

**Aus dem Institut für Medizinische Psychologie der Universität  
Tübingen**

**Direktor: Professor Dr. N. Birbaumer**

**Die Änderung der kortikalen Aktivität beim  
Erwerb eines multimodalen Sprachcodes**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard-Karls-Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von  
Stefanie Langkrär  
aus  
Oldenburg**

**2008**

Dekan: Professor Dr. I.B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr.C.Braun

2. Berichterstatter: Privatdozentin Dr. M. Pavlova

**Für  
Meine Eltern und meinen Bruder**

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	4
1. Einleitung.....	6
1.1 Sprache .....	7
1.2 Der Morse-Code .....	10
1.3 Die Verarbeitung von taktilen und auditorischen Reizen.....	12
1.3.1 Die auditorische Verarbeitung .....	12
1.3.2 Die taktile Verarbeitung .....	13
1.3.3 Die motorische Verarbeitung .....	14
1.3.4 Die Aufgabe des auditorischen Kortex bei der Sprachverarbeitung .....	15
1.3.5 Kortikale Veränderungen durch Lernen und Training.....	15
1.4 Die Magnetencephalographie .....	16
1.5 Versuchsdesign und Hypothesen .....	17
2. Material und Methoden.....	20
2.1 Versuchsablauf .....	20
2.2 Versuchspersonen .....	21
2.3 Datenerfassung mit Magnetencephalographen .....	21
2.4 Der Sprachcode .....	24
2.4.1 Darbietung der Stimulation.....	25
2.5 Detaillierter Versuchsablauf .....	28
2.5.1 Prä- / Post-Testsitzung:.....	28
2.5.2 Trainingsphase:.....	32
2.6 Auswertungen der Verhaltensdaten.....	33
2.7 Auswertung der MEG-Daten.....	36
2.7.1 frühe Antworten .....	37
2.7.2 späte Antworten .....	38
3. Ergebnisse .....	40
3.1 Die Verhaltensdaten .....	40

3.1.1 Die Leistung .....	41
3.1.2 Die Reaktionszeit .....	45
3.2 Die MEG-Daten .....	60
3.2.1 Frühe Antworten.....	60
4. Diskussion .....	71
4.1 Generalisierung der Codier- und Decodierleistung .....	75
4.1.1 Leistung nach motorischem Training.....	75
4.1.2 Leistung in der motorischen Testaufgabe .....	77
4.1.3 Leistungsverbesserung aufgrund der Wiederholung im Test .....	78
4.1.4 Trainingsdauer .....	78
4.2 Trainingsinduzierte Änderungen kortikaler Aktivität .....	79
4.2.1 Dipollokalisierung in der taktilen und auditorischen Aufgabe in der Prä-Testmessung.....	80
4.2.2 Dipollokalisierung in der taktilen und auditorischen Aufgabe in der Post-Testmessung .....	80
4.2.3 Dipollokalisierung in der motorischen Aufgabe.....	81
4.3 Visuelle Präsentation .....	81
4.4 Änderungen des Experimentdesigns vorteilhafter für die Fragestellung?	82
4.5 Verschiebung der taktil evozierten Aktivitäten in Richtung einer auditorischen Topographie in der Post-Testmessung.....	83
Schlussfolgerung .....	84
5. Zusammenfassung .....	85
6. Anhang .....	87
6.1 Literaturverzeichnis.....	87
6.2 Abbildungsverzeichnis .....	93
6.3 Abkürzungsverzeichnis .....	94
7. Danksagung .....	95

# 1. Einleitung

In der vorliegenden Dissertationsarbeit wurde die zerebrale Verarbeitung von sprachlicher Information an einem Morse-Code ähnlichem Sprachcode mit Hilfe der Magnetenzephalographie (MEG) untersucht. Die gesamte Studie bestand aus drei Teilen, in denen die Verarbeitung des Codes in verschiedenen Modalitäten untersucht wurde. Im ersten Teil wurde ein taktiler Sprachcode und im zweiten eine akustischer Code trainiert. Im dritten Experiment, auf das sich die vorliegende Studie bezieht, absolvierten die Versuchspersonen (VPs) ein einwöchiges motorischen Training, in dem sie eine Abfolge von Tastendrücken mit der rechten und linken Hand lernten, die einzelne Zeichen codierten. Jeweils vor und nach dem Training wurde eine MEG-Messung vorgenommen, um den naiven und trainierten Zustand der VPs zu erfassen. In diesen sogenannten Testphasen wurde die Sprachverarbeitung der VPs zusätzlich in zwei weiteren Modalitäten getestet (auditorisch und taktil), die als Kontrolle dienten. Während die VPs in den Trainingssitzungen ein Feedback über richtige und falsche Antworten erhielten, mussten sie in den Testphasen die Aufgaben ohne Feedback erledigen. In den anderen beiden Gruppen war der Ablauf im Prinzip gleich. Es gab auch hier ein Training mit einer vorausgehenden und einer nachfolgenden MEG-Messung. Der Ablauf der Messungen war für jede Gruppe identisch. Der Unterschied bestand lediglich im Training. Hier wurde der Sprachcode in unterschiedlichen Modalitäten eingeübt. In den einzelnen Teilen wurde jeweils 12-13 rechtshändige Versuchspersonen (VPs) untersucht.

Zusätzlich zu den kortikalen Aktivitätsveränderungen wurden auch Verhaltensdaten erfasst und ausgewertet. Unter Verhaltensdaten sind die Parameter Reaktionszeit und Leistung (Prozentsatz richtiger Antworten) zusammengefasst. Ziel der Untersuchung war es, festzustellen, ob es auch in den nicht trainierten Kontrollbedingungen Verbesserungen in der Verwendung des Sprachcodes gab, die für einen Transfer der Codeverarbeitung von der im Training gelernten Modalität auf andere Modalitäten bezeichnend sind. Ein

derartiges modalitätsunabhängiges System würde daraufhinweisen, dass sprachliche Information in spezialisierten Modulen erfolgt.

## 1.1 Sprache

Der Mensch unterscheidet sich durch seine Fähigkeit zur vielschichtigen und differenzierten Kommunikation von anderen Lebewesen. Durch Sprache ist es uns Menschen möglich, uns untereinander in verschiedenen Formen zu verständigen, wie z. B. mündlich, aber auch schriftlich. Sprachliche Informationen werden allgemein in Form von Sätzen ausgedrückt, in denen eine strukturelle Form wie Syntax und Grammatik von großer Bedeutung sind (Saffran et al. 2000). Aber es gibt auch Situationen in denen der Gebrauch von Sprache in Form von Sprechen, Hören, Lesen oder Schreiben nicht möglich ist. Für diese Situationen wurden daher alternative Kommunikationsmittel wie z.B. Gebärdensprache, Braille-Schrift oder der Morsecode entwickelt und bestimmten Situationen angepasst.

Das Interesse für die Entstehung von Sprache und den assoziierten Vorgängen im Gehirn kam zum ersten Mal im 19. Jahrhundert auf. Der erste Ansatz der Hirnforschung war die Phrenologie. Hier wurde die Hypothese aufgestellt, dass Hirngröße bzw. Knochenvorsprünge am Schädel vergesellschaftet seien mit Hirnfunktion. Broca hingegen stand dieser Darstellung kritisch gegenüber und vertrat die Meinung, dass Sprache etwas mit elektrischer Aktivität im Gehirn zu tun hätte. Broca entdeckte als Erster die Gehirnregion für artikulierte Sprache in der linken Hemisphäre, die auch nach ihm benannt ist (das Broca-Areal). Ein paar Jahre später entdeckte Carl Wernicke im posterioren superioren linken Temporallappen das sensorische Sprachzentrum (Wernicke-Areal) (Saffran et al. 2000). Aber nicht nur diese zwei Regionen im Frontal- bzw. Temporallappen sind für Verarbeitung und Produktion von Sprache entscheidend. Der Zusammenhang ist viel komplexer. So spielen eine Reihe von neuronalen Systemen und Untersystemen im Frontal-, Parietal- und Temporallappen eine wichtige Rolle (Binder et al. 1997, Calandra-Buonaura et al. 2002, Friederici et

al. 2000, Perani et al. 1998). Auch die Basalganglien und das Kleinhirn sind an den Vorgängen beteiligt (Mathiak et al. 2002a). Bei der Mehrheit der Bevölkerung liegen die sprachverarbeitende und –produzierenden Regionen in der linken Hemisphäre (Binder et al. 1997, Lang et al. 1987, Mathiak et al. 1999, Neville et al. 1998, Saffran et al. 2000, Tallal et al.1998) Die rechte Hemisphäre hingegen, ist eher zuständig für nicht verbale akustische Analyse (Tallal et al. 1998), sowie für die Verarbeitung von Tonhöhen und Musik (Mathiak et al. 2002a).

Sprachlaute (Phoneme) werden bereits auf supratemporaler Ebene (im Primären auditorischen Kortex) erkannt und von anderen komplexen auditorischen Stimuli unterschieden (Ackermann et al. 1999, Mathiak et al. 1999, Poeppel et al. 1997)

Bestimmte Aspekte der Worterkennung sind verknüpft mit spezifischen kortikalen Arealen auf einer höheren Sprachverarbeitungsebene. Sprache basiert auf segmentierten Untereinheiten. Dies ist bezeichnend für den Unterschied zwischen der Sprachwahrnehmung und anderen menschlichen Wahrnehmungen (Papcun et al. 1974). Visuelle, phonologische, semantische und aufmerksame Tätigkeiten werden beim Lesen eines Wortes als entscheidend angesehen (Posner et al. 1999). Wörter werden getrennt nach semantischer, grammatikalischer und phonologischer Funktion verarbeitet (Neville et al. 1992). So liegt der Bereich in dem Artikel, Konjunktionen und Hilfsverben, also grammatikalische Aspekte von Sprache, verarbeitet werden anterior zu Broca (Friederici et al.1980, Rosenberg et al.1985) während die semantischen Aspekte von Sprache (Substantive, Verben und Adjektive) eher posterior verarbeitet werden (Neville et al. 1992 & 1997, Mills & Neville 1997).

