

Interventionseffekte auf phonologische Verarbeitung und kortikale Organisation bei Kindern mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung

Sabine Heim, Carsten Eulitz, Andreas Keil, Brigitte Rockstroh und Thomas Elbert

Kinder mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung (SSB) oder Dyslexie zeigen häufig Schwierigkeiten in der Wahrnehmung von Stoppkonsonant-Vokal-Silben wie beispielsweise /ba/, /da/ und /ga/. Elektrophysiologische Befunde sprechen für eine neuronale Verankerung dieser auf der Verhaltensebene beobachteten phonematischen Wahrnehmungsschwäche. Eine großangelegte amerikanische Therapiestudie mit sprachbeeinträchtigten und lese-rechtschreibschwachen Kindern konnte zeigen, dass ein Training mit akustisch modifiziertem Material rasch zu einer verbesserten phonologischen Verarbeitung führen kann. Bislang wurde jedoch nicht untersucht, wie sich Interventionseffekte auf die Gehirnprozesse auswirken, die diesen Fähigkeiten zugrunde liegen. Unter Anwendung einer konventionellen Fördermethode wurde in der vorliegenden Studie der Frage nachgegangen, inwieweit sich eine Verbesserung der Symptomatik sprachbeeinträchtigter Kinder in einer veränderten magnetischen Aktivität des auditorischen Kortex widerspiegelt.

Sieben sprachbeeinträchtigte Kinder mit Lese-Rechtschreibschwäche im Alter zwischen 10 und 12 Jahren nahmen am Fördertraining zum rhythmisch-syllabierenden Sprechen, Schreiben und Lesen nach Buschmann teil. Das Training erstreckte sich mit zwei Sitzungen pro Woche und zusätzlichen Hausaufgaben über einen Zeitraum von vier Wochen. Vor und nach dem Training wurden Leistungs- und kortikale Aktivierungsmaße – speziell das Mismatch Field (MMF) – erfasst. Die mittels Ganzkopf-Neuromagnetometer registrierte Gehirnaktivität wurde durch eine Oddball-Sequenz mit den Stoppkonsonant-Vokal-Silben [ba:] und [da:] ausgelöst.

Nach Abschluss des Fördertrainings wurden Verbesserungen im Lesen und Rechtschreiben sowie in Maßen der phonologischen Verarbeitung beobachtet. Die Fähigkeit zur aktiven Silbenidentifikation entlang eines [ba:]-[da:]-Kontinuums glich nach dem Training der von gleichaltrigen, sprachlich normal entwickelten Kindern ($n = 7$). Interessanterweise scheint sich das Training normalisierend auf die neuronale Phonemverarbeitung bei Kindern mit SSB ausgewirkt zu haben: Vor der Intervention zeigte sich ein dominantes MMF im auditorischen Kortex der rechten Hemisphäre, nach der Intervention hingegen eine ähnliche MMF-Topographie wie bei den sprachlich normal entwickelten Kindern. Die Ergebnisse dieser Studie lassen vermuten, dass ein Verhaltenstraining in einem therapeutischen Setting eine Veränderung in der kortikalen Organisation hervorzurufen vermag.

14.1 Einleitung

Eine verzögerte, abweichende oder fehlende Entwicklung der Sprache und des Sprechvermögens kann Folge einer peripheren Beeinträchtigung (z. B. Schwerhörigkeit, Fehlbildung des Vokaltraktes), einer neurologischen Erkrankung (z. B. Epilepsie), einer geistigen Behinderung oder einer tiefgreifenden Entwicklungsstörung (z. B. frühkindlicher Autismus) sein. Bei zirka 3 bis 10% aller Vorschulkinder werden Schwierigkeiten im Bereich der rezeptiven und/oder produktiven Sprache offensichtlich, die offenbar nicht auf eine dieser Bedingungen zurückzuführen sind (vgl. Leonard 1998). In solchen Fällen wird von einer spezifischen Störung der Sprachentwicklung

oder auch einer spezifischen Sprachbeeinträchtigung (SSB) gesprochen. Im Schulalter entwickeln Kinder mit SSB häufig Leserechtschreibprobleme, die den Symptomen einer Dyslexie bzw. Legasthenie ähneln.

Psychoakustische Untersuchungen haben gezeigt, dass viele Kinder mit SSB oder Dyslexie eine zumindest leichte Beeinträchtigung in der Wahrnehmung von Stoppkonsonanten wie beispielsweise /b/, /d/, /g/ und /k/ aufweisen (Tallal u. Piercy 1974; Brandt u. Rosen 1980; Godfrey et al. 1981; Tallal u. Stark 1982; Werker u. Tees 1987; Elliott u. Hammer 1988; Elliott et al. 1989; Reed 1989; Sussman 1993; Kraus et al. 1996; Stark u. Heinz 1996; Manis et al. 1997; Mody et al. 1997; Bradlow et al. 1999). Zum Studium der Sprachwahrnehmungsfähigkeiten bei Kindern wurden insbesondere drei experimentelle Aufgaben herangezogen. Beim ersten Aufgabentyp werden auditive Stimuli sukzessiv dargeboten, die von den Kindern zu diskriminieren sind bzw. deren Präsentationsabfolge wiedergegeben werden soll. In Bearbeitung dieser Aufgabe zeigen Kinder mit SSB oder Dyslexie eine schlechtere Leistung als ihre nicht sprachbeeinträchtigten Alterskameraden, wenn Stoppkonsonant-Vokal-Silben (hier /ba/ und /da/) als Stimulusmaterial dargeboten werden (Tallal u. Piercy 1974; Tallal u. Stark 1982; Reed 1989; Mody et al. 1997).

Der zweite Aufgabentyp beruht auf dem Paradigma der kategorialen Wahrnehmung. In einem kategorialen Wahrnehmungsexperiment hört der Proband ein Kontinuum von synthetischen Lauten, das sich in gleichen akustischen Stufen von einem Endpunkt-Stimulus (z. B. /da/) zu einem anderen (z. B. /ga/) erstreckt. Der Hörer soll die Stimuli entlang des Kontinuums einer der phonemischen Kategorien (hier /d/ und /g/) als zugehörig identifizieren und/oder paarweise dargebotene Laute als „gleich“ oder „verschieden“ klassifizieren. Eine abweichende kategoriale Wahrnehmung verschiedener Stoppkonsonanten-Kontinua wurde sowohl bei Kindern mit SSB als auch Kindern mit Dyslexie beobachtet. So waren diese Kinder weniger genau bei der Diskrimination von Lauten über

die Phonemkategorien hinweg und weniger konsistent bei der Identifikation von Lauten nahe der Kategoriengrenze als sprachlich auffällige Kontrollprobanden (Brandt u. Rosen 1980; Godfrey et al. 1981; Werker u. Tees 1987; Reed 1989; Sussman 1993; Manis et al. 1997). Dies legt nahe, dass Kinder mit SSB oder Dyslexie weniger exakt definierte phonetische Grenzen aufweisen als Kinder, die keine Schwierigkeiten in der gesprochenen und geschriebenen Sprache zeigen.

Synthetisch generierte Sprachkontinua sind auch Teil des dritten Aufgabentypus. Hier wird der kleinste akustische Unterschied zwischen zwei Lauten bestimmt, der gerade noch wahrgenommen werden kann. Studien mit dieser Aufgabenart zeigten, dass Kinder mit SSB erhöhte Diskriminationsschwellen aufweisen. So musste für die sprachbeeinträchtigten Kinder die akustische Distanz zwischen den Sprachlauten größer sein als bei Kontrollprobanden, um sie als zwei unterschiedliche Ereignisse wahrnehmen zu können (Elliott u. Hammer 1988; Elliott et al. 1989; Stark u. Heinz 1996). Ähnliche Ergebnisse wurden von Kraus et al. (1996) und Bradlow et al. (1999) bei normalbegabten Kindern mit Lernschwierigkeiten berichtet. Im Gruppenmittel zeigten diese Kinder unter anderem Probleme bei Tests zum auditiven Verständnis, Aufgaben zur Klangsynthese, sowie im Lesen und Rechtschreiben (Kraus et al. 1996).

Während Tallal und Kollegen vermuten, dass das Defizit in der Wahrnehmung von Stoppkonsonanten Folge einer beeinträchtigten Integration von kurzen und sich schnell verändernden Lauten ist (vgl. Tallal et al. 1993; Farmer u. Klein 1995), schreiben andere Autoren diese Problematik der spektralen Ähnlichkeit der Stoppkonsonanten zu (Mody et al. 1997; vgl. Studdert-Kennedy u. Mody 1995). Vertreter aus beiden theoretischen Richtungen brachten jedoch die akustische Differenzierungsschwäche bei SSB und Dyslexie mit gestörten oder unscharfen phonologischen Repräsentationen in Verbindung. Inadäquate Phonemrepräsentationen könnten wiederum zu Problemen beim Spracherwerb

und späteren Schwierigkeiten im Umgang mit den Phonem-Graphem-Korrespondenzregeln, die die Grundlage für müheloses Lesen und Rechtschreiben bieten, führen.

Verhaltensmaße wie die eben beschriebenen erfahren eine Einschränkung dadurch, dass sie Verarbeitungskomponenten höherer Ordnung, das heißt Aufmerksamkeits- und kognitive Faktoren, involvieren. Kraus et al. (1996) gingen der Frage nach, ob die Wahrnehmungsschwierigkeiten bei Kindern mit Lernproblemen (s. o.) von auf präattentiver Ebene angesiedelten abnormen neuronalen Repräsentationen akustischer Ereignisse herrühren oder auf Defizite in höheren Verarbeitungsstufen zurückgehen. Die Autoren bestimmten die elektroenzephalographische Mismatch Negativity (MMN). Die MMN ist eine negative Auslenkung im ereigniskorrelierten Differenzpotenzial (Kurve des devianten minus Kurve des Standardreizes, s. u.), die von selten auftretenden akustischen Veränderungen (devianter Reiz) innerhalb einer Sequenz gleichartiger (Standard-)Stimuli ausgelöst wird, unabhängig davon, ob ein Proband die devianten Stimuli beachtet oder nicht (vgl. Näätänen 1992). Kraus und Kollegen beobachteten, dass eine erhöhte Diskriminationschwelle, erfasst über ein /da/-/ga/-Kontinuum, von einer verminderten MMN auf die deviante Silbe /da/ im Strom der Standardsilben /ga/ begleitet ist. Die Autoren schlossen daraus, dass die phonematischen Diskriminationsdefizite wahrscheinlich ihren Ursprung in den auditorischen Bahnen haben und von präattentivem Charakter sind. Zu vergleichbaren Ergebnissen gelangte die Arbeitsgruppe um Kraus an einer größeren Stichprobe lernbeeinträchtigter sowie unauffälliger Kinder (Bradlow et al. 1999). Ähnlich berichteten Schulte-Körne et al. (1998) von einer verminderten Stärke der MMN auf den phonetischen Kontrast /ba/-/da/ bei Jungen mit Dyslexie relativ zu einer nicht lese-rechtschreibschwachen Kontrollgruppe.

