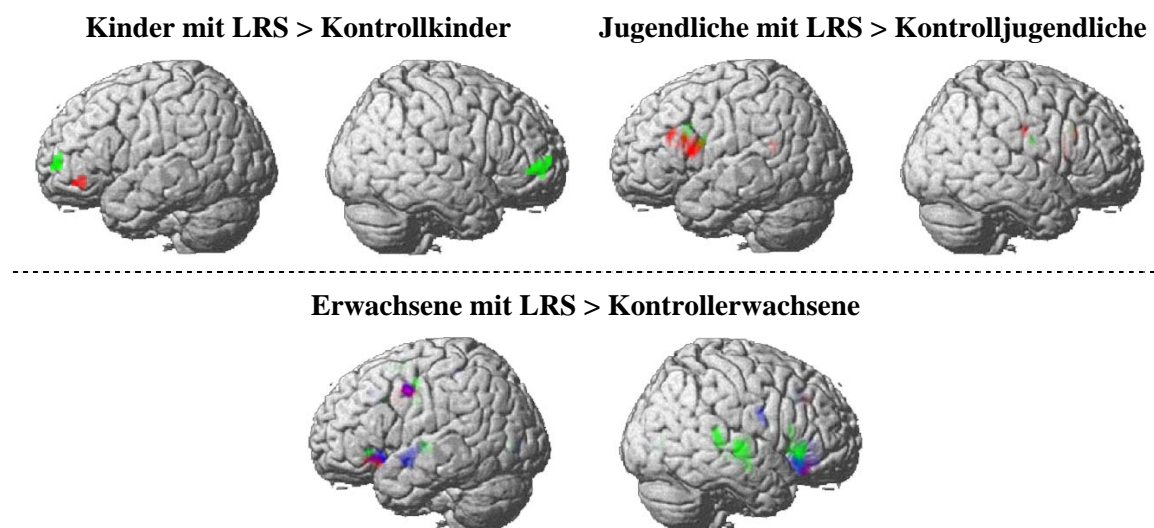


Abbildung 28: Gruppenunterschiede für Kinder, Jugendliche und Erwachsene (alle Kontraste gegen BS). rot – Wortlesen; blau – Nonwortlesen; grün – Nonwortreimen.

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 hypothesenkonform 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 unausgereiften“) 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.