Sprachverarbeitungsstudien lassen sich aber nicht nur an der gesprochenen Sprache betreiben, sondern beinhalten auch die Studie über die Verarbeitung alternativer Sprachmöglichkeiten, sowohl bei Sprachbehinderten („language learning impaired children“ und Aphasiepatienten) als auch Blinden und Tauben, die Sprache in einer anderen Modalität erlernen müssen.

Kinder, die sich im Allgemeinen zwar normal entwickeln, aber trotzdem eine



Lese- und Sprachstörung zeigen, scheinen ein Defizit bei der Verarbeitung von schnell aufeinanderfolgenden Tönen zu haben. Dies spricht für ein Defizit auf einer frühen Ebene der Sprachverarbeitung. Sprachlaute und komplexe auditorische Stimuli können nicht von einander differenziert werden (Renvall & Hari 2002, Nagarajan et al. 1999, Merzenich et al. 1996, Benasich et al. 2002, Tallal et al. 1998)

Die Gebärdensprache, die taube Menschen zur Verständigung nutzen, zeigt sehr viele Parallelen in formalen Eigenschaften (Vermittlung einzelner Wörter, die nach grammatikalischen und semantischen Regeln zusammengesetzt werden), dem Erlernen und Breakdown bei Läsionen (aphasie-ähnliche Ausfälle im Bereich der Sprachproduktion bzw. der Sprachverarbeitung abhängig vom geschädigten Areal) zur normalen gesprochenen Sprache (Bellugi et al. 1989). Bei Patienten, die Gebärdensprache als erste Sprache lernen, steht statt der auditorischen Aufnahme von Wörtern die visuelle Aufnahme im Vordergrund. Allerdings besteht eine ähnlich asymmetrische Verteilung der aktiven Sprachareale auf die Hemisphären, wie bei normal hörenden Personen. Dieses Phänomen gilt aber nur für das Gebärdensprechen. Lesen diese Patienten so zeigt sich, dass sie keine Verarbeitung grammatikalischer Wörter aufweisen, wie dies bei normal hörenden Personen im zu Broca anterioren Bereich geschieht. (Neville et al. 1992 & 1997).

Bei der von den Blinden verwendeten Braille-Schrift werden einfache taktile Informationen in bedeutungsvolle Muster mit lexikalen und semantischen Eigenschaften umgewandelt und zur Sprachvermittlung verwendet. Beim Braille-Lesen wird neben den üblichen Spracharealen auch der primäre somatosensorische Kortex aktiviert (wie beim Lesen von Schrift bei normal Sehenden) (Sadato et al. 1998).

Lern- und Verarbeitungsprozesse können anhand des trainierens von künstlichen Sprachen, die sich durch verschiedene Faktoren vom normalen audiovisuellen Sprachsystem unterscheiden, analysiert werden (Opitz & Friederici 2003, Review Posner et Abdullaev 1999, Friederici et al. 2002)

Anhand von Bildgebungsverfahren konnte festgestellt werden, dass bei der

Verarbeitung künstlicher Sprachen die gleichen Areale aktiv sind, wie bei der Verarbeitung einer normalen natürlichen Sprache (Friederici et al. 2002, Perani et al. 1998, Mintz Th. 2002, Friederici et al.2000).

Der in der vorliegenden Studie verwendete Sprachcode wurde in verschiedenen Modalitäten eingesetzt. Ein Training des Sprachcodes erfolgte jedoch spezifisch nur für die motorische Modalität. Die VPs sollten lernen, einem visuell dargestellten Buchstaben eine Abfolge von linken und rechten Tastendrücken zuzuordnen.

## **1.2 Der Morse-Code**

Der Morse-Code wurde Mitte des 19. Jahrhunderts von Samuel Morse entwickelt, um die Kommunikation über lange Distanzen zu ermöglichen. Dies war vor allem beim Militär und in der Schifffahrt wichtig. Wie die Gebärdensprache und die Braille-Schrift dient er als Kommunikationsmöglichkeit - als Sprache - wenn eine Kommunikation durch audiovisuelle Sprache nicht möglich ist.

Der Morse-Code besteht aus kurzen und langen auditorischen Pulsen, die in verschiedenen Kombinationen Buchstaben und Zahlen ergeben, während diese in der gesprochenen Sprache durch komplexe und spektrale Sprachlaute dargeboten werden (Montnemery et al. 1991 & 1992, Kujala et al. 2003).

Trotz zahlreicher Studien über das Erlernen des Morse-Code, gibt es kaum Erkenntnisse über dessen Wahrnehmung und Verarbeitung im Gehirn.

Clawson et al. (2001) beschreibt die Morse-Code Aufnahme als eine komplexe Fähigkeit, die durch eine Gruppe von Stimuli (auditorische Codes) und ihre dazugehörigen Antwort beschrieben werden kann. Bei einer von dieser Arbeitsgruppe durchgeführten Studie wurden Probanden in zwei Unteraufgaben im Morse-Code trainiert. Die erste Aufgabe war eine prozedurale Aufgabe. Hier musste der Code in seine Elementsequenzen umgesetzt werden. Die zweite Aufgabe bestand aus einer deklarativen Tätigkeit: Der Umsetzung von Elementsequenzen in den dazugehörigen Code. Nach den Ergebnissen dieser Studie wirkt sich das Erlernen einer Untereinheit positiv auf die gesamte

Aufgabe und die Prozentzahl der richtigen Antworten aus.

Für die Erkennung und Produktion des Morse-Codes sind mindestens drei spezielle Fähigkeiten nötig: 1. spezielle linguistische Fähigkeit, 2. praktische Fähigkeiten und 3. auditorisches Diskriminationsvermögen (Ardila et al. 1987).

Papcun et al. (1974) konnten in ihrer Studie zeigen, dass geübte sowie naive Morse-Code-Anwender bei der Präsentation kurzer Codes eine höhere Wahrnehmung von Reizen am rechten Ohr zeigen als am linken. Hier läge ein Hinweis auf eine linkshemisphärische Verarbeitung. Wurde den naiven Anwendern jedoch ein längerer Code (> 7 Zeichen) angeboten, so wechselte die erhöhte Wahrnehmung auf das linke Ohr. Da die Anwender keine sprachliche Information aus den Codes ziehen, spricht dies dafür, dass die Anwender eine Integrationsstrategie suchen müssen. Die Fertigkeiten hierfür liegen in der rechten Hemisphäre.

Auch weitere Experimente (Lang et al. 1987, Kujala et al. 2003) konnten zeigen, dass die kortikale Verarbeitung von Morse-Codes in verschiedenen Aspekten der Morse-Code-Aufnahme auf die linke Hemisphäre lateralisiert. Es besteht sehr wahrscheinlich eine enge Verbindung zwischen den neuronalen Repräsentationen der Tonmuster und den Phonemen (Kujala et al. 2003).

Der in dieser Studie verwendete Sprachcode wurde in Anlehnung an den Morse-Code entworfen. Der kurze Punkt und der lange Strich, die sonst eine auditorische Wahrnehmung darstellen, wurden durch Stimulationen an rechter und linker Körperhälften ersetzt. Die Dauer der Reize war jeweils gleich lang. Die Stimuli wurden in den zwei Modalitäten auditorisch und taktil den VPs dargeboten bzw. mussten von diesen motorisch reproduziert werden.

## **1.3 Die Verarbeitung von taktilen und auditorischen Reizen**

Über mehrere Verschaltungen im Rückenmark, Hirnstamm und Thalamus werden sensorische Reize zu den spezialisierten unimodalen sensorischen Kortexarealen geleitet. Von hier aus geht der Weg weiter über die sekundären Kortizes hin zu den Assoziationskortizes, wo dann die Information aus den verschiedenen Modalitäten zu einer multimodalen Perzeption aus der Umwelt integriert werden.

### **1.3.1 Die auditorische Verarbeitung**

Auditorische Reize werden über die Hörbahn, die in den Ncll. Cochleares beginnt und über die Medulla oblongata zum Thalamus hin führt, von beiden Ohren über mehrere bilaterale Verschaltungen zu den primären auditorischen Kortizes (A1-Kortex) in die Temporallappen beider Hemisphären geleitet. Direkt neben den A1-Kortices liegen die sekundären auditorischen Kortizes (A2-Kortex). Allerdings zeigt der Input der kontralateralen Seite eine größere Repräsentation auf kortikaler Ebene und scheint ipsilaterale auditorische Reize zu unterdrücken (Mathiak et al. 2002a).

Durch bildgebende Verfahren konnte die frühe kortikale Verarbeitung im A1-Kortex und die darauf folgende spätere Verarbeitung im A2-Kortex der supratemporalen Ebene bzw. dem ventral davon liegenden Areal zugeordnet werden. Für jeden auditorischen Reiz gibt es eine positive Antwort ca. 50 ms nach Reizanstoss (P50). Darauf folgt nach ca. 100 ms Latenz (N1) eine negative Antwort (Mathiak et al. 2002a). Die Entstehung der frühen und mittleren Antworten im Zeitbereich zwischen 10 – 60 ms wird dem A1-Kortex zugeordnet. Die Entstehung der späteren Antworten (>100 ms) findet schon im A2-Kortex statt. Man nimmt an, dass die N1-Antwort, die in der Nähe des A1-Kortex entsteht, eine Wahrnehmung von akustischen Veränderungen (Bsp.:

Schalldruck und spektrale Eigenschaften) widerspiegelt (Mathiak et al. 2002a).