In einer magnetenzephalographischen Untersuchung fanden Heim et al. (2000) eine Abweichung in der Organisation des auditorischen Kortex auf die Stimulation mit Stoppkonsonant-Vokal-Silben (hier [da] und [ga]).

Allerdings ist die funktionelle Gehirnarchitektur durch Lernen und Erfahrung modifizierbar (Elbert et al. 2001; Elbert u. Heim 2001). Die MMN und ihr magnetisches Äquivalent, das Mismatch Field (MMF), haben sich als brauchbare Instrumente zum Studium der neuronalen Plastizität und kortikalen Reorganisation erwiesen (Kraus et al. 1995; Tremblay et al. 1997; Näätänen et al. 1997; Cheour et al. 1998; Winkler et al. 1999; Menning et al. 2000; Kujala et al. 2001). In der Untersuchung von Kraus et al. (1995) wurden beispielsweise erwachsene Probanden über den Zeitraum von sechs Tagen einem Diskriminationstraining für gerade wahrnehmbare Varianten der Stoppkonsonant-Vokal-Silbe /da/ unterzogen. Das Verhaltenstraining resultierte in einem signifikanten Anstieg der Dauer und Größe der MMN. In einer verwandten Studie berichteten Tremblay et al. (1997), dass sich Veränderungen in der MMN infolge eines auditiven Trainings auch auf neue, nicht trainierte Sprachreize zeigen.

Merzenich und Tallal fanden, dass sich eine defizitäre phonologische Verarbeitung bei fünf- bis zehnjährigen Kindern mit sprachbezogenen Lernbeeinträchtigungen erheblich verbessern lässt (Merzenich et al. 1996; Tallal et al. 1996). Unter Berücksichtigung der Mechanismen neuronaler Plastizität sowie der ungenauen neuronalen Repräsentation von schnell aufeinanderfolgenden phonetischen Elementen („rapidly successive phonetic elements“, Merzenich et al. 1996, S. 77) konzipierten die Autoren ein computergestütztes Trainingsprogramm. Das Training erstreckte sich über einen Zeitraum von vier Wochen, innerhalb denen das Kind an fünf Tagen die Woche für jeweils ca. 100 Minuten pro Tag eine Übungseinheit absolvierte. Die schnellen transitorischen verbalen und nonverbalen Stimuli wurden anfangs „entwirrt“, indem sie in der Zeit verlängert und/oder in der Lautheit verstärkt wurden. Mit zunehmendem Fortschritt des Kindes wurden die akustisch modifizierten Stimuli in einer Weise präsentiert, die mehr und mehr der natürlichen Sprache ähnelte. Die Auswirkungen des Trainings auf neu-

rophysiologischer Ebene wurden von Temple et al. (2000) bei drei erwachsenen Personen mit Dyslexie mittels funktioneller Magnetresonanztomographie untersucht. Normallesende Erwachsene zeigten eine erhöhte Aktivität im linken präfrontalen Kortex auf sich schnell verändernde (relativ zu sich langsam verändernden) nonverbale akustische Reize. Vor dem Training wiesen die dyslektischen Leser keine differenzielle Antwort im linken Präfrontalkortex auf. Nach dem Training wurde bei zwei von drei Probanden mit Dyslexie eine erhöhte linksfrontale Aktivierung während der Darbietung von schnellen im Vergleich zu langsamen Stimuli beobachtet.

Die vorliegende Studie untersuchte die Auswirkungen eines konventionellen Lese-Rechtschreibtrainings auf behaviorale und neurophysiologische Parameter bei Kindern mit SSB. Das Training basiert auf der Methode des rhythmisch-syllabierenden Sprechens, Schreibens und Lesens nach Buschmann (1989, 1995; Hofmann 1998) und hat sich bei rechtschreibschwachen Grundschulkindern als wirksam erwiesen (Tacke et al. 1993). In einer Studie unserer Arbeitsgruppe (Schenk 2001) zeigten sich nach Anwendung des syllabierenden Trainings über einen Zeitraum von vier Wochen bei sprachbeeinträchtigten Kindern Verbesserungen in Lese-Rechtschreibtests im Vergleich zu einer Wartekontrollgruppe. In der vorliegenden Studie wurden mit dem Training einhergehende Veränderungen erfasst über

- ▶ eine Aufgabe zur kategorialen Wahrnehmung auf einem [ba:]-[da:]-Kontinuum,
- ▶ sprachgebundene psychometrische Tests (verbale Gedächtnisspanne/phonologisches Gedächtnis, Lesen/phonologische Dekodierung und Rechtschreibung/phonologische Enkodierung) und
- ▶ das neuromagnetische MMF. Von besonderem Interesse war die Frage, inwieweit sich eine Verbesserung der Symptomatik nach einer systematischen Intervention in einer veränderten magnetischen Gehirnaktivität widerspiegelt, was auf eine kortikale Reorganisation hindeutet.

14.2 Methoden

Trainingsgruppe

Die Trainingsgruppe setzte sich aus sieben sprachbeeinträchtigten Kindern mit Lese-Rechtschreibschwäche zusammen (mittleres Alter $11,61 \pm 0,71$ Jahre, 3 Mädchen). Die Kinder besuchten eine Förderschule und wurden vom Schulleiter und den Klassenlehrern für die Teilnahme an der Studie empfohlen. Die Selektionskriterien für die Aufnahme der Kinder in die Trainingsgruppe waren:

- ▶ ein Alter zwischen 9 und 12 Jahren
- ▶ Deutsch als Muttersprache
- ▶ Rechtshändigkeit
- ▶ ein nonverbaler Intelligenzquotient (IQ) > 85
- ▶ der Ausschluss von Schwerhörigkeit, zerebralen Läsionen oder chronischer Erkrankung
- ▶ eine nicht vorliegende Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung oder klinisch relevante affektive Störung

Wie aus den Schulakten hervorging, wurde die nonverbale Intelligenz häufig mit dem Cattell'schen Culture-fair-intelligence-Test (Weiss u. Osterland 1979; Weiss 1987) erfasst. Für die vorliegende Studie wurde der nonverbale IQ bei jedem Kind erneut mit den colored progressive matrices (CPM) von Raven (Schmidke et al. 1980) geschätzt. Der CPM-Test wurde aus Gründen der Praktikabilität (z. B. kurze Durchführungszeit, ansprechendes Aufgabenmaterial) gewählt. Die Intelligenzwerte der Kinder mit SSB waren $97,71 \pm 3,39$ vor und $99,29 \pm 3,09$ nach Durchführung des Trainings ($t_6 = -1,22$, $p > 0,05$, nicht signifikant). Die Händigkeit wurde über den Lateralisierungsquotient (LQ) des Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield 1971) operationalisiert. Kinder mit einem $LQ \geq +70$ galten als Rechtshänder.

Die Trainingsstudie wurde vom zuständigen Oberschulamt genehmigt. Die Erziehungsberechtigten der Kinder wurden über den Ablauf der Studie informiert, bevor sie ihr

Einverständnis zur Teilnahme in schriftlicher Form vorlegten.

Syllabierendes Training

Das Lese-Rechtschreibtraining erfolgte nach dem Prinzip des rhythmisch-syllabierenden Sprechens, Schreibens und Lesens von Buschmann (1989, 1995; Hofmann 1998). Das Rechtschreibtraining bestand aus drei Hauptelementen:

- ▶ Das Kind spricht während des Schreibens eines Wortes synchron mit.
- ▶ Das Mitsprechen erfolgt rhythmisch-syllabierend.
- ▶ Eingübt wird das syllabierende Sprechen, indem das Kind die Silben eines Wortes mit Armschwüngen der Schreibhand seitwärts-schreitend in Schreibrichtung begleitet. Das Lesetraining gestaltete sich ähnlich. Das syllabierende Sprechen war analog dem Rechtschreibtraining, allerdings malten die Kinder während des Lesevorgangs kleine umgekehrte Bögen unter die Silben.

Das Training wurde in Kleingruppen von zwei bis drei Kindern durchgeführt und erstreckte sich mit zwei Sitzungen (à 60 Minuten) pro Woche und zusätzlichen Hausaufgaben über einen Zeitraum von vier Wochen. Die Trainingssitzungen fanden während der Unterrichtszeiten statt. Nach jeder Sitzung erhielten die Kinder eine kleine Belohnung (Süßigkeiten oder Aufkleber). Eine genaue Beschreibung des Trainingsablaufs findet sich bei Heim (2002).

Parameter zur Erfassung des Trainings-Outcomes

Vor und nach Durchführung des syllabierenden Trainings wurden psychometrische, psychoakustische und magnetokortikale Maße erfasst. Jedes Kind wurde einzeln getestet. Die psychometrische Testung fand in der Schule statt, das psychoakustische Experiment und die MEG-Messung wurden im Labor der Universität Konstanz durchgeführt.

Psychometrische Tests: Die *Gedächtnisspanne für Ziffern* wurde mit der Vorwärts- und

Rückwärtsmethode bestimmt. Zu Beginn der Testung wurde den Kindern mitgeteilt, dass Ziffern zwischen 1 und 9, verpackt in unterschiedlich lange Sequenzen, im Ein-Sekunden-Rhythmus vorgesprochen werden. Die Kinder wurden dahingehend instruiert, genau zuzuhören und die Ziffern unmittelbar in entweder derselben (vorwärts) oder umgekehrten (rückwärts) Reihenfolge zu reproduzieren. Die Ziffernspannenprozedur vorwärts und rückwärts erfolgte gemäß eines adaptiven Staircase-Verfahrens (Cornsweet 1962; Bachelder u. Denny 1977). Einer korrekten Reproduktion einer Item-Sequenz folgte eine Erhöhung der Item-Länge, während eine falsche Antwort zu einer Verkürzung der Item-Länge führte. Im letzteren Fall wurde eine neue Sequenz der zuletzt erfolgreich bewältigten Item-Anzahl dargeboten. In der Vortestphase betrug die Start-Item-Länge zwei Ziffern; diese war kurz genug, um allen Kindern eine Aufgabenbewältigung zu ermöglichen. Nachdem ein Proband zwei falsche Antworten gab, begann der Haupttest. Der Haupttest bestand aus 10 Darbietungen (Durchgänge), ausgehend von der im Vortest zuletzt erfolgreich bewältigten Item-Länge. Die Ziffernspanne vorwärts und Ziffernspanne rückwärts errechneten sich jeweils aus dem Mittelwert der pro Durchgang dargebotenen Itemanzahl in der Haupttestphase. Dieses Verfahren hat sich als geeignet und darüber hinaus als effizient für die Schätzung der Gedächtnisspannen bei Kindern mit Lernstörungen erwiesen (Heim 1997).