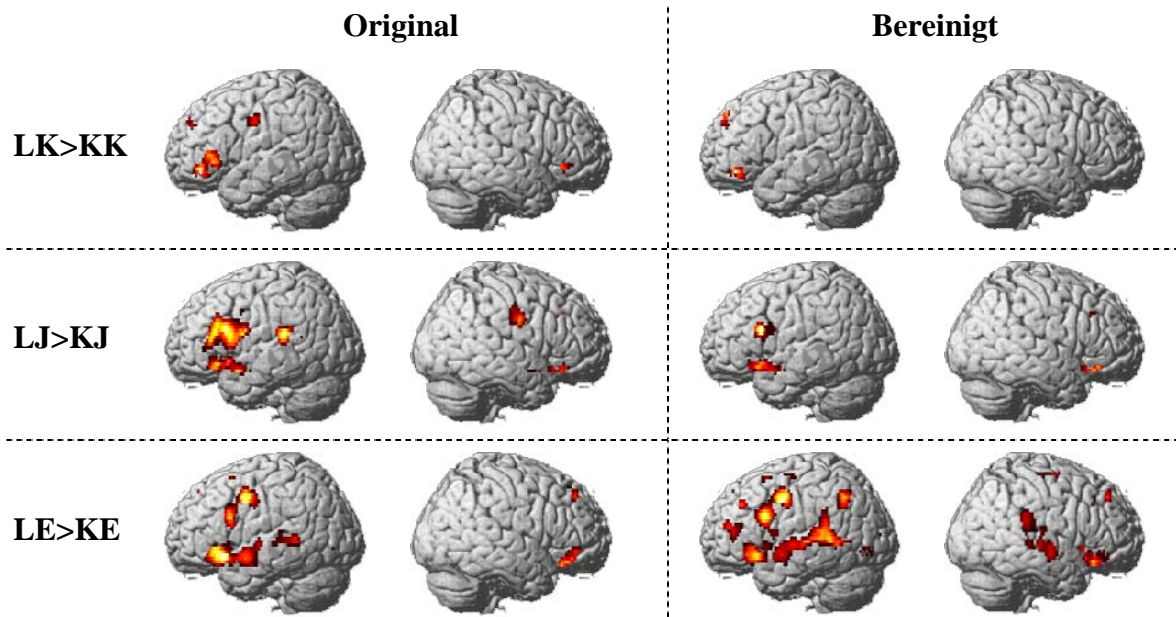


Abbildung 29: Kovariate „Reaktionszeit“ für die Überaktivierung der Probanden mit LRS beim Wortlesen (vs. Buchstaben). Die Überaktivierung bei Probanden mit LRS wird gegen die als „bereinigt“ dargestellte Bedingung gegenübergestellt. Rechts sind die Aktivierungen dargestellt, in denen die unterschiedlichen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

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 Messequenzen 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).

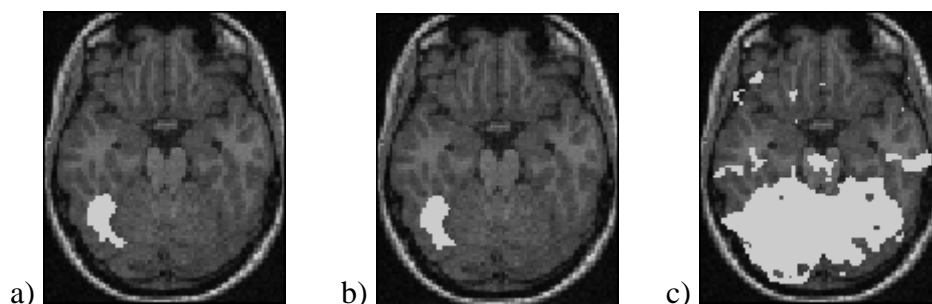
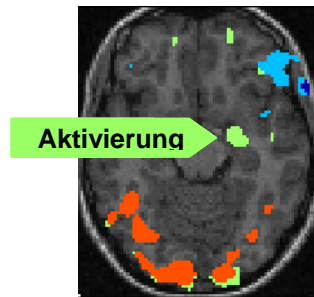


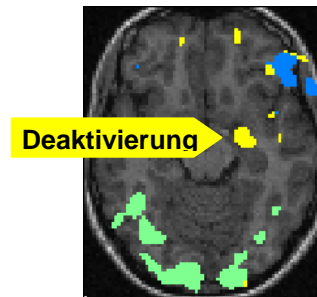
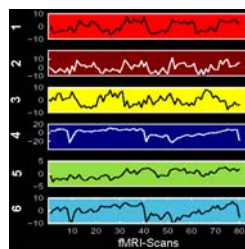
Abbildung 30: Ergebnisse von drei verschiedenen Methoden, mit denen die im fMRI-Experiment am stärksten aktivierten Hirnareale charakterisiert wurden (Darstellung einer Schicht vor dem Hintergrund eines anatomischen MR-Bildes). a) SPM-Ergebnis, Voxel mit den größten Werten der t -Statistik ($T = 4.7$), 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

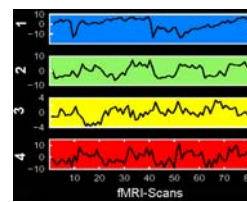


Abbildung 31: In Abhängigkeit vom erreichten Grad der Clusteroptimierung und der Anwendung einer statistischen Evaluierungsmethode können für ein und denselben fMRI-Datensatz verschiedene Ergebnisse resultieren, die zu konträren Interpretationen Anlass geben. Oben: Zuordnung der Voxeln mit starker Dynamik 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 H215O 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. *Icopp*, 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	Unsin