### **1.3.2 Die taktile Verarbeitung**

Somatosensorische Reize werden von der Körperoberfläche über das Rückenmark und den Hirnstamm zum Thalamus geleitet. Von dort geht es weiter zum primär somatosensorischen Kortex (S1-Kortex), der im Gyrus postcentralis liegt. Da die afferenten Bahnen im Rückenmark auf die andere Seite kreuzen, werden die Reize immer kontralateral zum Entstehungsort verarbeitet (also rechts dargebotener Reiz wird im linken S1-Kortex verarbeitet und links dargebotener Reiz im rechten S1-Kortex). Um allerdings eine einheitliche Empfindung der Körperoberfläche um die Körpermitte zu garantieren, sind S1-Areale, die axiale und proximale Körperteile repräsentieren, mit homologen Arealen in der ipsilateralen Hemisphäre über dichte callosale Netzwerke verbunden. Interhemisphärischer, wahrscheinlich transcallosaler Transfer, zwischen den die Hand repräsentierenden S1-Arealen während der Verarbeitung sensorischer taktiler Reize, kann von teilweise funktioneller Bedeutung für die Integration von somesthetischen Informationen während der co-operativen Aktion beider Hände sein (Schnitzler et al. 1995).

Der Entstehungsort somatosensorischer Aktivität früher (20-40ms) und mittlerer (40-80ms) Latenzzeiten liegt im postzentralen Gyrus, also im S1-Kortex (Gallen et al. 1993, Hämäläinen et al. 1990). Die späteren Antworten (80-120ms) werden im sekundären somatosensorischen Kortex (S2-Kortex) nach unilateraler Stimulation bilateral generiert. Der S2-Kortex ist im parietalen Operculum beider Hemisphären lokalisiert (posterior zu S1 und medial zu A1) (Hari et al. 1984, Karhu et al. 1999, Kaukoranta et al. 1983). Allerdings zeigt sich bei den kontralateralen Antworten eine kürzere Latenz und eine Verstärkung im Vergleich zu den ipsilateralen Antworten (Simoes et al. 1999, Kaukoranta et al. 1983, Hari et al. 1984, Hämäläinen et al. 1990). Der typische Peak für den S1-Kortex bei taktiler Stimulation ist der P50-Peak und für den S2-Kortex der P100-Peak. Der S2-Kortex wird des Weiteren mit der Verarbeitung von temporalen Merkmalen der somatischen Empfindung, mit der sensimotorischen Integration, mit dem taktilen Lernen und intermanuellem

Transfer in Verbindung gebracht (Karhu et al. 1999).

### **1.3.3 Die motorische Verarbeitung**

Motorische Bewegungen entstehen auf komplexe Weise. Grundlegend ist eine Bewegungsmotivation, die durch einen internen Stimulus (z.B.: der Wunsch nach einem Getränk) oder auch durch einen externen Stimulus (z.B.: eine Berührung) entstehen kann. Im limbischen System wird entschieden, ob auf den Reiz eine Antwort erfolgen soll. Auf der nächsten Stufe steht der Assoziationskortex, der eine Bewegungsstrategie entwirft. Zum Assoziationskortex zählen parasensorische, paralimbische und frontale Kortexareale, die nicht direkt an der eigentlichen Bewegungsausführung beteiligt sind.

In den Basalganglien wird dann die Bewegungsstrategie in eine tatsächliche Bewegung umgesetzt. Außerdem sind sie wichtig für die Auslösung der Bewegung. Im motorischen Kortex (bestehend aus primär motorischem Kortex, prämotorischem Kortex und supplementärem -motorischem Areal) wird die Ausführung der Bewegung vorbereitet und ein Teil der Bewegungsparameter festgelegt (z.B.: die Muskeln die an der Bewegung beteiligt sind). Die eigentliche Bewegungsausführung wird von den absteigenden motorischen Bahnen, den Spinalnerven und der Muskulatur übernommen. Für die Feinabstimmung der an die Muskulatur übermittelten Bewegungsparameter ist das Kleinhirn verantwortlich, das parallel zu den Bahnen der Bewegungsausführung angeordnet ist. (Topka H., Kapitel B-24 Motorisches System. In Schmidt, Unsicker (Hrsg)(2003), Lehrbuch Vorklinik: Teil B Anatomie, Biochemie und Physiologie des Nervensystems und des Bewegungsapparates, Köln, Deutscher Ärzte-Verlag)

Somatosensorische und motorische Funktionen sind eng miteinander verknüpft. Der primäre motorische Kortex (M1-Kortex) erhält somatosensorischen Input direkt durch den Thalamus und indirekt von zahlreichen somatosensorischen kortikalen Arealen. Außerdem bildet der S1-Kortex einen Teil der absteigenden Pyramidenbahn zu den Muskeln (Forss et al. 1998)

### **1.3.4 Die Aufgabe des auditorischen Kortex bei der Sprachverarbeitung**

Der auditorische Kortex liegt in unmittelbarer Nähe zu den an der phonologischen Sprachverarbeitung beteiligten Kortexarealen (u. a. Wernicke-Areal) (Fiez et al. 1996). Außerdem spielt er eine wichtige Rolle bei der zeitlichen Entschlüsselung auditorischer Signale (Ackermann et al. 1999) und ist beteiligt an der Unterscheidung sprachlicher Reize von anderen auditorischen Reizen (Neville & Bavelier 1998). Im Allgemeinen finden multisensorische Integrationsprozesse im Mittelhirn, im Thalamus und in den Assoziationskortexen statt. Jedoch konnten in der letzten Zeit auch multisensorische Verarbeitungsprozesse taktiler und auditorischer Reize im A2-Kortex nachgewiesen werden (Foxe et al. 2002, Schroeder et al. 2001, Fu et al. 2003). Der A2-Kortex liegt neben dem A1-Kortex und bezieht sowohl von ihm als auch von einigen thalamischen Kernen Informationen, was ein Grund sein könnte für diese multisensorischen Verarbeitungsprozesse (Fu et al. 2003).

### **1.3.5 Kortikale Veränderungen durch Lernen und Training**

Das Erlernen und Trainieren von Fertigkeiten führt neben einer schnelleren Reaktionszeit und einer besseren Bewältigung einer Aufgabe auch zu einer Änderung der Organisation des Gehirns. Das heißt neuronale Strukturen werden geändert und anders im Kortex angelegt (Reorganisation des Kortex) in Abhängigkeit vom Gebrauch des vom Areal repräsentierten Körperteils. Training kann bewirken, dass sich bestimmte Kortexareale vergrößern, aber auch eine Aktivitätsverminderung hervorrufen (z.B. wird bei Blinden die mit dem rechten Zeigefinger die Brailleschrift lesen das Areal das den rechten Zeigefinger im Gehirn repräsentiert, vergrößert, im Vergleich zum linken Zeigefinger, der keine Funktion beim Lesen der Brailleschrift übernimmt) (Godde et al. 2003, Mills & Neville 1997, Neville & Bavelier 1998, Pascual-Leone & Torres 1993). Dies zeigt sich deutlich am Beispiel von Blinden, die anhand der Braille-Schrift sprachliche Informationen aufnehmen. Bei ihnen ist die Repräsentation des Lesefingers im somatosensorischen Kortex am größten.

Beim Aneignen einer artifiziellen Sprache müssen die bis zu diesem Zeitpunkt unbekannt und bedeutungslosen Reize erst einmal als sprachliche Information eingeordnet werden. Ist diese Verknüpfung erfolgt, wandert das aktivierte Kortexareal vom medialen Temporallappen in den linken präfrontalen Kortex, und somit in die allgemein für Sprachverarbeitung vorgesehene Kortextregion. Mit dem weiteren Trainingsverlauf lässt sich hier dann eine deutliche Verstärkung der Aktivität beobachten (Opitz & Friederici 2003).

Auch in dieser Studie soll das Erlernen und die Verarbeitung sprachlicher Informationen näher betrachtet werden. Die Vermutung liegt nahe, dass auch in diesem Fall eine Lateralisierung der kortikalen Aktivität auftritt.

## 1.4 Die Magnetencephalographie

Die Magnetencephalographie (MEG) ist ein nicht-invasives, funktionelles bildgebendes Verfahren, welches schwache Magnetfelder ( $< 1$  pico Tesla), die durch elektrische Hirnaktivität entstehen, berührungsfrei über der Kopfoberfläche ableitet. Hierbei ist es möglich, durch Stimuli hervorgerufene, neuromagnetische Signale zu erfassen, die 1 Milliarde Mal kleiner sind als das Erdmagnetfeld (Gallen et al. 1993).

Wenn tausende von benachbarten Neuronen zur gleichen Zeit aktiv sind, erzeugen sie ein Magnetfeld, das stark genug ist, um nicht-invasiv von außen durch die sogenannten SQUID-Magnetometer (Superconducting quantum interference device) erfasst zu werden. Die MEG bietet eine hohe räumliche ( $\sim 5$  mm) und zeitliche ( $\sim 1$  ms) Auflösung. Dadurch können kortikale Aktivitäten relativ genau in Zeit und Raum ermittelt werden.

MEG verfügt über eine selektive Sensitivität für oberflächlich tangential angeordnete Stromquellen (der Kopf wird als Kugel betrachtet und die Stromquellen liegen tangential zu dieser Kugel) und eignet sich somit (im Vergleich zum EEG) sehr gut zur Erfassung der Aktivität aus Kortexregionen, die in den Fissuren liegen, wie z.B. Sprachverarbeitung, taktile und auditorische Verarbeitungsprozesse (Hari et al. 1984, Lounasmaa et al. 1996, Gallen et al. 1993, Mathiak et al. 1999). Durch MEG ist es möglich, während der



Verarbeitung komplexer Stimuli, hemisphärische Unterschiede leicht und schnell zu vergleichen, da mehrere Kortexregionen in beiden Hemisphären gleichzeitig überwacht werden können (Lounasmaa et al. 1996, Mathiak et al. 1999). Diese Möglichkeit der gleichzeitigen Überwachung vereinfacht die Forschung der neurologischen Basis von menschlichen kognitiven Aufgaben.