Die *Lesefähigkeit* der Kinder wurde mit dem Zürcher Lesetest, ZLT (Linder u. Grissmann 1998) und einem nicht standardisierten Wortlesetest (Heim 2002) erfasst. Der ZLT erfordert das Lesen von sowohl einzelnen Wörtern (insgesamt 72 Items) als auch kurzen Textpassagen (3 Geschichten mit 261 Wörtern). Ein Lesefehler wurde kodiert, wenn das Kind ein Item falsch ausgesprochen, sich selbst korrigiert oder gar keine Antwort gegeben hat. Zur besseren Kontrolle wurden die Leseproben der Kinder auf einer Kassette aufgezeichnet.

Der nicht standardisierte Wortlesetest besteht ursprünglich aus 100 Wörtern und wurde

nach dem im angloamerikanischen Sprachraum eingesetzten Word Identification Test (Woodcock reading mastery tests revised, Woodcock 1987) konstruiert. Die Wörter unterscheiden sich im Grad der Vertrautheit, der Regularität sowie der Komplexität der Buchstaben und Silbenstruktur. Sie besitzen eine Länge von 2 bis 15 Buchstaben und sind nach dem Schwierigkeitsgrad angeordnet. Die Schreibweise der Wörter folgt der neuen deutschen Rechtschreibung, die seit dem 1. August 1998 in Kraft ist. Aufgrund zeitlicher Einschränkungen und um ein reliableres Trainingsmaß zu erhalten, wurde der Test mittels der Odd-even-Methode (Lienert 1989) in zwei Hälften (A und B) geteilt. Die Abfolge der beiden Testformen à 50 Wörter wurde über die Messzeitpunkte und Probanden gegenbalanciert (prä-A vs. post-B, prä-B vs. post-A). Die Antworten der Kinder wurden auf Band aufgezeichnet und gemäß folgendem Punktsystem kodiert: 0 = keine Antwort oder Fehler; 1 = Selbstkorrektur, 2 = teilweise/vollständige Wiederholung eines Wortes; 3 = korrekte Leseweise. Pro Testform konnten maximal 150 Punkte erzielt werden.

Zur Erfassung der *phonologischen Fertigkeiten* der Kinder wurden drei Testverfahren eingesetzt. Der Mottier-Test (Welte 1981) stellt ein Maß des phonologischen Gedächtnisses dar und erfordert die verbale Wiederholung von gesprochenen, zwei- bis sechsilbigen Pseudowörtern (d. h. arbiträre, aussprechbare Buchstabenkombinationen). Insgesamt wurden 30 Items dargeboten, was zu einem maximalen Gesamtscore von 30 Punkten führen konnte. Zur besseren Kontrolle wurde die Performanz der Kinder auf einer Kassette aufgezeichnet.

Die phonologische Dekodierfähigkeit (d. h. die Anwendung von Graphem-zu-Phonem-Korrespondenz-Regeln) wurde über einen nicht standardisierten Pseudowörter-Lesetest operationalisiert (Heim 2002). Der Test besteht ursprünglich aus 100 Pseudowörtern, die eine Länge von 2 bis 15 Buchstaben aufweisen. Die Pseudowörter wurden aus den Items des oben angeführten nicht standardisierten

Wortlesetests gebildet, wobei Buchstaben innerhalb oder zwischen den Wörtern permutiert wurden. Buchstabenkombinationen innerhalb der Pseudowörter wurden so konstruiert, dass sie keine deutschen Morpheme ergaben. Der Pseudowörter-Lesetest wurde gemäß der Methode, die beim Wortlesetest Anwendung fand, in zwei Hälften (A und B) geteilt. Die Abfolge der zwei 50-Item-Testformen wurde zwischen den Messzeitpunkten und Probanden gegenbalanciert (prä-A vs. post-B s. u.). Die Leseperformanz der Kinder wurde auf einer Kassette aufgezeichnet und analog dem Punktsystem des nicht standardisierten Wortlesetests ausgewertet. Die pro Testform erreichbare Maximalpunktzahl betrug 150.

Zur Einschätzung der phonologischen Enkodierfähigkeit (d. h. die Anwendung von Phonem-zu-Graphem-Korrespondenz-Regeln) wurden zwei vergleichbare lauttreue Diktattexte (A und B) eingesetzt (Findeisen u. Melenk 1991). Diktatform A handelte von der europäischen Rakete Ariane und umfasste 83 phonetisch regelmäßige Wörter. Form B beschrieb lange Flüge zwischen Europa und Amerika und bestand aus 85 phonetisch regelmäßigen Wörtern. Die Abfolge der zwei Testformen wurde über die Testzeitpunkte und Probanden gegenbalanciert (prä-A vs. post-B, prä-B vs. post-A). Bei der Bewertung der Diktatleistung blieben Groß- und Kleinschreibung unberücksichtigt.

Die Rechtschreibfertigkeiten wurden je nach Klassenstufe des Kindes mittels DRT4 oder DRT5 des Diagnostischen Rechtschreibtests (Grund et al. 1994, 1995) geprüft. Für jede Version existieren zwei Parallelformen (A und B), deren Abfolge zwischen den Testzeitpunkten und Probanden balanciert wurde (prä-A vs. post-B, prä-B vs. post-A). Der Test erfordert das Einsetzen von gesprochenen Wörtern in dafür vorgesehene Lücken eines Satzes. Insgesamt wurden 42 bzw. 51 Items niedergeschrieben, was zu Maximalpunktzahlen von 42 im DRT4 und 51 im DRT5 führte.

Psychoakustisches Experiment: Die Phonemrezeption der Kinder wurde mittels einer Aufgabe zur kategorialen Wahrnehmung von Stoppkonsonant-Vokal-Silben getestet. Hier-

zu wurde ein 10-Item-Kontinuum, das in gleichen Stufen von [ba:] nach [da:] variierte, mittels einer speziellen auf einem Klatt-Synthesizer (Klatt 1980) basierenden Software (Speechlab, Diesch 1997) konstruiert. Alle Silben wurden im Kaskadenmodus des Synthesizers mit einer Abtastrate von 10 kHz generiert. Die gesamte Stimulusdauer betrug 250 ms einschließlich einer Formantentransitionsperiode von 40 ms. Die Stimuli des Kontinuums bestanden aus drei Formanten (F1–F3) und unterschieden sich in den Anfangsfrequenzen der zweiten und dritten Formantentransition (FT). Die Endpunkte des Kontinuums wurden durch ideale Beispiele der Silben [ba:] und [da:] definiert. Die Anfangsfrequenzen der zweiten und dritten FT waren 1095 Hz und 2100 Hz für die Endpunktsilbe [ba:] und 1702 Hz und 2633 Hz für die Endpunktsilbe [da:]. Die stationären Formantenfrequenzen des Vokals [a:] waren jeweils 770, 1340 und 2400 Hz für F1, F2 und F3. Die Grundfrequenz der Silben betrug zu Anfang 128 Hz und fiel bis zum Ende des Stimulus linear auf 109 Hz ab. Die Amplitude der Stimmhaftigkeit war konstant bei 54 dB und reduzierte sich linear während der letzten 25-ms-Stimulusdauer auf 11 dB.

Die kategoriale Wahrnehmungsaufgabe wurde auf einem IBM-kompatiblen 486-Personal-Computer durchgeführt. Die Silben wurden beiden Ohren mit einem Schalldruckpegel von 72 dB über Kopfhörer zugespielt. Das Interstimulus-Intervall (definiert von Silbenende zu Silbenbeginn) betrug 1 Sekunde. Die Kinder wurden gebeten, 10 randomisierte Darbietungen eines jeden Stimulus (= 100 Durchgänge) als [ba:] oder [da:] zu klassifizieren, indem sie mit dem Zeigefinger der rechten Hand eine entsprechende Taste auf der Computer-Tastatur drückten (linke Cursor-Taste = [ba:], rechte Cursor-Taste = [da:]. Die Güte der Antworten wurde nicht rückgemeldet. Für jeden Probanden wurden die Identifikationsfunktionen f des [ba:]–[da:]–Kontinuums über die Nähe der zwei Funktionskurven vermittels des folgenden Algorithmus quantifiziert:

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (a_i - b_i)^2}$$

wobei i = Stimulusnummer entlang des Kontinuums

a_i = % Identifikation [ba:]

b_i = % Identifikation [da:]

MEG-Registration des MMF: Die neuronale Phonemverarbeitung wurde über die Registration der magnetischen Gehirnaktivität auf synthetische Silben untersucht. Die Auswahl der Silben basierte auf den Ergebnissen eines Experimentes zur kategorialen Wahrnehmung, das an nicht lese-rechtschreibschwachen Probanden durchgeführt wurde. Diese Probanden sollten Stimuli aus dem oben beschriebenen 10-Item-[ba:]–[da:]–Kontinuum identifizieren. Die mittleren Identifikationswerte für die Stimuli 5 und 8 des Kontinuums betragen 88% und 91% für Kinder ($n = 16$) und 96% und 91% für Erwachsene ($n = 17$). Die beiden Stimuli befanden sich nahe der Kategoriengrenze des Kontinuums und wurden als [ba:] bzw. [da:] bezeichnet. Die Startwerte der zweiten und dritten Formanten waren 1365 Hz und 2337 Hz für den Stimulus [ba:] und 1567 Hz und 2515 Hz für den Stimulus [da:]. (Zu Stimulusdauer und anderen Parametern, siehe Abschnitt Psychoakustisches Experiment). Varianten der Silben [ba:] und [da:] wurden gegenüber idealen Exemplaren bevorzugt, da jene anspruchsvoller sind und dadurch die ökologische Validität des Sprachmaterials erhöht wird.

Eine Serie von 650 Silben wurde binaural über ein ferromagnetisch neutrales und echo-freies Schallübertragungssystem zugeleitet. Die Dauer des Interstimulus-Intervalls (definiert von Stimulusbeginn zu Subbeginn) betrug konstant 1 Sekunde. Die Stimulusintensität lag 60 dB oberhalb der individuell bestimmten Hörschwelle. Es wurde ein passives Oddball-Paradigma angewendet, in welchem die Silbe [ba:] als Standardreiz (Auftrittswahrscheinlichkeit 80%) und die Silbe [da:] als devianter Reiz (Auftrittswahrscheinlichkeit 20%) diente.

Zur Kontrolle des Aktivierungsniveaus und Fixation der Aufmerksamkeit wurden den

Kindern Zeichentrick- oder Spielfilme ohne Ton auf einem nicht magnetischen Bildschirm präsentiert. Die Probanden saßen während der Messung mit dem Rücken angelehnt auf einer höhenverstellbaren Liege und wurden gebeten, sich so wenig wie möglich zu bewegen sowie exzessive Augenbewegungen zu vermeiden. Die Compliance der Probanden wurde über Videobeobachtung verifiziert.