◆ **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 ut	Gaswundegka ut	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	Giwihl	Giwihl	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
fvvv	fvvv	plppp	pplpp	dddmd	ddmdd	rrdr	rrdr	xxdxx	xxdxx	kkfkk	kkfkk
dddssd	dddssd	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	ppmpp	ppmpp	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	tttd	tttd	kkkrk	kkkrk	pxpp	pxpp	nnndn	nnndn
wwwwhw	wwwwhw	dddmd	dddmd	nnmnn	nnmnn	llmll	llmll	yycyy	yycyy	sssmss	sssmss
mlmm	mlmm	ccjcc	cccjc	qqqqq	qqqqq	qqmqm	qqmqm	bbdbb	bbdbb	ppppp	ppppp
kkkskk	kkkskk	pprrp	pprrp	blbbb	blbbb	lll	lll	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	nnmnn	nnmnn	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	vvdv	vvdv	lxll	lxll	ccrcc	ccrcc	rrmrr	rrmrr	nnnln	nnnln
qlqq	qlqq	ccdcc	ccdcc	ffrff	ffrff	wfw	wfw	pprrp	pprrp	zzmzz	zzmzz
fzff	fzff	hhmhh	hhmhh	ggdgg	ggdgg	nnwnn	nnwnn	hhdhh	hhdhh	yydy	yydy
pppwp	pppwp	rrrrr	rrrrr	nnjnn	nnjnn	cclc	clcc	rfr	rfr	dldd	dldd
vvfvv	vvfvv	ppppp	ppppp	ssms	ssms	rrrrr	rrrrr	vvjvv	vvjvv	wdww	wdww
lllrl	lllrl	nnlnn	nnlnn	kkfkk	kkfkk	ppppp	ppppp	qqqqq	qqqqq	dddrd	dddrd
hhshh	hhshh	yymyy	myyyy	nznn	nnzn	jjjjj	jjjjj	ddd	ddd	rrrrr	rrrrr
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	Ebse	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	24	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
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
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
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
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			

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

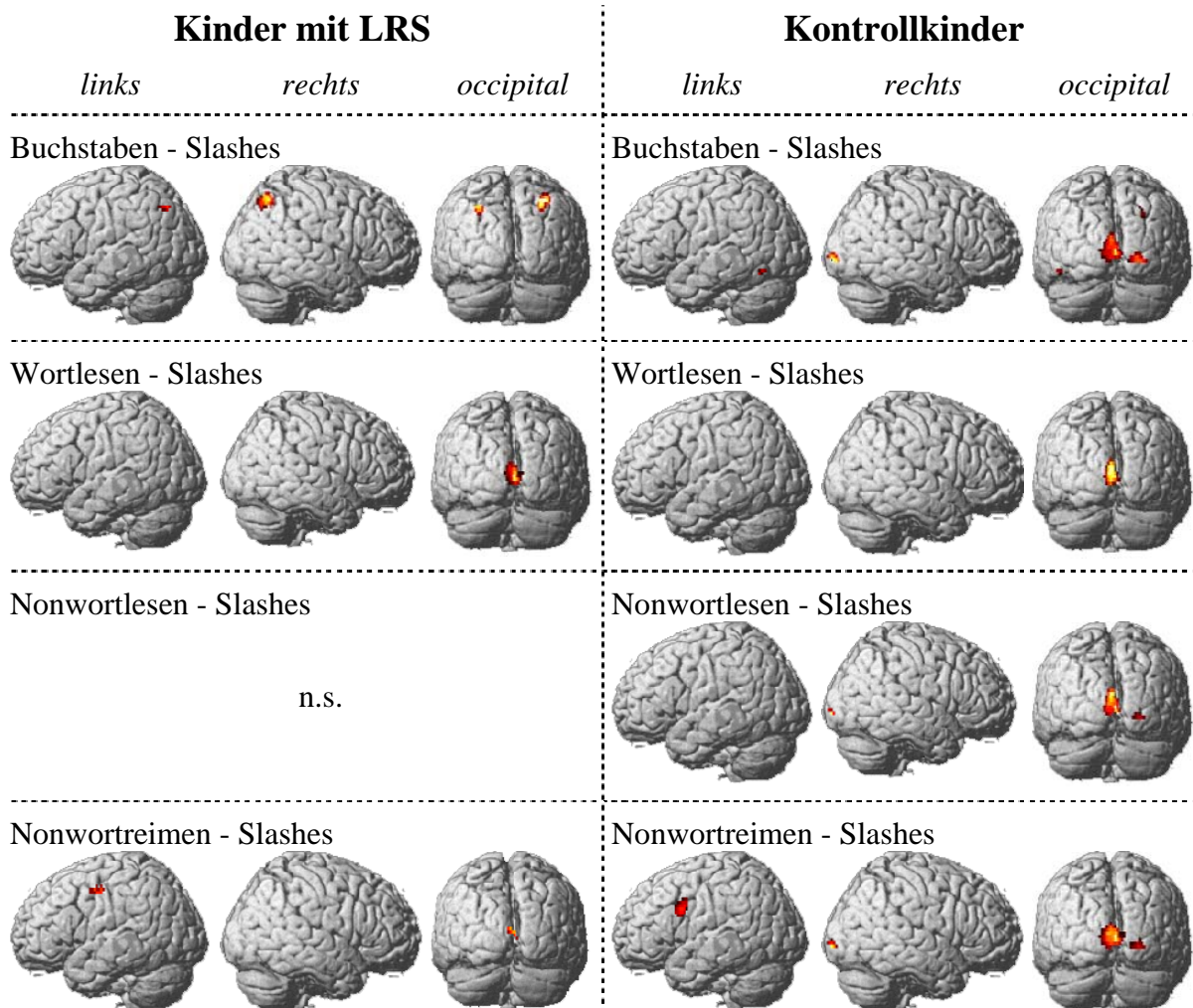
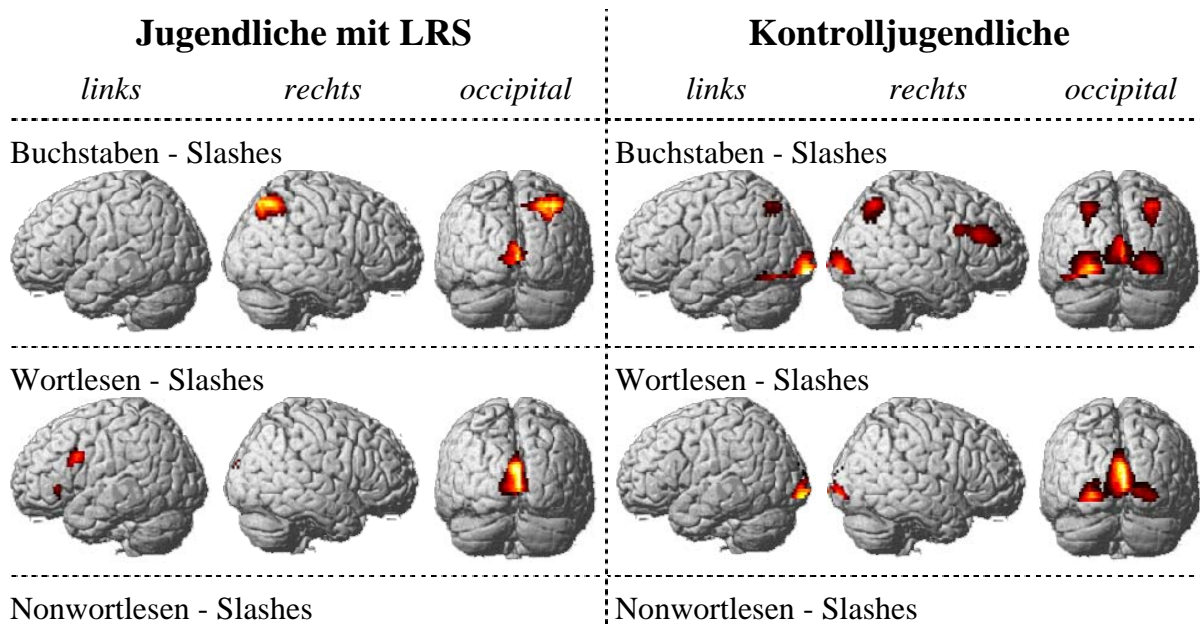
Innersubjekt-Design: NICHTGEL