## **1.5 Versuchsdesign und Hypothesen**

In dieser Studie wurde ein einfacher Sprachcode (in Anlehnung an den Morse-Code) verwendet, um den frühesten Verarbeitungsprozess einfacher Sprachkomponenten zu analysieren. Trotz der Unterschiede des Präsentationsprinzips der Buchstaben in dieser Studie zum Morse-Code oder der Brailleschrift (hier Stimulation an linker oder rechter Körperhälfte) ist dennoch die Aufnahme auditorischer bzw. taktiler Informationen und deren geistige Assoziation zu einem bestimmten Buchstaben gleich, was wichtig ist für die spätere Interpretation der Daten. In Studien über die Verarbeitung bei den beiden anderen Systemen wurde eine Verarbeitung der Stimuli in den Spracharealen des Kortex festgestellt. Interessant ist, ob es auch bei dem hier gewählten Anwendungsprinzip von Stimuli zu einer Verarbeitung in eben jenen Spracharealen des Kortex kommt und ob diese ebenso nach längerem Training auf die linke Hemisphäre lateralisieren. Die Alternative wäre, dass die Stimuli in dem für sie spezifischen Areal verarbeitet werden und keinen Anhalt für sprachliche Verarbeitung geben.

Der Sprachcode wurde den VPs in dieser Studie in drei verschiedenen Aufgaben präsentiert. Es gab eine Reproduktionsaufgabe und zwei Diskriminationsaufgaben.

In der Reproduktionsaufgabe (motorische Aufgabe) mussten die VPs einen ihnen visuell präsentierten mit Pfeilen codierten Buchstabencode mit Hilfe von Tastern, die jeweils auf ihrer rechten und linken Seite angebracht waren, reproduzieren.

In den Diskriminationsaufgaben mussten sich die VPs entscheiden, ob ihnen die Elemente des Buchstabens auf der linken oder der rechten Seite der

visuellen Darstellung präsentiert wurde. Auch hier wurden die Buchstaben mit dem gleichen Pfeilcode codiert.

Um die Ergebnisse richtig auswerten zu können, wurde jede Aufgabe doppelt durchgeführt, was zu 6 Aufgabenblöcken pro Testsitzung führte.

Zwischen den Testsitzungen wurde mit den VPs ein intensives Training in der motorischen Aufgabe durchgeführt während in den Testsitzungen die kortikale Aktivität aller Aufgaben im MEG aufgezeichnet wurde. Neben der kortikalen Aktivität wurden in den Test- und Trainingsitzungen zusätzlich die Verhaltensdaten (Reaktionszeit und Prozentsatz richtiger Antworten) aufgezeichnet.

Ziel der Studie ist es, die kortikale Aktivität, sowie die Reaktion und Diskriminationsleistung zu analysieren und zu kontrollieren, ob das Training in der motorischen Aufgabe einen Effekt auch in der auditorischen und taktilen Aufgabe zeigt. Nachdem Alcantara et al. (1993) in ihrer Studie gezeigt haben, dass das Trainieren eines Sprachcodes in einer Modalität (auditorisch oder taktil) die jeweils andere positiv beeinflusst, ist eine vergleichbare Generalisierung zu erwarten.

Die aktuelle Forschung zeigt das verschiedene Sprachformen (künstliche, gesprochene und geschriebene sowie Brailleschrift und Gebärdensprache) sehr ähnliche Verarbeitungsmuster zeigen. Daher wird erwartet, dass

1. ein Lerneffekt durch das Training auftritt, der anhand der Verhaltensdaten sichtbar gemacht werden kann
2. der Lerneffekt auch in der Testsituation ohne Feedback erhalten bleibt
3. das motorische Training die Leistung in der motorischen Aufgabe verbessert
4. das motorische Training die Leistung in den somatosensorischen Aufgaben verbessert
5. der größte Leistungszuwachs in derjenigen Modalität auftritt in der trainiert wurde und dies in der Post-Testsitzung eindeutig sichtbar wird
6. sprachspezifische Areale aktiviert werden, durch primär nicht

sprachliche Information, die sekundär in einen sprachlichen Zusammenhang eingebunden wird (Aktivierung von Spracharealen durch visuelle und auditorische Stimulation).

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Versuchsablauf

Im Verlauf des Versuches sollte den VPs ein multimodaler Sprachcode antrainiert werden. Das Experiment teilte sich in mehrere Sitzungen auf. Es gab 2 Testsitzungen (Prä-Testsitzung und Post-Testsitzung) und 4 Trainingssitzungen, die zeitlich zwischen den 2 Testsitzungen lagen. In den Testsitzungen wurde jeweils die MEG-Messung durchgeführt. Die Testsitzungen liefen immer nach dem gleichen Schema ab. Anhand von evozierten Magnetfeldern im Magnetencephalographen wurden die Veränderungen der kortikalen Aktivität erfasst. Hierfür mussten die VPs Aufgaben in drei unterschiedlichen Modalitäten ausführen (auditorisch, motorisch und taktil). Eine visuelle Stimulation unterstützte die Aufgabenstellung. Die Trainingssitzungen hatten einen anderen Ablauf als die Testsitzungen. Hier sollten die VPs nur Aufgaben in einer Modalität ausführen, nämlich motorisch. Auch hier wurde die Aufgabe durch eine visuelle Stimulation unterstützt. Außerdem erhielten die VPs in den Trainingssitzungen ein Feedback über ihre erbrachte Leistung, was in den Testsitzungen nicht der Fall war. Neben den MEG-Daten während der Testsitzungen, wurden sowohl in den Test-, als auch in den Trainingssitzungen zusätzlich die Daten über die erbrachte Leistung der VPs aufgezeichnet. Diese sogenannten Verhaltensdaten setzen sich zusammen aus Performance (Prozentsatz richtiger Antworten) und der Reaktionszeiten der Versuchspersonen in den einzelnen Aufgaben. Von Interesse war, ob das Training in der motorischen Aufgabe eine Verbesserung der Reaktionszeiten und der Performance auch in den anderen in den Testsitzungen dargebotenen Aufgaben zur Folge hat.

## **2.2 Versuchspersonen**

Die von mir getestete „motorische Gruppe“ umfasste 5 weibliche und 7 männliche Personen im Alter von 17-30 Jahren (mittleres Alter 22,3 Jahre).

Um eventuelle Linkshänder auszuschließen und um die Händigkeit der VPs einzuschätzen musste jede VP zu Beginn des Versuchs einen Händigkeitsfragebogen ausfüllen.

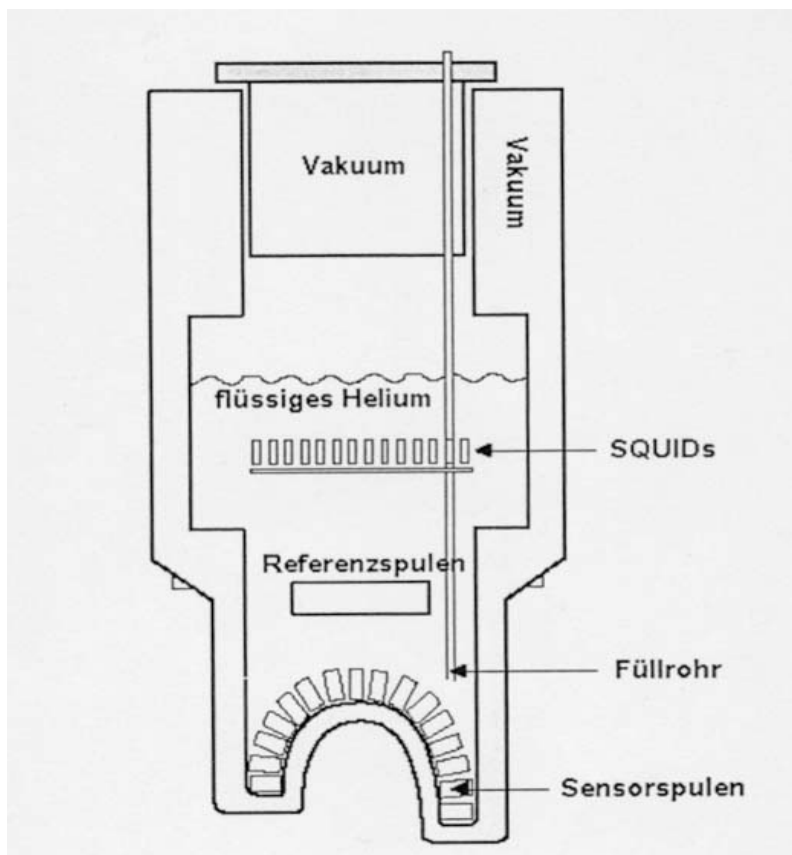
Vor dem Beginn des Versuchs wurde jede VP über Ablauf und Ziel des Experiments informiert und über etwaige Risiken aufgeklärt. Zur Bestätigung der Aufklärung und Information wurde den VPs ein schriftliches Einverständnisformular zur Unterschrift vorgelegt. Die Teilnahme am Versuch wurde den VPs mit einer Aufwandsentschädigung von 65€ vergütet.