Die MEG-Signale wurden in einer magnetisch abgeschirmten Kammer (Vacuum-schmelze GmbH, Hanau) vermittelt eines helmförmigen 148-Kanal-Ganzkopfneuro-magnetometers (MAGNES 2500™, 4D Neuroimaging, San Diego, CA, USA) aufgezeichnet.

Die durch die Silben ausgelösten Gehirnantworten wurden kontinuierlich mit einer Abtastrate von 508,63 Hz und einem Bandpass von 0,1–100 Hz registriert. Augenbewegungen wurden durch die Aufzeichnung des horizontalen und vertikalen Elektrookulogramms (EOG) überwacht. Im Offline-Modus wurden die magnetischen Signale zunächst hinsichtlich der magnetokardiographischen Aktivität durch einen linearen Regressionsalgorithmus korrigiert. Dann erfolgte eine Berechnung der gemittelten Wellenformen für die Standard- und devianten Silben über Epochen von 800 ms Länge (einschließlich 100 ms Grundlinie). Epochen mit MEG- oder EOG-Signalen von $> 3,5$ pT respektive 120 μ V gingen nicht in die weiteren Analysen ein. Die Grundlinie wurde für jeden Kanal gemäß des mittleren Wertes des Signals während der 100 ms vor Stimulusbeginn korrigiert. Danach wurden die evozierten Felder digital 20 Hz tiefpassgefiltert (12 dB/oct).

Zur Analyse des MMF wurden die gemittelten Antworten auf die Standardsilbe von denen auf die deviante Silbe subtrahiert. Die mittlere MMF-Amplitude, gemessen in den Root-mean-square-Differenzkurven (RMS-Differenzkurven), wurde in einem fixen Zeitfenster zwischen 150 und 300 ms nach Stimulusbeginn (Kraus et al. 1993) für jeweils 34 Kanäle über der perisylvischen Region der linken und rechten Hemisphäre berechnet.

Gruppe mit nicht sprachbeeinträchtigten Kindern

Die Gruppe der nicht sprachbeeinträchtigten Kinder bestand aus sieben Probanden mit normal ausgeprägten Lese-Rechtschreibfertigkeiten (mittleres Alter $10,83 \pm 1,13$ Jahre, 2 Mädchen). Alle Kinder sprachen Deutsch als Muttersprache. Ihr mittlerer nonverbaler IQ betrug $116,42 \pm 7,67$. Mit Ausnahme eines Probanden (LQ = -70 im Edinburgh handedness questionnaire) waren alle Rechtshänder. Die Probanden wurden mit Einkaufs- und/oder Kinogutscheinen für ihre Untersuchungsteilnahme belohnt. Das schriftliche Einverständnis zur Teilnahme wurde zu Beginn der Untersuchung von den Eltern eingeholt.

Verhaltensmaße: Es wurden dieselben Ziffernspannentests eingesetzt wie in der Trainingsgruppe. Zur Erfassung der Lesefertigkeiten wurden ebenfalls der ZLT und der nicht standardisierte Wortlesetest eingesetzt. Der Wortlesetest wurde in seiner Gesamtlänge (100 Wörter) dargeboten; insgesamt konnten 300 Punkte erreicht werden. Wie bereits bei der Trainingsgruppe wurden die phonologischen Fertigkeiten über den Mottier-Test und den nicht standardisierten Pseudowörter-Lesetest operationalisiert. Der Pseudowörter-Lesetest wurde in seiner ursprünglichen Länge präsentiert (100 Items, die eine maximale Leistung von 300 Punkten erlaubten). Ein lautreues Diktat war hier nicht eingeschlossen. Die Rechtschreibfertigkeiten wurden über die B-Formen des DRT 4 und 5 (siehe Trainingsgruppe) geschätzt; zwei nicht sprachbeeinträchtigte Kinder, welche die 6. Schulklasse besuchten, erhielten zur Bearbeitung den Westermann Rechtschreibtest, WRT6+ (Rathenow et al. 1981). Beim WRT6+ mussten 40 Sätze komplettiert werden, was in einem Maximalscore von 40 resultierte. Die kategoriale Wahrnehmungsaufgabe war dieselbe wie in der Trainingsgruppe.

MEG-Registrierung des MMF: Die magnetische Gehirnaktivität wurde mittels derselben [ba:]-[da:]-Silben sowie identischem experimentellen Paradigma und MEG-Gerät

untersucht wie zuvor beschrieben. Das MMF wurde für alle nicht sprachbeeinträchtigten Kinder mithilfe der gleichen Datenanalysetechnik bestimmt wie sie in der Trainingsgruppe Anwendung fand.

Statistische Analysen

Gruppenvergleiche wurden für die Prä- und Post-Trainingsmaße durchgeführt. Die Ziffernspannenwerte wurden einer univariaten Varianzanalyse (analysis of variance, ANOVA) mit Gruppe (Trainings- vs. nicht sprachbeeinträchtigte Gruppe) als Between-subjects-Faktor und Spannenmethode (vorwärts vs. rückwärts) als Within-subjects-Faktor unterzogen. Die im ZLT erzielten Werte beim Lesen von Wörtern und Textpassagen wurden mittels einer multivariaten ANOVA ($F = \text{Wilks' Lambda}$) getestet; die Gruppe bildete den Between-subjects-Faktor. Alle anderen Verhaltensvariablen wurden mit t -Tests für unabhängige Stichproben analysiert. Bei ungleichen Stichprobenvarianzen (Levene Test) wurden t -Tests mit getrennten Varianzschätzungen durchgeführt; adjustierte Freiheitsgrade und p -Werte werden berichtet. Die mittleren MMF-Amplituden wurden einer univariaten ANOVA mit Gruppe (Trainings- vs. nicht sprachbeeinträchtigte) als Between-subjects-Faktor und Hemisphäre (linke vs. rechte) als Within-subjects-Faktor unterzogen.

Prä- vs. Post-Trainingswerte wurden mithilfe von drei statistischen Modellen verglichen. t -Tests für abhängige Stichproben wurden mit Ausnahme der ZLT- und Gedächtnisspannenvariablen für alle Verhaltensdaten durchgeführt. Die Wort- und Textpassagenscores des ZLT wurden mittels einer unvollständigen multivariaten Messwiederholungs-ANOVA ($F = \text{Wilks' Lambda}$) mit Testzeitpunkt (Prä- vs. Post-Training) als Within-subjects-Faktor analysiert. Die Ziffernspannenwerte und die mittleren MMF-Amplituden wurden einer vollständigen multivariaten Messwiederholungs-ANOVA unterzogen, wobei Testzeitpunkt (Prä- vs. Post-Training) den einen und Span-

nenmethode (vorwärts vs. rückwärts) respektive Hemisphäre (linke vs. rechte) den anderen Within-subjects-Faktor darstellte.

Signifikante Interaktionseffekte ($p < 0,05$) wurden durch geplante Posthoc-Vergleiche analysiert. Die Daten werden in Form von Mittelwert \pm Standardfehler präsentiert.

14.3 Ergebnisse

Psychometrische Tests

Ziffernspanne: Abbildung 14-1 zeigt die Ziffernspanne vorwärts und rückwärts für die sprachbeeinträchtigten Kinder mit Leserechtschreibschwäche vor und nach dem Training sowie für die sprachlich unauffälligen Probanden. Eine ANOVA mit den Prä-Trainingstestwerten der sprachbeeinträchtigten

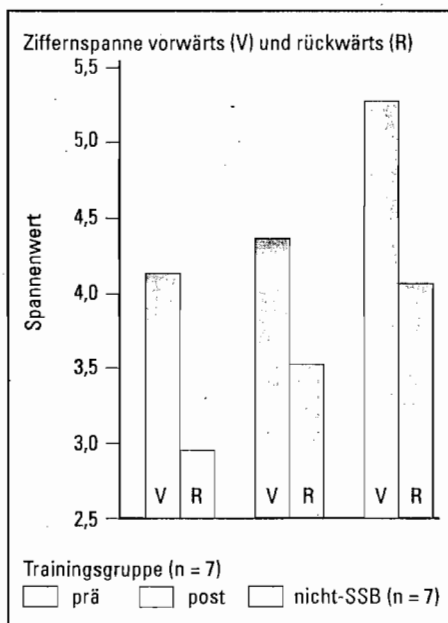


Abb. 14-1 Ziffernspanne vorwärts und rückwärts bei den Kindern mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung (SSB) vor und nach dem Training sowie der Gruppe sprachunauffälliger Kinder.

Kinder ergab signifikante Haupteffekte für die Faktoren Spannenmethode [$F(1,12) = 79,13$, $p < 0,001$] und Gruppe [$F(1,12) = 28,68$, $p < 0,001$]. Die Effekte zeigen, dass beide Probandengruppen eine bessere Performanz im Vorwärts- relativ zum Rückwärtsspannentest aufwiesen und die Ziffernspannen vorwärts und rückwärts signifikant niedriger in der Trainingsgruppe ($4,16 \pm 0,21$ und $2,94 \pm 0,13$) als in der Gruppe der sprachlich unauffälligen Kinder ($5,26 \pm 0,22$ und $4,07 \pm 0,12$) waren. Eine Messwiederholungs-ANOVA, durchgeführt mit den Scores der Trainingsgruppe, erzielte signifikante Haupteffekte für die Faktoren Testzeitpunkt [$F(1,6) = 12,41$, $p < 0,01$] und Spannenmethode [$F(1,6) = 59,27$, $p < 0,001$]. Ebenso ergab sich eine statistisch bedeutsame Interaktion von Testzeitpunkt und Spannenmethode [$F(1,6) = 10,99$, $p < 0,02$]. Geplante Posthoc-Vergleiche zeigten eine signifikante Zunahme in der Ziffernspanne rückwärts [mittlere Differenz = 0,59; $F(1,6) = 16,98$, $p < 0,006$; Post-Score = $3,53 \pm 0,22$], jedoch keine Veränderung in der Vorwärtsspanne nach Ende des Training (mittlere Differenz = 0,20; Post-Score = $4,36 \pm 0,25$). Die Rückwärtsspannenwerte zum Post-Trainingszeitpunkt lagen immer noch unter dem Gruppenmittel der sprachlich unauffälligen Kinder. So ergaben sich analog der Gruppenanalyse vor dem Training signifikante Haupteffekte für die Faktoren Gruppe [$F(1,12) = 7,48$, $p < 0,02$] und Spannenmethode [$F(1,12) = 57,52$, $p < 0,001$]; die Interaktion zwischen Gruppe und Spannenmethode verfehlte die statistische Signifikanzgrenze.