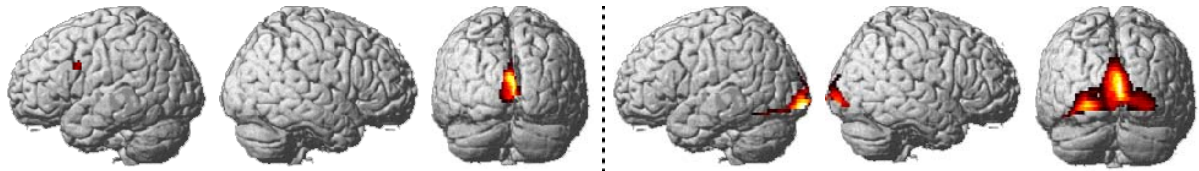
Tests der Zwischensubjekteffekte

Maß: MASS_1

Transformierte Variable: Mittel

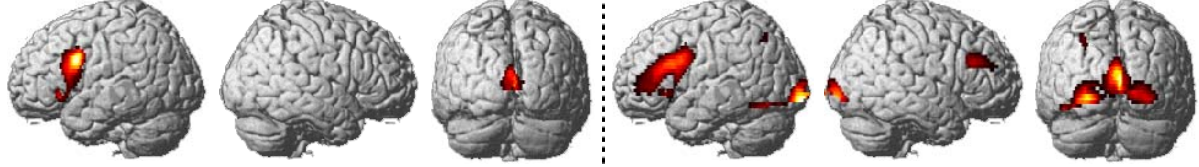
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	Eta-Quadrat
Intercept	482,354	1	482,354	97,325	,000	,432
ALTER_GR	182,475	2	91,238	18,409	,000	,223
LRS	121,133	1	121,133	24,441	,000	,160
ALTER_GR * LRS	43,501	2	21,751	4,389	,014	,064
Fehler	634,381	128	4,956			