## **2.3 Datenerfassung mit Magnetencephalographen**

In den Prä- und Post-Testsitzungen wurde mit einem MEG-Ganzkopfgradiometer mit 151 Kanälen (CTF Inc., Canada, 1997) die Änderung der kortikalen Aktivität, anhand von durch die Aufgaben hervorgerufener evozierter Magnetfelder, aufgezeichnet. Die Messung wurde im Sitzen in einem elektromagnetisch abgeschirmten Messraum durchgeführt (dreilagige Mu-Metallschicht, Vakuumschmelze, Hanau, Deutschland). Wegen der Anfälligkeit des MEGs für magnetische Störungen, mussten die VPs alle metallischen (ferromagnetischen) Dinge, wie z.B. Schmuck, Uhr, Haarspangen usw. ablegen und OP-Kleidung tragen.

Um den VPs eine bequeme Sitzposition beim Berühren der Innenseite des Dewars zu schaffen, wurde der Dewar (der helmförmige, mit flüssigem Helium

gefüllte Thermoscontainer, in welchem die MEG-Sensoren untergebracht sind, und der die erforderliche Supraleitung bewirkt) in einem Winkel von 15 Grad gekippt. Zur Messung der geringen Magnetfeldschwankungen des menschlichen Kortex, war jede Aufnahmespule mit einem SQUID (Super Conducting Interference Devices) verbunden.



**Abb. 1 Schematische Zeichnung des Dewars**

Vor und nach jeder Messung wurde eine Kopflokalisation durchgeführt, um die räumliche Relation zwischen Magnetsensoren und Kopf, sowie das Ausmaß der Kopfbewegung während der Messung zu bestimmen. Für die Kopflokalisation mussten drei zusätzliche Kopfspulen am Nasion und an dem linken und rechten Präaurikulärpunkt angeklebt werden. Aus der Differenz der Lage der Kopfspulen vor und nach der Messung ließ sich ermitteln, ob sich die Kopflage der VP während des Messvorgangs um mehr als 5 mm verändert hatte. Betrug die Änderung der Kopflage mehr als 5 mm musste die Messung wiederholt werden. Zur besseren Stabilisierung des Kopfes im Dewar wurden die

Zwischenräume mit Schaumstoffkissen ausgepolstert.

Die visuellen Stimulationen wurden von einem Projektor mit Hilfe von Spiegeln in den Messraum übertragen. Der Abstand der VPs zum Bildschirm betrug ca. 1m. Sowohl in der rechten als auch in der linken Armlehne war je ein Taster befestigt. In der auditorischen und der taktilen Aufgabe wurden die Taster von den VPs benutzt, um die anzugeben, welche der visuell dargebotenen Buchstaben dem akustisch oder haptisch präsentierten Code entsprach. Wenn sie meinten es sei der linke Buchstabe gewesen, waren sie angehalten den linken Taster zu drücken, und wenn sie glaubten es sei der rechte Buchstabe gewesen, sollten sie rechts drücken. Bei der motorischen Aufgabe wurde den VPs ein Buchstabe samt seinem Pfeilcode visuell präsentiert und die VPs hatten die Aufgabe den gezeigten Code mit Hilfe der Taster zu produzieren. Bei allen MEG-Messungen wurden die VPs zusätzlich aufgefordert, den Kopf möglichst still zu halten, wenig zu blinzeln und den Blick auf die Stimulation zu richten.

Jede Aufgabe eines Messdurchgangs bestand aus 200 Trials mit je einer Codestimulation. Die Dauer eines Messdurchgangs betrug je nach Reaktionsgeschwindigkeit der VPs und Aufgabe ca. 10-15 min. Zwischen den einzelnen Messdurchgängen bestand für die Vps die Möglichkeit sich ein wenig auszuruhen und den Kopf zu bewegen.

Die Akquisition und Speicherung der MEG-Messdaten wurde mit einer Workstation (Hewlett Packard, USA) und dem Programm Acq durchgeführt. Ein zweiter Computer diente als Stimulationsrechner. Zur Steuerung der visuellen, taktilen und auditorischen Stimulation wurde eine, an die speziellen Bedingungen des Versuchs angepasste, Stimulationssoftware verwendet. Um den Beginn von Messung und Stimulation zu synchronisieren, sandte der Stimulationsrechner am Anfang jeder Stimuluspräsentation ein Triggersignal an den Akquisitionsrechner. Der Stimulationsrechner protokollierte des Weiteren die Reaktionszeiten, richtige und falsche Antworten und welcher Buchstabencode präsentiert wurde. Für die Auswertung wurden schließlich die Daten am Ende jedes Messdurchgangs vom Akquisitions- und vom Stimulationsrechner auf einen peripheren Rechner übertragen.

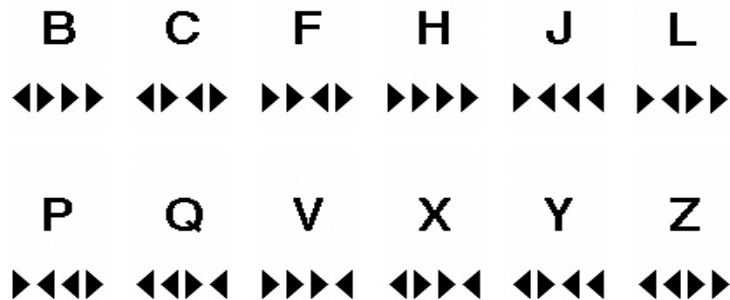
Die Samplingrate der MEG-Messdaten betrug für die Aufzeichnung 1250 Zeitpunkte pro Sekunde. Die kontinuierlich aufgezeichneten MEG-Daten wurden bereits online mit einem Lowpass-Filter (416 Hz) 4. Ordnung vorgefiltert und in 200 Trialepochen geschnitten.

## **2.4 Der Sprachcode**

Der in dieser Studie verwendete „Sprachcode“ war für alle Probanden neu und bestand aus 12 Zeichen, die je einen Buchstaben repräsentierten. Jedes Zeichen war aus 4 Elementen zusammengesetzt. Für die Zeichen des Sprachcodes wurden abgewandelte Morsezeichen verwendet. Morsecodes zeichnen sich bekanntlich durch eine variierende Anzahl und unterschiedlich angeordnete akustisch dargebotener Elemente („kurzer Punkt“ und „langer Strich“) aus. Die Kombination dieser langen und kurzen Elemente codiert alle Buchstaben des Alphabets. Die Elemente, die für unseren Code verwendet wurden unterscheiden sich im Gegensatz zu Morsezeichen nicht in der Länge sondern in der räumlichen Darbietung der Stimulation: Der kurze Punkt wurde ersetzt durch eine „Stimulation an der rechten Körperhälfte“ und der lange Strich durch eine „Stimulation an der linken Körperhälfte“. Die vierstelligen Morse-Zeichen wurden so verändert und verwendet, dass jedes Codezeichen aus 4 unterschiedlich zusammengesetzten rechten bzw. linken Elementen bestand. Unser Sprachcode bestand also aus einem reduzierten Alphabet mit insgesamt 12 modifizierten Morse-Zeichen.



# Sprachcode-Zeichen



**Abb. 2 Der Buchstabencode.**

Darstellung des verwendeten Buchstabencodes. Die Stimulation der entsprechenden Körperhälfte ist hier durch Pfeilsequenzen dargestellt. Pfeil nach links bedeutet linksseitige Stimulation (auditorisch, taktil oder motorischer Tastendruck). Pfeil nach rechts bedeutet rechtsseitige Stimulation (auditorisch, taktil oder motorischer Tastendruck). Diese Kombination von Buchstaben und dazugehörigen Pfeilsequenzen wurden in den Messungen den VPs präsentiert.

Die Folge, die einzelne Buchstaben repräsentierten, wurde über die auditorische und taktile Modalität dargeboten bzw. in der motorischen Aufgabe von den VPs produziert.

## 2.4.1 Darbietung der Stimulation

In den verschiedenen Aufgaben wurde nun den VPs auf unterschiedliche Art und Weise der Sprachcode präsentiert bzw. musste von den VPs reproduziert werden. Die verschiedenen Präsentationsmöglichkeiten des Codes werden in den folgenden drei Abschnitten dargestellt. Die visuelle Präsentation war als einzige Bestandteil jeder Aufgabe. Allerdings ist sie den anderen Stimulationen nicht gleichzusetzen, da sie für die Präsentation der Aufgabe und der Antwortalternativen eingesetzt wurde. Für die visuelle Reize wurden weder

Reaktionszeiten noch Hirnaktivitäten analysiert.

#### **2.4.1.1 Auditorische Präsentation des Codes ( auditorische Aufgabe)**

Die auditorisch dargebotenen Codeelemente bestanden aus einem 2 ms langem Rauschen, welches über luftleitende Schläuche und Ohrstöpsel dem jeweiligen Ohr zugeführt wurde. Das Rauschen wurde von den VPs als Klickgeräusch wahrgenommen. Das Interstimulusintervall zwischen den einzelnen akustischen Stimuli eines Codes betrug jeweils 148 ms.

#### **2.4.1.2 Taktile Präsentation des Codes ( taktile Aufgabe)**

Die taktilen Codeelemente wurden den Vps über zwei pneumatisch betriebene Reizvorrichtungen verabreicht. An der linken und rechten Fingerkuppe wurde je ein Clip angebracht, über die der Reiz auf den Finger übertragen wurde. Die Reizvorrichtung erzeugte, über eine durch Druckluft gesteuerte Membran, einen nicht-schmerzhaften Berührungsreiz an der Fingerkuppe. Jeder Stimulus dauerte 30ms und jedes Interstimulusintervall 120ms. Da durch das Öffnen und Schließen der elektrisch gesteuerten Ventile ein klickendes Geräusch entsteht, wurde den VPs über Ohrstöpseln ein akustisches Dauerrauschen zur Maskierung des Klickgeräusches dargeboten.