Lese- und Rechtschreibfertigkeiten: Abbildung 14-2 illustriert die Lese- und Rechtschreibfertigkeiten der Kinder mit SSB vor bzw. nach dem Training und der nicht sprachbeeinträchtigten Probanden. Um die statistischen Vergleiche über die abhängigen Variablen zu erleichtern, wurden die Testwerte in „Prozent Richtige“ ausgewiesen. Unabhängige t -Tests mit den Prä-Trainingswerten der sprachbeeinträchtigten Kinder erzielten einen signifikanten Unterschied im *nicht standardisierten Wortlesetest* ($57,71 \pm 7,22\%$) für die

Trainings- und $92,86 \pm 1,24\%$ für die unauffällige Gruppe; $t_{6,35} = -4,80$, $p < 0,003$). Statistisch bedeutsame Verbesserungen ($t_6 = -3,42$, $p < 0,01$) wurden zum Post-Trainingszeitpunkt beobachtet (Zunahme = $9,14\%$; Post-Testscore = $66,86 \pm 8,04\%$). Wie erwartet lag die Wortleseleistung nach Ende des Trainings immer noch unterhalb des normalen Gruppenmittels ($t_{6,28} = -3,19$, $p < 0,02$).

Die Prä-Testwerte der Trainingsgruppe beim Lesen von *Wörtern* ($71,03 \pm 7,17\%$) und *Textpassagen* ($70,55 \pm 6,43\%$) des ZLT waren signifikant niedriger als der Gruppenmittelwert der sprachlich unauffälligen Kinder [$96,83 \pm 0,99\%$ respektive $95,73 \pm 0,64\%$; $F(2,11) = 0,41$, $p < 0,008$]. Dieses Ergebnismuster hielt auch der Analyse der Post-Trainingsdaten stand [$79,76 \pm 7,27\%$ für Wörter und $79,31 \pm 5,51\%$ für Textpassagen; $F(2,11) = 0,47$, $p < 0,02$]. Allerdings zeigten die Kinder mit SSB statistisch bedeutsame Verbesserungen in beiden Untertests über die Messzeitpunkte hinweg [mittlere Differenz für Wörter und Textpassagen = $8,73\%$ respektive $8,76\%$; $F(2,5) = 0,12$, $p < 0,006$].

Unabhängige t -Tests erbrachten signifikante Unterschiede zwischen den Probandengruppen in der *Rechtschreibleistung* (DRT 4/5, WRT 6+). Die Testwerte der Kinder mit SSB beliefen sich auf $12,97 \pm 4,67\%$ vor und $30,62 \pm 6,00\%$ nach dem Training; der Mittelwert der nicht sprachbeeinträchtigten Gruppe betrug $81,60 \pm 3,41\%$ (prä: $t_{12} = -11,86$, $p < 0,001$; post: $t_{12} = -7,39$, $p < 0,001$). Auch in diesem Fertigungsbereich zeigten die Kinder mit SSB signifikante Verbesserungen nach Ende der Intervention (mittlere Differenz = $17,65\%$; $t_6 = -3,45$, $p < 0,01$).

Phonologische Fertigkeiten: Abbildung 14-3 zeigt die Performanz (Prozent Richtige) der sprachbeeinträchtigten Kinder vor und nach dem Training sowie die der unauffälligen Probanden in den Tests zur phonologischen Verarbeitung. Die Leistung der SSB-Gruppe beim *Nachsprechen von Pseudowörtern* (Mottier-Test) lag signifikant unterhalb des Gruppenmittelwertes der nicht sprachbeeinträchtigten Kinder ($89,52 \pm 1,69\%$) sowohl vor

Abb. 14-2 Lese-Rechtschreibleistungen (Prozent Richtige) der Kinder mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung (SSB) vor und nach dem Training sowie der Gruppe sprachunauffälliger Kinder. (ZLT = Zürcher Lesetest)

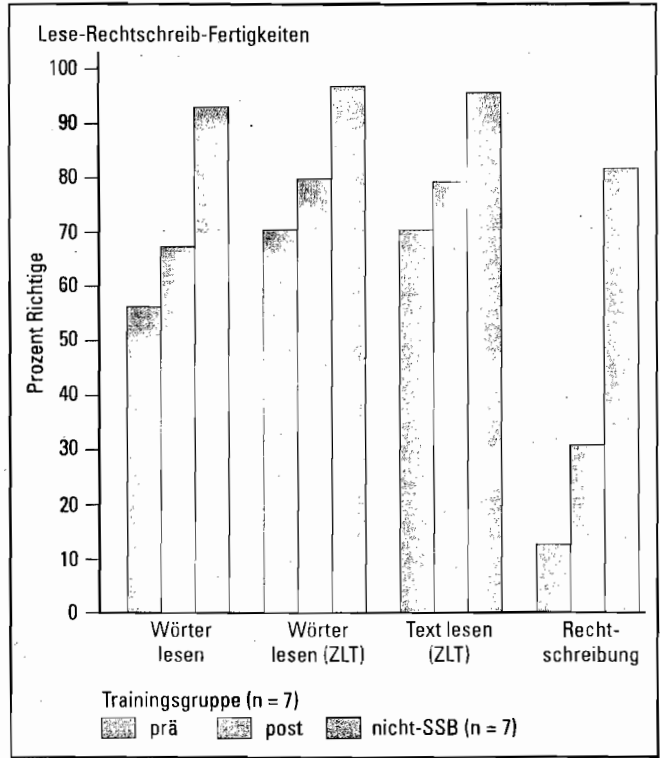
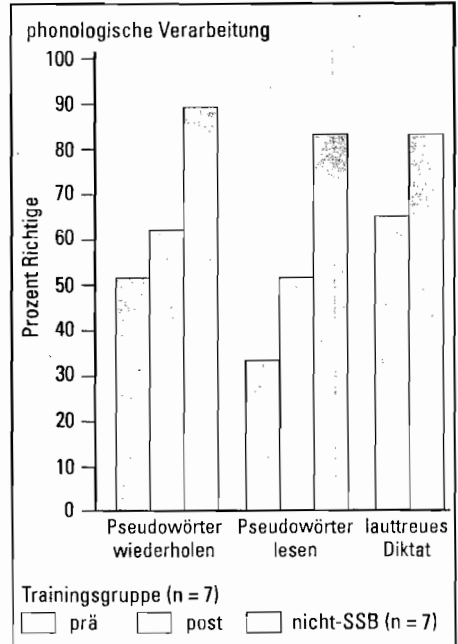


Abb. 14-3 Performanz in Tests zur phonologischen Verarbeitung (Prozent Richtige) bei Kindern mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung (SSB) vor und nach dem Training sowie bei nicht sprachbeeinträchtigten Kontrollprobanden.



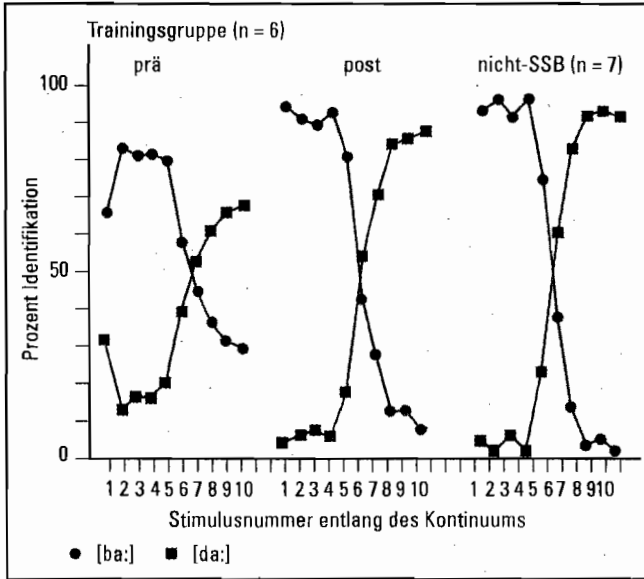


Abb. 14-4 Mittlere Identifikationsfunktionen für das [ba:]-[da:]-Kontinuum von Kindern mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung (SSB) vor und nach dem Training sowie von nicht sprachbeeinträchtigten Kontrollprobanden.

($51,90 \pm 3,91\%$; $t_{12} = -8,83$, $p < 0,001$) als auch nach Durchführung des Trainings ($62,38 \pm 5,02\%$; $t_{12} = -5,12$, $p < 0,001$). Jedoch konnten die sprachbeeinträchtigten Kinder nach dem Training signifikant mehr Pseudowörter korrekt nachsprechen als zuvor (mittlere Differenz = $10,48\%$; $t_6 = -4,96$, $p < 0,003$).

Die Kinder mit SSB erbrachten im *nicht standardisierten Pseudowörter-Lesetest* eine signifikant schlechtere Leistung als die unauffälligen Kinder ($84,19 \pm 2,49\%$) gleichfalls vor ($35,43 \pm 5,73\%$; $t_{8,20} = -7,81$, $p < 0,001$) und nach der Intervention ($52,29 \pm 7,98\%$; $t_{7,16} = -3,82$, $p < 0,006$). Allerdings wiesen die Kinder auch hier bedeutsame Fortschritte zum Post-Trainingszeitpunkt auf (mittlere Differenz = $16,86\%$; $t_6 = -3,40$, $p < 0,02$).

Der t -Test für abhängige Stichproben zeigte signifikante Verbesserungen im *lautreuen Diktat* über die Erhebungszeitpunkte hinweg. Die Werte der SSB-Gruppe vor und nach dem Training waren $65,34$ ($11,31\%$ respektive $83,36 \pm 8,59\%$) (mittlere Differenz = $18,02\%$; $t_6 = -5,87$, $p < 0,001$).

Kategoriale Wahrnehmungsaufgabe

Abbildung 14-4 zeigt die mittleren Identifikationsfunktionen des [ba:]-[da:]-Kontinuums für die Kinder mit SSB vor und nach dem Training sowie für die nicht sprachbeeinträchtigten Probanden. Die sprachlich unauffällige Gruppe identifizierte die Stimuli 1–5 als [ba:] und 7–10 als [da:] mit einer Genauigkeit von mindestens 76% . Stimulus 6 wurde in 39% aller Fälle als [ba:] und 61% aller Fälle als [da:] wahrgenommen. So deutete sich bei Stimulus 6 ein Übergang zur Kategorie [da:] an. Vor erfolgter Intervention identifizierten die Kinder mit SSB¹ die Silben signifikant weniger reliabel als die nicht sprachbeeinträchtigten Kinder, was durch die größere Nähe der beiden Identifikationsfunktionen offensichtlich wird ($f_{\text{SSB-prä}} = 18,59 \pm 2,28$ vs. $f_{\text{Nicht-SSB}} = 26,53 \pm 1,14$; $t_{11} = -3,26$, $p < 0,008$). Nach

1 Die Daten eines Jungen mit SSB gingen nicht in die Analysen der kategorialen Wahrnehmungsaufgabe ein, da er jeden Stimulus des [ba:]-[da:]-Kontinuums als [ba:] klassifizierte.

dem Training wiesen die mittleren Identifikationskurven eine räumlich größere Distanz zueinander auf, das heißt die SSB-Kinder waren nun signifikant genauer in ihrer Stimulusklassifikation ($f_{SSB\text{-post}} = 24,69 \pm 1,68$, $f_{SSB\ \Delta(\text{post} - \text{prä})} = 6,10$; $t_5 = -2,77$, $p < 0,04$). Darüber hinaus näherten sich die Post-Training-Identifikationsfunktionen dem normalen kategorialen Wahrnehmungsmuster an. Die sprachbeeinträchtigten Kinder identifizierten die Stimuli 1–5 als [ba:] und 7–10 als [da:] mit einer Genauigkeit von mindestens 72%. Stimulus 6 wurde nahe dem Zufallsniveau identifiziert und bildete daher die Kategoriengrenze.