Gruppenanalyse (Kinder)Gruppenanalyse (Jugendliche)



Nonwortreimen - Slashes

Nonwortreimen - Slashes



Gruppenanalyse (Erwachsene)

Erwachsene mit LRS

Kontrollerwachsene

links

rechts

occipital

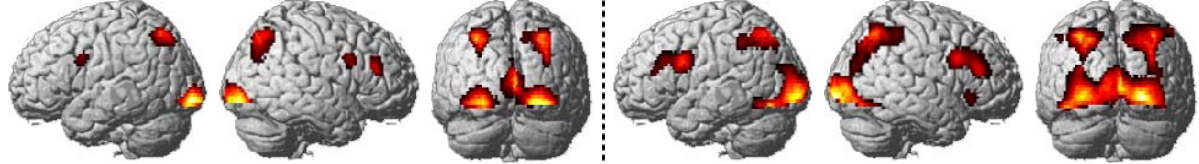
links

rechts

occipital

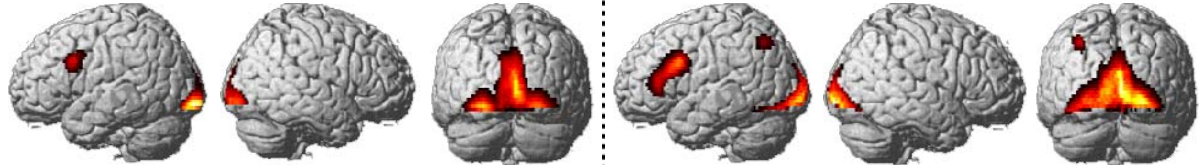
Buchstaben - Slashes

Buchstaben - Slashes



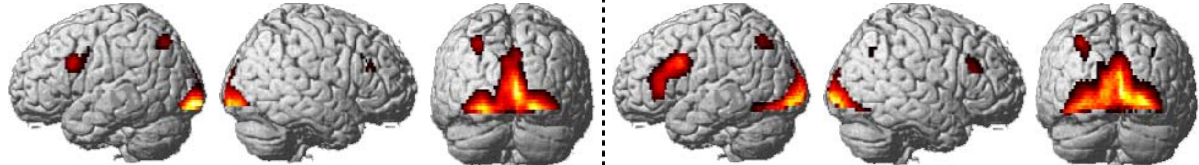
Wortlesen - Slashes

Wortlesen - Slashes



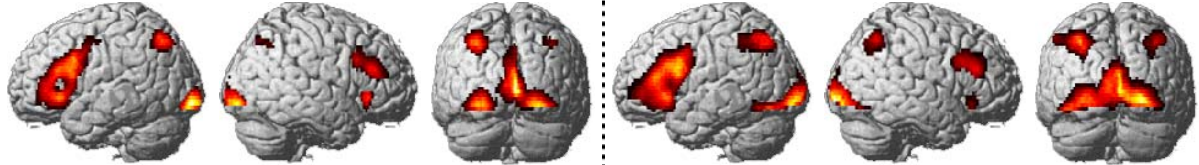
Nonwortlesen - Slashes

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
						46	Frontal, MFG	50	38	24	4.31
						9	Frontal, IFG	48	10	27	3.82
						10	Frontal, MFG	46	46	21	3.28
						8	Frontal, MeFG	4	18	45	3.54
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
						18	Occipital, Lingual Gyrus	8	-66	3	4.74
						18	Occipital, Lingual Gyrus	20	-100	-3	4.18
						18	Occipital, IOG	30	-92	-9	3.73
						18	Occipital, Cuneus	16	-104	6	2.61
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
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						
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						
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						
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
						43	Parietal, Postcentral G.	54	-18	18	2.78
8	Frontal, SFG	-4	26	48	3.08						
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
46	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