#### **2.4.1.3 Motorische Präsentation des Codes (motorische Aufgabe)**

Für die motorische Aufgabe wurde den VPs nur ein Buchstabe mit dazugehörigem Pfeilcode auf dem Bildschirm dargeboten. Um den dargebotenen Code motorisch umzusetzen, verwendeten die VPs die auf den

Armlehnen angebrachten Taster. Der Startzeitpunkt für die VPs wurde durch ein sich drehendes Kreuz auf dem Bildschirm signalisiert. Nach dem Drehen des Kreuzes hatten die VPs ca. 6 s Zeit um den Pfeilcode mit Hilfe der Taster nachzuklicken. Zusätzlich zur taktilen Empfindung beim Drücken der Taster, wurde der Tastendruck mit einem 2 ms langem Rauschen, das als kurzer Klick wahrgenommen wurde, verknüpft.

#### **2.4.1.4 Visuelle Präsentation des Codes**

Die visuelle Präsentation des Sprachcodes erfolgte durch die Darstellung eines Pfeilmusters auf dem Bildschirm. Jedes Code-Element wurde durch einen Rechts- bzw. Linkspfeil repräsentiert. Der Buchstabe und der ihn repräsentierende Pfeilcode erschienen in weißer Farbe auf einem Bildschirm mit grauem, 56x112 Pixel großem Hintergrund. Die hierfür verwendeten Buchstaben hatten eine Schriftgröße von 30pt. Die Pfeile wurden in der Größe 10x19 Pixel dargeboten. Die Größe der visuellen Darbietung wurde so klein gewählt, dass die VPs aus 1m Entfernung die gesamte Darstellung, von zwei Buchstaben und den dazugehörigen Pfeilcodes im Zentrum des Bildschirms, mit einem Blick erfassen konnten. Dies war nötig um bei den MEG-Aufzeichnungen unnötige Augenbewegungen zu vermeiden. Die visuelle Präsentation sollte außerdem dazu dienen den VPs das Lernen der Buchstabencodes zu erleichtern.

## **2.5 Detaillierter Versuchsablauf**

Im Folgenden wird der genaue Ablauf der einzelnen Test- und Trainingssitzungen beschrieben.

### **2.5.1 Prä- / Post-Testsitzung**

In diesen beiden Sitzungen wurde die MEG-Aufzeichnung durchgeführt. Eine Testsitzung bestand aus jeweils sechs Messblöcken. Sechs Messblöcke ergaben sich aus der zweimaligen Durchführung jeder Aufgabe. Die Aufgabenabfolge wurde unter den VPs randomisiert.

#### **2.5.1.1 Auditorische Aufgabe**

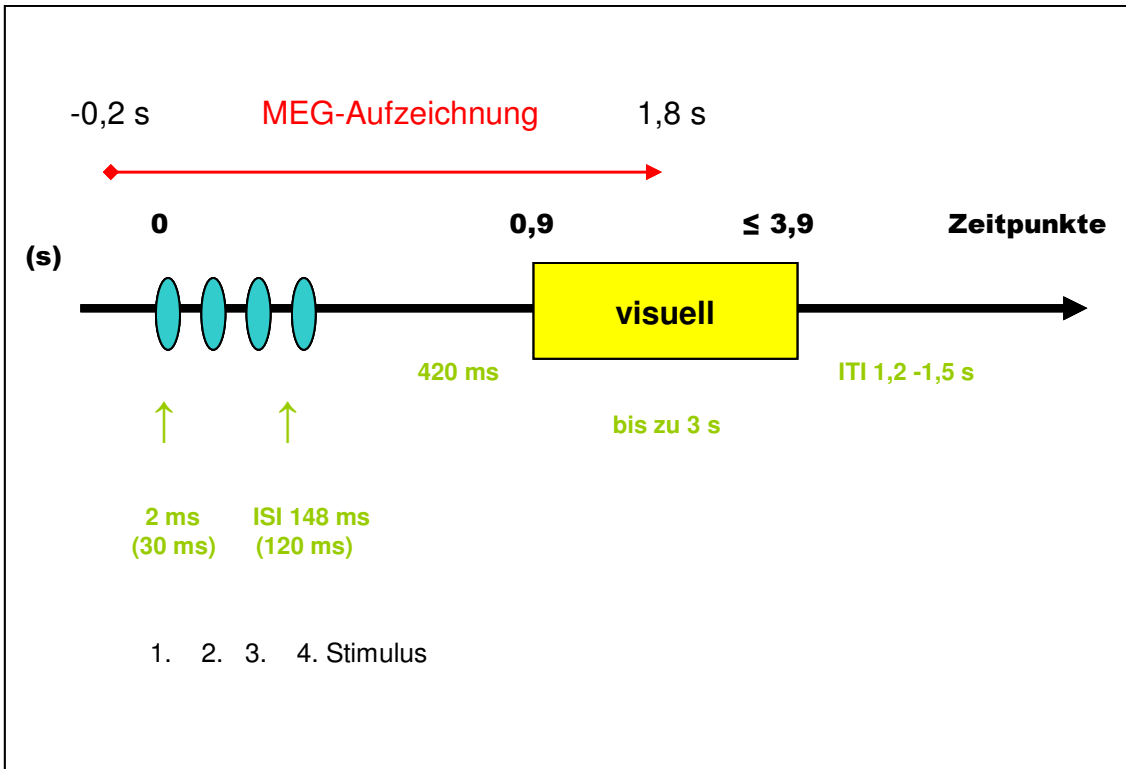
Die auditorische Aufgabe, war eine Diskriminationsaufgabe, in der die VPs den räumlichen Unterschied der Signale durch auditorische Stimuli einem von zwei visuell dargestellten Buchstaben zuordnen mussten. Bei der auditorischen Stimulation nahmen die VPs den Code als Klick-Geräusch über Ohrstöpsel im rechten bzw. linken Ohr wahr.

Jeder Reizdurchgang begann mit einem Codezeichen, bestehend aus 4 einzelnen auditorischen Stimuli, die teilweise am linken bzw. rechten Ohr präsentiert wurden. Im Anschluss wurden den VPs auf dem Bildschirm zwei Buchstaben mit dazugehöriger Pfeilsequenz visuell präsentiert. Die VPs mussten nun entscheiden, welchen der beiden Buchstaben sie auditorisch wahrgenommen hatten, und durch Drücken eines der beiden Taster links oder

rechts, den jeweiligen Buchstaben aussuchen.

Das Interstimulusintervall (ISI) zwischen den einzelnen auditorischen Stimuli betrug 148 ms und der Stimulus selbst 2 ms. Die visuelle Darbietung begann 420 ms nach dem letzten Stimulus. Je nach Reaktionszeit betrug die Dauer der visuellen Darbietung und damit die Antwortmöglichkeit durch Tastendruck max. 3 s. Die visuelle Darbietung wurde nach dem Tastendruck beendet.

Pro Messung wurden insgesamt 200 Buchstabencodes randomisiert präsentiert und jedes dazugehörige evozierte Magnetfeld gemessen. Für die evozierten Magnetfelder wurden aus den MEG-Daten 2.05 s lange Trialepochen ausgeschnitten. Der Beginn dieser Trialepochen lag 250ms vor dem ersten auditorischen Stimulus und endete 900ms nach der visuellen Präsentation. Somit wurde gewährleistet, dass nur die kortikale Aktivität während der auditorischen Stimulation und dem darauf folgenden Prozess der Zeichenerkennung für die weitere Analyse gespeichert wurde.



**Abb. 3 Schematische Darstellung des Ablaufs der Trials der auditorischen bzw. taktilen Aufgabe.**

Die Trials begannen mit je vier Stimulationen (blaue Ovale) von je 2 ms (bzw. 30 ms bei der taktilen Aufgabe). Das Interstimulusintervall (ISI) betrug 148 ms (bzw. 120 ms). In der visuellen Präsentation 900 ms nach Trialbeginn wurden die Buchstaben mit ihren Pfeilcodes präsentiert. Die Möglichkeit zur Antwort durch Tastendruck welcher Buchstabe gezeigt wurde bestand bis 3,9 s nach Trialbeginn. Der Beginn der MEG-Aufzeichnung ist rot markiert. ITI steht für das Inter-Trial-Intervall, der Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Trials.

### 2.5.1.2 Taktile Aufgabe

Die taktile Aufgabe entsprach weitgehend der auditorischen Aufgabe. Bei dieser Aufgabe mussten die VPs den Code als taktilen Stimulus an der rechten bzw. linken Hand diskriminieren und mit den visuell dargebotenen Buchstaben und ihren Codes vergleichen, um den richtigen auszuwählen.