Magnetenzephalographische Daten: das Mismatch Field

Abbildung 14-5A zeigt die gemittelten magnetokortikalen Antworten auf die Standard- und devianten Silben bei einem Kind mit SSB vor bzw. nach dem Training und einem sprachlich unauffälligen Probanden in anterioren und posterioren Kanälen der linken und rechten Hemisphäre. Die Auswahl der Kanäle pro Hemisphäre basiert auf dem maximalen aus- und eintretenden magnetischen Feld um 260 ms nach Stimulusbeginn. Wie aus Abbildung 14-5A ersichtlich wird, ist die Differenz zwischen devianten und Standardantworten im Latenzbereich 150–300 ms größer in der rechten als in der linken Hemisphäre bei dem Probanden mit SSB zum Prä-Trainingszeitpunkt. Nach dem Training ähnelt das Aktivitätsmuster dem des sprachlich unauffälligen Probanden, das heißt, die entsprechende Differenz ist größer in der linken als in der rechten Hemisphäre. Abbildung 14-5B zeigt das Sensor Layout (148 Kanäle) für die Differenzkurven bei dem Probanden mit SSB vor erfolgter Intervention. Die Differenzkurven im Latenzbereich des MMF (150–300 ms) sind in der rechten Hemisphäre ausgeprägter als in der linken. Abbildung 14-5C illustriert die Isokontur-Feldlinien der Differenzkurve bei ihrem Maximum um 260 ms. Die Quelle des MMF in jeder Hemisphäre ist nach oben orientiert,

was auf eine positive Polarität des MMF hinweist.²

Abbildung 14-6 stellt die mittlere Amplitude des MMF (RMS-Werte) in den beiden Hemisphären für die Kinder mit SSB vor und nach dem Training sowie für die nicht sprachbeeinträchtigten Kinder graphisch dar. Eine ANOVA mit den RMS-Werten der lese-rechtschreibschwachen Kinder zum Prä-Trainingszeitpunkt ergab eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Gruppe und Hemisphäre [$F(1,12) = 17,24$, $p < 0,001$]. Kontrastanalysen zeigten, dass in der unauffälligen Probandengruppe das MMF über der linken Hemisphäre ($61,39 \pm 9,18$ fT) signifikant größer war als über der rechten [$43,90 \pm 6,64$ fT; $F(1,12) = 12,95$, $p < 0,004$]. Innerhalb der SSB-Gruppe war die Mismatch-Aktivität hingegen signifikant stärker in der rechten als in der linken Hemisphäre [$66,06 \pm 8,56$ fT; $F(1,12) = 5,17$, $p < 0,04$], während die links-hemisphärische MMF-Amplitude ($55,01 \pm 6,23$ fT) derjenigen nicht sprachbeeinträchtigter Kindern ähnelte.

Wie in Abbildung 14-6 erkennbar, war bei den SSB-Kindern nach Abschluss des Trainings das rechtshemisphärische MMF vermindert [Messzeitpunkt \times Hemisphäre $F(1,6) = 5,96$, $p = 0,05$]. Eine ANOVA mit den Post-Testwerten der Trainingsgruppe erbrachte lediglich einen Haupteffekt für den Faktor Hemisphäre [$F(1,12) = 11,78$, $p < 0,005$]. Dies impliziert, dass die sprachbeeinträchtigte Gruppe nach der Intervention ein linkslateralisiertes MMF-Muster aufwies ($55,25 \pm 3,75$ fT in der linken vs. $44,54 \pm 4,94$ fT in der rechten Hemisphäre), das sich nicht statistisch von der Topographie der Gruppe sprachunauffälliger Kinder unterschied.

² Diese Polarität ist der des elektrischen Äquivalents MMN entgegengesetzt. Allerdings haben auch andere Autoren von evozierten Gehirnantworten bei Kindern berichtet, die eine positive Differenz reflektieren (z. B. Leppänen et al. 1999; Pihko et al. 1999).

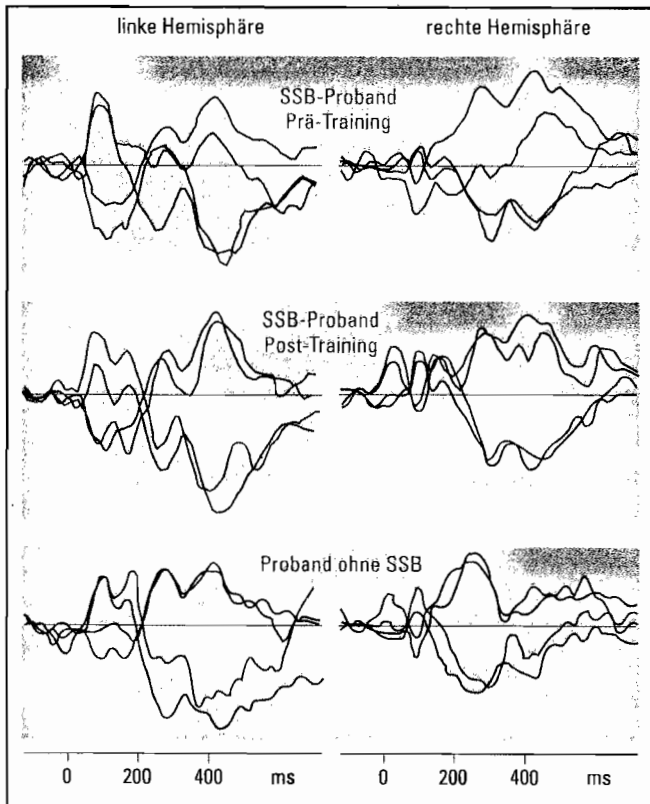


Abb. 14-5 A: Gemittelte magnetokortikale Antworten auf die Standard- (schwarze Kurven) und devianten Silben (farbige Kurven) bei einem Kind mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung (SSB) vor (oben) bzw. nach dem Training (Mitte) und einem sprachlich unauffälligen Probanden (unten) in anterioren und posterioren Kanälen der linken und rechten Hemisphäre. Man beachte, dass zum Prä-Trainingszeitpunkt beim Probanden mit SSB die Differenz zwischen devianten und Standardantworten im Latenzbereich 150–300 ms größer ist in der rechten als in der linken Hemisphäre. Nach dem Training ähnelt das Aktivitätsmuster dem des sprachlich unauffälligen Probanden, das heißt die entsprechende Differenz ist größer in der linken als in der rechten Hemisphäre.

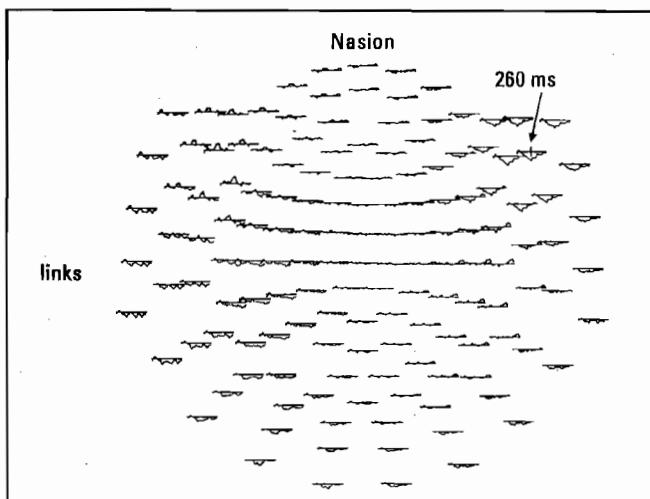


Abb. 14-5 B: Zweidimensionale Ganzkopf-Ansicht der Differenzkurven (= deviante minus Standardantworten) bei dem Probanden mit SSB vor erfolgter Intervention. Die Wellenformen sind von –100 vor bis 500 ms nach Stimulusbeginn dargestellt. Eintretender Magnetfluss zeigt nach unten, auswärtsgehender nach oben. Die Differenzkurven sind in der rechten Hemisphäre ausgeprägter als in der linken. Der kleine vertikale Balken verweist auf das Maximum der Differenzkurve, das MMF, um 260 ms in einem der rechten anterioren Kanäle.

Abb. 14-5 C: Feldverteilung über der linken und rechten Hemisphäre zur Peak-Latenz der Differenzkurve. Die durchgehenden Isokonturlinien stellen das austretende und die gestrichelten Linien das eintretende Magnetfeld dar. Der Abstand der Konturlinien beträgt 10 fT. A1–A148 bezeichnen die Kanalnummern. Gemäß der Rechten-Hand-Regel ist die Quelle des MMF in jeder Hemisphäre nach oben orientiert, was auf eine positive Polarität hinweist.

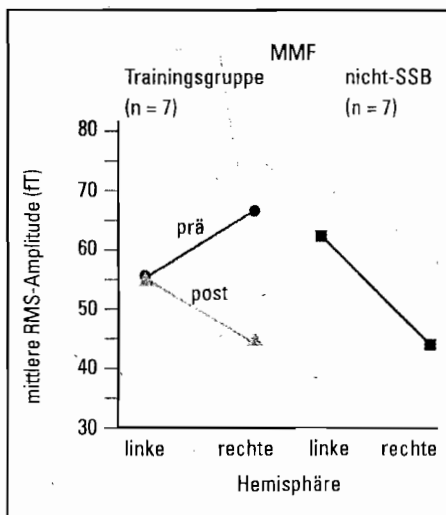
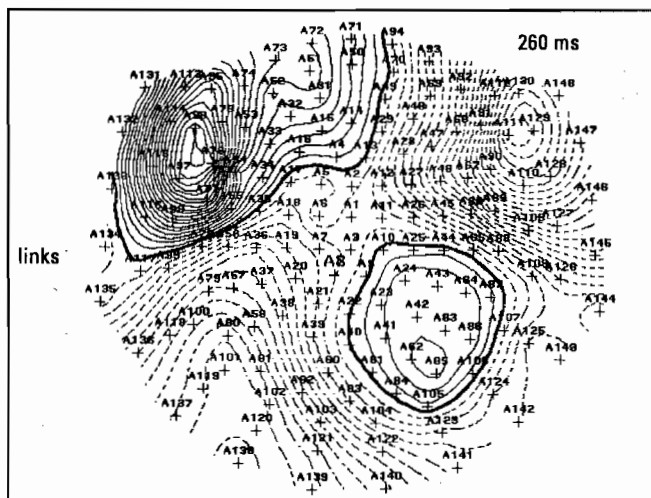


Abb. 14-6 Mittlere Amplitude des MMF (RMS-Werte), gemessen über der linken und rechten Hemisphäre bei Kindern mit spezifischer Sprachbeeinträchtigung (SSB) vor bzw. nach dem Training und einer Gruppe sprachunfähiger Kinder.