Das ISI zwischen den einzelnen Stimuli betrug hier 120ms und der Stimulus selbst 30ms. Auch in der taktilen Aufgabe entsprach die randomisierte

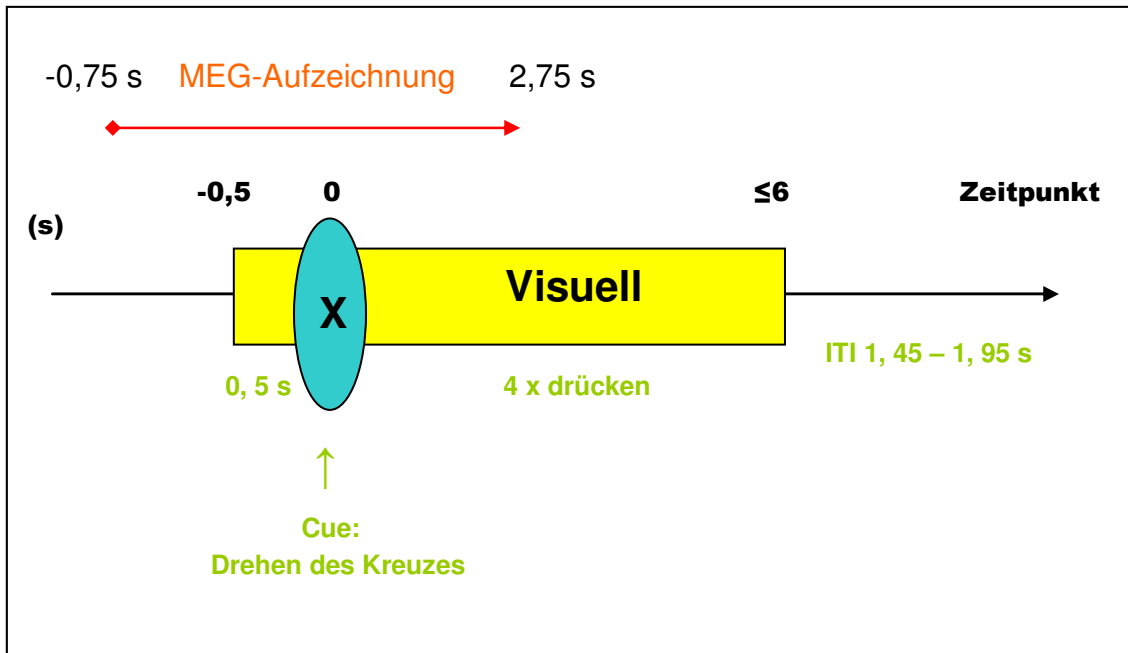
Buchstabenpräsentation 200 Zeichen.

### **2.5.1.3 Motorische Aufgabe**

Die motorische Aufgabe unterschied sich in ihrer Durchführung deutlich von der auditorischen und taktilen Aufgabe. Die VPs wurden dazu angehalten einen ihnen präsentierten Buchstabencode mit Hilfe der angebrachten Taster links und rechts nachzuahmen.

Hierfür wurde den VPs zu Beginn der Aufgabe ein einzelner Buchstabe mit dazugehörigem Pfeilcode dargeboten, welcher auch während des gesamten Trials eingeblendet blieb. Bei dieser Aufgabe bekam die VPs sowohl ein somatosensorisches (durch Berühren der Taster) als auch ein akustisches (Klickgeräusche über Ohrstöpsel) Feedback.

Um den VPs den Beginn der motorischen Codeproduktion zu signalisieren, drehte sich 500ms nach Beginn der visuellen Präsentation das Kreuz und blieb für max. 2 s stehen. Beendet wurde der Trial durch den viermaligen Tastendruck oder eben spätestens nach 2 s. Nach weiteren 250 ms wurde die visuelle Darstellung ausgeblendet. Die Aufzeichnung der kortikalen Aktivität durch das MEG startete 0,75 s vor dem Drehen des Kreuzes und endete 2.75 s danach. Somit wurde sowohl die Erkennung des Zeichens als auch die motorische Antwort aufgezeichnet. Wie schon bei den anderen Aufgaben umfasste sie motorische Aufgabe 200 Trials pro Messung.



**Abb. 4 Schematische Darstellung der motorischen Trials.**

Zum Zeitpunkt  $-0,5$  s beginnt die visuelle Präsentation. Diese bleibt während des gesamten Trials für die VP sichtbar. Zum Zeitpunkt  $0$  s dreht sich das Kreuz und gibt der VP das Signal zur Nachahmung des Codes. Die MEG-Aufzeichnung wird zum Zeitpunkt  $-0,75$  s gestartet und endet  $2,75$  s nach Drehen des Kreuzes. Auch hier steht ITI für das Inter-Trial-Intervall.

## 2.5.2 Trainingsphase

Die Trainingsphase lag zwischen den zwei Messungen und wurde soweit möglich an vier unterschiedlichen, nicht zu lang auseinander liegenden, Tagen durchgeführt. Das Training entsprach 4 Trainingssitzungen, wobei eine Trainingssitzung pro Tag abgehalten wurde. Eine Trainingssitzung bestand aus vier Trainingsblöcken, die jeweils 12 min dauerten. Die 12 min entsprachen ungefähr der durchschnittlichen Dauer eines Messdurchgangs im MEG. Der Aufbau und Ablauf des Trainings war vergleichbar mit der motorischen Aufgabe in den Messdurchgängen. Ein Unterschied bestand darin, dass die VPs im Training ein visuelles Feedback über die Richtigkeit des durchgeführten Trials (visuell, „Falsch“ bzw. „Richtig“ für  $0,5$  s) und den prozentualen Anteil



ihrer richtigen Antworten bekamen, um den Lerneffekt während der Trainingsphase zu erhöhen. Durch das Feedback wussten die VPs, dass sie einen Buchstabencode falsch eingegeben hatten und konnten beim nächsten Vorkommen des zuvor falsch eingegebenen Buchstaben besser aufpassen und den Fehler nicht ein zweites Mal begehen. Ein weiterer Unterschied lag im Ort der Durchführung. Die Trainingssitzungen wurden nicht im MEG sondern an einem Computerbildschirm in einem separaten Raum durchgeführt. Der wichtigste Unterschied zu den Messdurchgängen bestand in der visuellen Darbietung. Im Training wurde den VPs, neben oben genannten Unterschieden, nur der Buchstabe und das Drehkreuz dargeboten. Der Pfeilcode wurde ausgeblendet, so dass die VPs die Taster nach dem Gedächtnis bedienen mussten.

Um den VPs das Lernen der Buchstabencodes zu erleichtern, erhielten alle VPs nach der ersten Messung eine Liste mit allen Buchstaben und den dazugehörigen Pfeilcodes. Somit war auch das Üben außerhalb der Trainingssitzungen möglich.

## **2.6 Auswertung der Verhaltensdaten:**

Die Informationen über die Sequenz der Codeelement, Reaktionszeit, Stimulationsbuchstabe und richtige und falsche Antworten wurden auf dem Stimulationsrechner mitprotokolliert. Mit Hilfe eines in Matlab 5.3.0 (The Mathworks, INC. 1999) erstellten Programms konnten die Daten der Test- und Trainingsphasen ausgewertet werden. Die einzelnen Daten jedes Test- und Trainingsblocks jeder VP wurden berechnet und über die 200 Trials gemittelt. Die Reaktionszeit (RZ) wurde auf unterschiedliche Weise ausgewertet: 1. die RZ allgemein gemittelt über alle Trials. 2. die RZ auf die unterschiedlichen Zeichen-Stimulationen. Als weiteres wurde der Prozentsatz richtiger Antworten (Performance) der VPs in den Test- und Trainingsblöcken berechnet.

Im nächsten Schritt wurden die gemittelten Daten mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel (Microsoft Inc. 2000, USA) in Tabellen übertragen. Aus den, nun tabellarisch angeordneten Daten, ließen sich Mittelwerte über alle VPs für die gemittelten Reaktionszeiten und die Performance jedes Test- und Trainingsblocks, sowie der dazugehörige Standardfehler ermitteln. Um die Veränderungen der gemittelten RZs und Performances besser zu veranschaulichen wurden die Daten anhand von Liniendiagrammen dargestellt.

Für die statistische Auswertung der Verhaltensdaten wurde das Programm SPSS 12.0 für Windows verwendet. Durchgeführt wurde eine dreifaktorielle Anova mit Messwiederholung zur statistischen Analyse von Unterschieden. Dadurch konnten der Trainingseffekt und die Unterschiede zwischen den Modalitäten ermittelt werden. Es wurden folgende Modelle verwendet:

- *Vergleich der Reaktionszeiten für die auditorische und taktile Aufgabe (allgemeine Reaktionszeit):* Faktor = Modalität; Stufen = MEG-Messung vorher, MEG-Messung nachher; Unterstufen: Block 1 der Vorher-Messung, Block 2 der Vorher-Messung; Block 1 der Nachher-Messung, Block 2 der Nachher-Messung
- *Vergleich der Prozentzahl richtiger Antworten für die auditorische und die taktile Aufgabe:* Faktor = Modalität; Stufen = MEG-Messung vorher, MEG-Messung nachher; Unterstufen: Block 1 der Vorher-Messung, Block 2 der Vorher-Messung; Block 1 der Nachher-Messung, Block 2 der Nachher-Messung
- *Prozentzahlvergleiche innerhalb der einzelnen Modalitäten für alle drei Modalitäten (Kontrastrechnung):* Faktor = Messung vorher/nachher; Stufen = Block 1 der Vorher-Messung, Block 2 der Vorher-Messung; Block 1 der Nachher-Messung, Block 2 der Nachher-Messung
- *Vergleich der Reaktionszeiten für die motorische Aufgabe:* Faktor = Messung vorher/nachher; Stufen = Block 1 der Vorher-Messung, Block 2 der Vorher-Messung; Block 1 der Nachher-Messung, Block 2 der Nachher-Messung

Die Reaktionszeiten für das motorische Training wurden wie die Daten für die Reaktionszeiten in der motorischen Modalität bei der Messung ausgewertet, nur mit dem Unterschied, dass immer alle vier Trainingssitzungen und die dazugehörigen Trainingsblöcke miteinander verglichen wurden. Außerdem wurde auch für das Training eine Kontrastrechnung durchgeführt um die Verbesserung der untersuchten Parameter zwischen den einzelnen Trainingssitzungen zu ermitteln. Als letztes wurden noch Testsitzungen und Trainingssitzungen miteinander verglichen. Auch hier wurden Prozentzahl richtiger Antworten und in einem anderen Schritt die Reaktionszeiten miteinander verglichen. Die Anova hierfür sah folgendermaßen aus: Faktor = Messung 1-6 (wobei hier die einzelnen Trainingssitzungen auch als Messung titulierte wurden, was dann 6 Messungen ergibt mit der Prä- und der Post-Testsitzung); Stufen = Mess- und Trainingsblöcke1&2 (von den Trainingsblöcken wurden, aus den vier vorhandenen jeder Sitzung, die ersten zwei ausgewählt, um sie mit je zwei Messblöcken vergleichen zu können)

## 2.7 Auswertung der MEG-Daten

Ziel war es, aus den aufgezeichneten Daten die evozierten Antworten auf die Buchstabenreize auszuwerten. Hierzu wurde die Auswertung in mehrere Schritte aufgeteilt. Zu berücksichtigen ist jedoch bei der Auswertung der MEG-Daten, dass die kortikale Aktivität bei der motorischen Aufgabe nicht untersucht wurde, da sie aufgrund des anderen Aufgabendesigns nicht mit der taktilen und auditorischen Aufgabe vergleichbar ist.