14.4 Diskussion

Die vorliegende Studie untersuchte die Veränderungen in der Symptomatik sprachbeeinträchtigter Kinder mit Lese-Rechtschreibschwäche nach Durchführung eines vierwöchigen (achtstägigen) Trainings zum rhythmisch-syllabierenden Sprechen, Schreiben und Lesen. Mit dem Training einhergehende Veränderungen wurden durch sprachbezogene psychometrische Tests, eine kategoriale Wahrnehmungsaufgabe sowie das neuromagnetische MMF erfasst. Die vor und nach dem Training erhobenen Leistungsparameter der Kinder mit SSB wurden mit den Daten von Kindern verglichen, die keine Schwierigkeiten in der gesprochenen und geschriebenen Sprache aufwiesen.

Ein wichtiges Ergebnis stellen bedeutsame Verbesserungen in Lese-Rechtschreibtests sowie Tests zur phonologischen Verarbeitung dar, die in der Trainingsgruppe beobachtet werden konnten. Die Hauptveränderungen (im Durchschnitt 17,5%) wurden in Parametern der Rechtschreibung im Allgemeinen und phonologischen Aufgaben im Besonderen verzeichnet – das heißt in Fertigkeitenbereichen, auf die das rhythmisch-syllabierende Training

speziell ausgerichtet ist. Diese Ergebnisse sind im Einklang mit Befunden, die in Studien mit einem Behandlungs- vs. Wartelistengruppendedesign berichtet wurden (Takke et al. 1993; Schenk 2001).

Bezüglich der verbalen Gedächtnisspanne ergab sich lediglich in der Rückwärtsbedingung eine signifikante Verbesserung nach erfolgter Intervention. Eine Studie bei Kindern mit Lernproblemen (Heim 1997) hat gezeigt, dass die Rückwärtsreproduktion von Ziffern weniger stabil ist als die Vorwärtsreproduktion. So sind die größeren Ziffernspannen rückwärts nach im Vergleich zu vor dem Training möglicherweise auf einen Vertrautheitseffekt zurückzuführen.

Angesichts des kurzen Interventionszeitraumes und dem Schweregrad der Störung verwundert es nicht, dass alle Post-Testwerte in den sprachgebundenen psychometrischen Maßen unterhalb des Gruppenmittels der sprachlich unauffälligen Kinder blieben. Ähnlich der Studie zum syllabierenden Training bei sprachbeeinträchtigten Kindern von Schenk (2001) wurden hier keine Verbesserungen im nonverbalen IQ beobachtet, was eher auf spezifische Effekte des Trainings als auf sprachgebundene Fertigkeiten hindeutet.

Wie von verschiedenen Autoren berichtet wurde, tendieren Kinder mit SSB oder Dyslexie zu einer anomalen kategorialen Wahrnehmung von Stoppkonsonanten (Brandt u. Rosen 1980; Godfrey et al. 1981; Werker u. Tees 1987; Reed 1989; Sussman 1993; Manis et al. 1997). Vergleichbare Evidenz wurde in der vorliegenden Studie vor erfolgter Intervention erzielt. So waren die Kinder mit SSB signifikant weniger akkurat in ihrer Zuordnung der Silben zu den phonetischen Kategorien [b] und [d] als die Gruppe der sprachunauffälligen Kinder. Hingegen waren nach Abschluss des Trainings die Identifikationsfunktionen der Kinder mit SSB nicht mehr verschieden von denen der nicht sprachbeeinträchtigten Vergleichsgruppe. Dieses Ergebnis könnte drei Faktoren zugeschrieben werden:

- ▶ dem Training spezifischer Fertigkeiten,
- ▶ unspezifischen Aspekten wie beispielswei-

se dem Involviertsein in ein aktives Interventionsprogramm oder dem Erhalt individueller Aufmerksamkeit durch die Versuchsleiterin oder

- ▶ der zunehmenden Vertrautheit mit der Aufgabe.

In Anbetracht der systematischen Veränderung in Richtung eines normalen kategorialen Wahrnehmungsmusters scheint es weniger wahrscheinlich, dass die beobachteten Verbesserungen nur durch den Vertrautheitsfaktor bedingt wurden. Allerdings kann die Möglichkeit, dass das Beschäftigtsein der Kinder oder das Erfahren von vermehrter Aufmerksamkeit durch Drittpersonen die Behandlungseffekte hervorgerufen hat, nicht völlig ausgeschlossen werden. Die Verbesserungen in sprachbezogenen psychometrischen Tests unter gleichzeitiger Stabilität des nonverbalen IQ deuten auf einen spezifischen Einfluss hin, der jedoch einer kontrollierten Überprüfung durch den Vergleich von Effekten alternativer Trainingsmethoden bedarf.

Unser Hauptinteresse galt der Untersuchung, ob sich eine verbesserte Performanz in verschiedenen Verhaltensparametern in einer Veränderung der magnetischen Gehirnaktivität, erfasst über das MMF auf Stoppkonsonant-Vokal-Silben, widerspiegelt. Die Gruppe der sprachunauffälligen Kinder zeigte ein dominantes MMF im auditorischen Kortex der linken Hemisphäre. Eine größere Mismatch-Aktivität über der linken relativ zur rechten Hemisphäre wurde auch bei gesunden erwachsenen Probanden nach Stimulation mit Phonemen aus der Muttersprache (Näätänen et al. 1997) sowie mit kreuzkategorialen Phonemen (Sharma u. Kraus 1995) beobachtet. Vor dem Training wiesen die Kinder mit SSB eine stärkere Mismatch-Antwort zugunsten der rechten Hemisphäre auf, während das linkshemisphärische MMF dem der nicht sprachbeeinträchtigten Probanden entsprach. Nach dem Training unterschied sich die SSB-Gruppe nicht von den sprachlich normal entwickelten Kindern in der Größe des rechtshemisphärischen MMF, was in einem ähnlich linkslate-

ralisierten Mismatch-Aktivitätsmuster resultierte. Die Kinder mit SSB zeigten also zum Prä-Trainingszeitpunkt eine funktionelle Abweichung in der rechten Hemisphäre, die sich zum Post-Trainingszeitpunkt normalisiert zu haben scheint. Da keine Wiederholungsmessung bei der unauffälligen Vergleichsgruppe durchgeführt wurde, könnte der Einwand erhoben werden, dass die Veränderung in der MMF-Topographie natürliche Variationen reflektiert. In der Tat berichteten Uwer und von Suchodoletz (2000) von einer nur moderaten Stabilität der elektroenzephalographischen MMN auf Stoppkonsonant-Vokal-Silben bei gesunden Schulkindern. Allerdings scheint es unwahrscheinlich, dass dies nur für das MMF der rechten Hemisphäre zutrifft. Des weiteren sollte sich eine Instabilität des MMF nicht in einer Verschiebung in Richtung Normalität äußern, und das ist genau das, was mit dem MMF-Aktivitätsmuster der SSB-Gruppe geschehen ist. Ob die Veränderung in der Topographie stabil ist oder nur ein vorübergehendes Phänomen darstellt, muss in katamnesticen Untersuchungen überprüft werden.

Die Leistungsprofile in der kategorialen Wahrnehmungsaufgabe über die beiden Testzeitpunkte hinweg geben Anlass zur Spekulation, dass eine größere MMF-Amplitude über der rechten im Vergleich zur linken Hemisphäre mit einer wenig reliablen Identifikation von Stoppkonsonanten-Stimuli einhergeht, wohingegen eine relativ verminderte rechts-hemisphärische MMF-Amplitude eine adäquate Phonemidentifikation ermöglicht. Möglicherweise könnte eine Veränderung des MMF-Aktivitätsmusters assoziiert sein mit einem verbesserten Ablauf derjenigen kognitiven Prozesse, die beim Lesen und Rechtschreiben involviert sind. Unterstützende Evidenz, dass schwache Lese-Rechtschreibleistungen mit einer atypischen Organisation in der rechten Hemisphäre assoziiert sind, werden von zwei MEG-Studien nahegelegt (Heim et al. 2000, 2001). Dort wurde gefunden, dass die rechts-hemisphärischen Quellen der magnetischen Antworten auf die Silbe [ba:] 100 ms nach Stimulusbeginn bei Personen mit Dyslexie weiter

posterior lokalisiert sind als bei einer unauffälligen Kontrollgruppe. Derartige Gruppenunterschiede wurden nicht in der linken Hemisphäre beobachtet.

Nach unserem Wissensstand ist dies die erste Studie, die Veränderungen in der magnetischen Gehirnaktivität in Folge eines Lese-Rechtschreibtrainings bei Kindern mit SSB untersucht hat. Die Untersuchung von Auswirkungen eines Interventionsprogramms auf die Hirnprozesse wird uns in unserem Verständnis über die neuralen Mechanismen, die sprachbezogenen Lernstörungen unterliegen, einen beträchtlichen Schritt vorwärts bringen. Es sind weitere Studien mit größeren Gruppen von Kindern, alternativen Behandlungsverfahren und katamnesticen Untersuchungen nötig, um die Bedeutsamkeit der vorliegenden Ergebnisse abzuschätzen und genauere Aussagen über das Zusammenspiel von Gehirn- und Verhaltensmaßen der SSB treffen zu können.

Danksagung

Die Autoren möchten dem Schullektor und den Klassenlehrern einer Förderschule in Baden-Württemberg für ihre Unterstützung während der Datenerhebung für diese Studie danken. Großer Dank gebührt den Kindern für Ihre Teilnahme an der Untersuchung sowie den Eltern für ihre Zusammenarbeit. Die vorliegende Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und die Volkswagen-Stiftung unterstützt.

Literatur

- Bachelder BL, Denny MR. A theory of intelligence: I. Span and the complexity of stimulus control. *Intelligence* 1977; 1: 127–50.
- Brandt J, Rosen JJ. Auditory phonemic perception in dyslexia: Categorical identification and discrimination of stop consonants. *Brain Lang* 1980; 9: 324–37.
- Bradlow AR, Kraus N, Nicol TG, McGee TJ, Cunningham J, Zecker SG, Carrell TD. Effects of

- lengthened formant transition duration on discrimination and neural representation of synthetic CV syllables by normal and learning-disabled children. *J Acoust Soc Am* 1999; 106: 2086–96.
- Buschmann H. Dynamisch-integrative Förderung von Sprechen, Schreiben, Lesen. Waldshut: unveröffentl. Manuskript 1989.
- Buschmann H. Dynamisches Rechtschreiben und Aufbautraining. Waldshut: unveröffentl. Manuskript 1995.
- Cheour M, _eponien_ R, Lehtokoski A, Luuk A, Allik J, Alho K, Näätänen R. Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nat Neurosci* 1998; 1: 351–3.
- Cornsweet TN. The staircase-method in psychophysics. *Am J Psychol* 1962; 75: 485–91.
- Diesch E. *SpeechLab: PC Software for digital speech signal processing*. *Behav Res Methods Instrum Comput* 1997; 29: 302.
- Elbert T, Heim S. Cortical reorganization: A light and a dark side. *Nature* 2001; 411: 139.
- Elbert T, Heim S, Rockstroh B. Neural plasticity and development. In: Nelson C, Luciana M (eds). *Handbook of developmental cognitive neuroscience*. Cambridge, MA: MIT Press 2001; 191–202.
- Elliott LL, Hammer MA. Longitudinal changes in auditory discrimination in normal children and children with language learning problems. *J Speech Hear Disord* 1988; 53: 467–74.
- Elliott LL, Hammer MA, Scholl ME. Fine-grained auditory discrimination in normal children and children with language-learning problems. *J Speech Hear Res* 1989; 32: 112–9.
- Farmer ME, Klein RM. The evidence for a temporal processing deficit linked to dyslexia: A review. *Psychon Bull Rev* 1995; 2: 460–93.
- Findeisen U., Melenk G. *Lauttreue Diktate für die 1. bis 5. Klasse*. Bochum: Dr. Winkler 1991.
- Godfrey JJ, Syrdal-Lasky AK, Millay KK, Knox CM. Performance of dyslexic children on speech perception tests. *J Exp Child Psychol* 1981; 32: 401–24.
- Grund M, Haug G, Naumann CL. *Diagnostischer Rechtschreibtest für 4. Klassen (DRT 4)*. Weinheim: Beltz 1994.
- Grund M, Haug G, Naumann CL. *Diagnostischer Rechtschreibtest für 5. Klassen (DRT 5)*. Weinheim: Beltz 1995.
- Heim S. *Der Zusammenhang zwischen Aufgabenkomplexität und Gedächtnisspanne bei lernbehinderten Kindern*. Diplomarbeit, Konstanz 1997.
- Heim S. *Auditory processing in dyslexia: Evidence from psychophysical studies and event-related magnetic fields*. Dissertation, Konstanz 2002.
- Heim S, Eulitz C, Elbert T. Altered hemispheric asymmetry of functional auditory organization in children and adolescents with dyslexia. *Psychophysiology* 2001; 38 (suppl. 1): 49.
- Heim S, Eulitz C, Kaufmann J, Füchter I, Pantev C, Lamprecht-Dinnesen A, Matulat P, Scheer P, Borschel M, Elbert T. Atypical organisation of the auditory cortex in dyslexia as revealed by MEG. *Neuropsychologia* 2000; 38: 1749–59.
- Heim S, Kissler J, Elbert T, Rockstroh B. Altered hemispheric asymmetry of auditory M100 in schizophrenia and dyslexia. *Psychophysiology* 2000; 37 (suppl. 1): 47.
- Hofmann B. *Lese-Rechtschreibschwäche – Legasthenie – Erscheinungen, Theorieansätze, Prävention*. München: Oldenbourg 1998.
- Klatt DH. Software for a cascade/parallel formant synthesizer. *J Acoust Soc Am* 1980; 67: 971–95.
- Kraus N, McGee T, Carrell TD, King C, Tremblay K, Nicol T. Central auditory system plasticity associated with speech discrimination training. *J Cogn Neurosci* 1995; 7: 25–32.
- Kraus N, McGee T, Carrell T, Sharma A, Micco A, Nicol T. Speech-evoked cortical potentials in children. *J Am Acad Audiol* 1993; 4: 238–48.
- Kraus N, McGee TJ, Carrell TD, Zecker SG, Nicol TG, Koch DB. Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science* 1996; 273: 971–3.
- Kujala T, Karma K, _eponien_ R, Belitz S, Turkkila P, Tervaniemi M, Näätänen R. Plastic neural changes and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *Proc Natl Acad Sci USA* 2001; 98: 10509–14.
- Leonard BL. *Children with specific language impairment*. Cambridge, MA: MIT Press 1998.
- Leppänen PHT, Pihko E, Eklund KM, Lyytinen H. Cortical responses of infants with and without a genetic risk for dyslexia: II. Group effects. *Neuroreport* 1999; 10: 969–73.
- Liberman AM, Cooper FS, Shankweiler DP, Studdert-Kennedy M. Perception of the speech code. *Psychol Rev* 1967; 74: 431–61.
- Liener GA. *Testaufbau und Testanalyse*. 4. Aufl. München: Psychologie Verlags Union 1989.
- Linder M, Grisseman H. *Zürcher Lesetest (ZLT)*. 5. Aufl. Bern: Huber 1998.
- Manis FR, McBride-Chang C, Seidenberg MS, Keating P, Doi LM, Munson B, Petersen A. Are speech perception deficits associated with developmental dyslexia? *J Exp Child Psychol* 1997; 66: 211–35.

- Menning H, Roberts LE, Pantev C. Plastic changes in the auditory cortex induced by intensive frequency discrimination training. *Neuroreport* 2000; 11: 817–22.
- Merzenich MM, Jenkins WM, Johnston P, Schreiner C, Miller SL, Tallal P. Temporal Processing Deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science* 1996; 271: 77–81.
- Mody M, Studdert-Kennedy M, Brady S. Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol* 1997; 64: 199–231.
- Näätänen R. *Attention and Brain Function*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum 1992.
- Näätänen R, Lehtokoski A, Lennes M, Cheour M, Huotilainen M, Iivonen A, Vainio M, Alku P, Ilmoniemi RJ, Luuk A, Alik J, Sinkkonen J, Alho K. Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature* 1997; 385: 432–4.
- Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia* 1971; 9: 97–113.
- Pihko E, Leppänen PHT, Eklund KM, Cheour M, Gutorm TK, Lyytinen H. Cortical responses of infants with and without a genetic risk for dyslexia: I. Age effects. *Neuroreport* 1999; 10: 901–5.
- Rathenow P, Laupenmühlen D, Vöge J. Westermann Rechtschreibtest 6+ (WRT 6+). Braunschweig: Westermann 1981.
- Reed MA. Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *J Exp Child Psychol* 1989; 48: 270–92.
- Schenk J. Auswirkungen des rhythmisch-melodischen Sprechens nach H. Buschmann auf die Lese-Rechtschreibleistungen von Förderschülern. Diplomarbeit, Konstanz 2001.
- Schmidtke A, Schaller S, Becker P. Raven-Matrizen-Test. Colored Progressive Matrices (CPM). Weinheim: Beltz 1980.
- Schulte-Körne G, Deimel W, Bartling J, Renschmidt H. Auditory processing and dyslexia: Evidence for a specific speech processing deficit. *Neuroreport* 1998; 9: 337–40.
- Sharma A, Kraus N. Effect of contextual variations in pitch and phonetic processing: Neurophysiologic correlates. *Association for Research in Otolaryngology* 1995; Abstract 729.
- Stark RE, Heinz JM. Perception of stop consonants in children with expressive and receptive-expressive language impairments. *J Speech Hear Res* 1996; 39: 676–86.
- Studdert-Kennedy M, Mody M. Auditory temporal perception deficits in the reading-impaired: A critical review of the evidence. *Psychon Bull Rev* 1995; 2: 508–14.
- Sussman JE. Perception of formant transition cues to place of articulation in children with language impairments. *J Speech Hear Res* 1993; 36: 1286–99.
- Tacke G, Wörner R, Schultheiss G, Brezing H. Die Auswirkung rhythmisch-syllabierender Mitsprechens auf die Rechtschreibleistung. *Zeitschr Pädag Psychol* 1993; 7: 139–47.
- Tallal P, Piercy M. Developmental aphasia: Rate of auditory processing and selective impairment of consonant perception. *Neuropsychologia* 1974; 12: 83–93.
- Tallal P, Stark RE. Perceptual/motor profiles of reading impaired children with or without concomitant oral language deficits. *Ann. Dyslexia* 1982; 32: 163–76.
- Tallal P, Miller SL, Bedi G, Byrna G, Nagarajan SS, Schreiner C, Jenkins WM, Merzenich MM. Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science* 1996; 271: 81–4.
- Tallal P, Miller S, Fitch RH. Neurobiological basis of speech: A case for the preeminence of temporal processing. *Ann NY Acad Sci* 1993; 682: 27–47.
- Temple E, Poldrack RA, Protopapas A, Nagarajan S, Salz T, Tallal P, Merzenich MM, Gabrieli JDE. Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia: Evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci USA* 2000; 97: 13907–12.
- Tewes U, Rossmann P, Schallberger U. *Hamburg Wechsler Intelligenztest für Kinder*. 3. Aufl. Bern: Huber 2000.
- Tremblay K, Kraus N, Carrell TD, McGee T. Central auditory system plasticity: Generalization to novel stimuli following listening training. *J Acoust Soc Am* 1997; 102: 3762–73.
- Uwer R, von Suchodoletz W. Stability of mismatch negativities in children. *Clin Neurophysiol* 2000; 111: 45–52.
- Weiss R. *Culture Fair Intelligence Test, Scale 2 (CFT 20)*. 2. Aufl. Göttingen: Hogrefe 1987.
- Weiss R, Osterland J. *Culture Fair Intelligence Test, Scale 1 (CFT 1)*. 3. Aufl. Braunschweig: Westermann 1979.
- Welte V. *Der Mottier-Test, ein Prüfungsmittel für die Lautdifferenzierungsfähigkeit und die auditive Merkfähigkeit*. Sprache-Stimme-Gehör 1981; 5: 121–5.
- Werker JF, Tees RC. Speech perception in severely disabled and average reading children. *Can J Psychol* 1987; 41: 48–61.
- Winkler I, Kujala T, Tiitinen H, Sivonen P, Alku P, Lehtokoski A, Czigler I, Csépe V, Ilmoniemi RJ,

Näätänen R. Brain responses reveal the learning of foreign language phonemes. *Psychophysiology* 1999; 36: 638-42.

Woodcock R. *Woodcock Reading Mastery Tests-Revised*. Circle Pines, MN: American Guidance Service 1987.