Begonnen wurde die Auswertung mit der Mittelung der Trialepochen jedes Messblocks anhand des Programms AverageDs (CTF Systems, 2001). Durch die Unterdrückung der Spontanaktivität mit Hilfe des Mittelungsvorgangs, konnten die kortikalen Antworten auf die verschiedenen Aufgaben eindeutig dargestellt werden. Da die Analyse auf Änderungen der magnetischen Aktivität abzielt, wurde die Baseline (Zeitbereich vor erster taktiler bzw. auditorischer Stimulation) als Ausgangsaktivität betrachtet und von der nachfolgenden Aktivität subtrahiert. Weiterhin wurden die gemittelten Kurven durch einen Highpass-Filter von 1,5 Hz gefiltert, um langsame Aktivitätsverschiebungen zu eliminieren.

Im zweiten Schritt wurden nun, mit Hilfe des Programm DataEditor, die Feldschwankungen aller 151 Kanäle getrennt bzw. als Kurven überlagert dargestellt. Mit Hilfe dieser Darstellung wurden hauptsächlich defekte Kanäle erkannt und von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Mit dem Programm PlotTool konnten im dritten Schritt, die Feldverteilungen in Form von farbkodierten zweidimensionalen Karten für die einzelnen Testsitzungsblöcke bzw. für die verschiedenen VPs dargestellt werden. Rote bzw. blaue Farben in den Karten markierten den Ein- bzw. Austritt der magnetischen Feldlinien.

Mit Hilfe des Quellenlokalisationsprogramms DipolFit konnten aus der Feldverteilung die neuronalen Generatoren der magnetischen Aktivität lokalisiert und ihr zeitliches Aktivierungsprofil ermittelt werden. Um herauszufinden, wie sich die Verarbeitung ändert wurde eine Quelle in S1 und

A1 gelegt. Das Programm DipolFit war außerdem wichtig für die Auswertung der frühen Antworten (d.h. M1 auf den ersten Stimulus) der auditorischen und taktilen Bedingung. Hier wurden die Dipole an die gemessene Feldverteilung der jeweiligen Blöcke der Einzel-VPs angepasst, so dass der Restfehler möglichst gering blieb. Die gemittelten Daten der einzelnen VPs wurden zu Grand Averages der Blöcke 1,2,3 und 4 wie anschließend die Blöcke 1+2 bzw. 3+ 4 zu Prä- bzw. Postdaten gemittelt. Somit konnte die allgemeine Antwort auf den Stimulationstyp und der Lerneffekt in der Gruppe dargestellt werden.

### **2.7.1 Frühe Antworten**

Für die Dipolanpassung der auditorischen und taktilen Blöcke wurde die M1-Antwort zu einem Zeitpunkt im Latenzbereich von 77,6-126,4 ms bzw. 85,6-126,4 ms angepasst. Dafür wurde für jeden der Blöcke der Zeitpunkt der höchsten Aktivität im ersten großen (N1-)Peak bestimmt. Zwei Dipole, die jeweils die Antwort auf rechte bzw. linke Stimulation im primären somatosensorischen bzw. auditorischen Kortex repräsentierten, dienten als Dipol-Modell. Die Ausrichtung der Dipole war für die taktilen Dipole eine anterior-posterior-Richtung und für die auditorischen Dipole eine inferior-superior-Richtung.

Dadurch, dass die Anwendung des Sprachcodes in der auditorischen und taktilen Aufgabe bei der Ausführung beider Aufgabentypen sehr ähnlich war, bestand die Hypothese, dass sowohl somatosensorische als auch auditorische Kortexareale aktiviert werden könnten. Daher wurde mit Hilfe einer „Subspace projection“ (beruhend auf einer Regressionsanalyse) der Aktivitätsverlauf der taktilen und auditorischen Dipole in allen Blöcken berechnet. Somit konnte z. B. im 1. taktilen und im 1. auditorischen Prä-Testblock der VP20 der Aktivitätsverlauf der vier Dipole, die in eben jenen Blöcken an die Feldverteilung angepasst wurden, untersucht werden.

Alle aus diesen Berechnungen entstandenen Daten wurden über alle VPs zu Prä- und Post-Testblöcken gemittelt. Die darauffolgende Darstellung im Diagramm erfolgte getrennt nach auditorischen und somatosensorischen Dipolen, der rechten und linken Hemisphäre und nach dem Ort der ersten Stimulation (rechte bzw. linke Körperhälfte). Für die statistische Analyse der Daten wurde eine Bootstrap-Analyse als nicht-parametrisches Analog einer ANOVA verwendet.

### **2.7.2 Späte Antworten**

Bei den späten Antworten wurde der Zeitbereich zwischen dem letzten Stimulus und dem Beginn der visuellen Präsentation (0,6-0,9 s) untersucht. Es sollte schon an dieser Stelle, vor dem visuellen Reiz (dem Drehkreuz), eine Art Erkennungsprozess stattfinden, nämlich in der Form, dass zwischen dem auditorisch bzw. taktil wahrgenommenen und dem repräsentierten Buchstaben eine Verbindung entsteht.

Die Grand Averages der auditorischen und taktilen Prä- und Post-Testblöcke wurden mit dem Programm PlotTool betrachtet. Hierbei war auffällig, dass sich die Topographie der auditorischen Blöcke durch das Training in diesem Zeitbereich kaum verändert. Im Vergleich dazu änderte sich aber in den taktilen Blöcken durch das Training die Topographie in die Richtung der Topographie der auditorischen Aufgabe.

Aufgrund dieser Tatsache wurde als erstes aus den Grand Averages der auditorischen Aufgabe eine Mustertopographie erstellt. Im nächsten Schritt konnte mit Hilfe des Programms ctf-residual der Anteil dieser Mustertopographie der Grand Averages der auditorischen Post-Testblöcke im ausgewählten Zeitbereich untersucht werden. Es wurde für jeden Block ein Mittelwert gebildet, der sich über die einzelnen Zeitpunkte des Zeitfensters erstreckte. Somit konnte der Mustertopographieanteil in den individuellen Signalen bestimmt werden. Zur anschließenden Darstellung der Daten in einem

Diagramm, wurden die Daten in Excel eingespeist.

Der Kennwert aus den Aktivitätsverläufen wurde nun bestimmt und mit einer dreifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren „Modalität“, den Stufen „Prä-Post-Effekt“ und den Unterstufen „Wiederholung“ im Programm SPSS statistisch analysiert.

## **3. Ergebnisse**

Die Verhaltensdaten wurden jeweils für die Testsitzungen nach auditorischer, taktiler und motorischer Aufgabe und für die Trainingsitzungen nach motorischer Aufgabe ausgewertet. Außerdem wurden die Ergebnisse dieses Teils der Studie mit denen der anderen beiden Teile verglichen und hinsichtlich der Trainingseffekte bei verschiedenen Trainingsmodalitäten untersucht. Bei den Testsitzungen kam die Beurteilung der kortikalen Aktivität, die in der auditorischen und taktilen Aufgabe anhand der magnetoenzephalographischen Aufzeichnungen untersucht wurde, dazu. Die bei der motorischen Aufgabe erhobenen MEG-Daten wurde wie bereits beschrieben bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die MEG-Amplituden wurden entsprechend ihrer Auftretenslatenz nach Reizbeginn in frühe und späte Antworten eingeteilt.

### **3.1 Die Verhaltensdaten**

Für die Verhaltensdaten wurde die Leistung (d.h. Prozentanteil richtiger Antworten) und die Reaktionszeiten für jede einzelne VP über die 200 registrierten Trials pro Test- bzw. Trainingsdurchgang gemittelt. Für die Reaktionszeit (RZ) wurden mehrere Maße bestimmt: Die allgemeine RZ (wurde für die auditorische und taktile Aufgabe durchgeführt), Onset RZ (Zeit bis zum Drücken des ersten Tasters) und Rest RZ (Zeit zwischen zweitem und letztem Drücken der Taster). Die letzten beiden Maße beziehen sich nur auf die motorische Aufgabe. Aufgrund des anderen Designs der motorischen Aufgabe gegenüber der taktilen und auditorischen Aufgabe musste diese auch anders ausgewertet werden und konnte nicht mit den anderen beiden Aufgaben verglichen werden.

In einem weiteren Schritt wurden die Ergebnisse der ersten beiden Teile der Studie mit denen des vorliegenden Teils zusammengenommen und in Bezug auf die Effektivität der Trainingsmodalität untersucht und verglichen.



### 3.1.1 Die Leistung

Im Verlauf der Datenerhebung stellte sich deutlich heraus, dass durch das Lernen der Aufgaben und der Stimulationscodes durch die VPs der Prozentsatz richtiger Antworten deutlich anstieg. So konnte schon in der ersten Testphase zwischen zwei Messblöcken für alle Modalitäten eine leicht signifikante ( $p < 0.023$ ,  $F(1,11) = 7.149$ ) Leistungsverbesserung beobachtet werden. Zwischen der Prä- und Post-Testphase war die Steigerung sogar für alle Modalitäten hochsignifikant ( $p < 0.000$ ,  $F(1,11) = 58.482$ ).

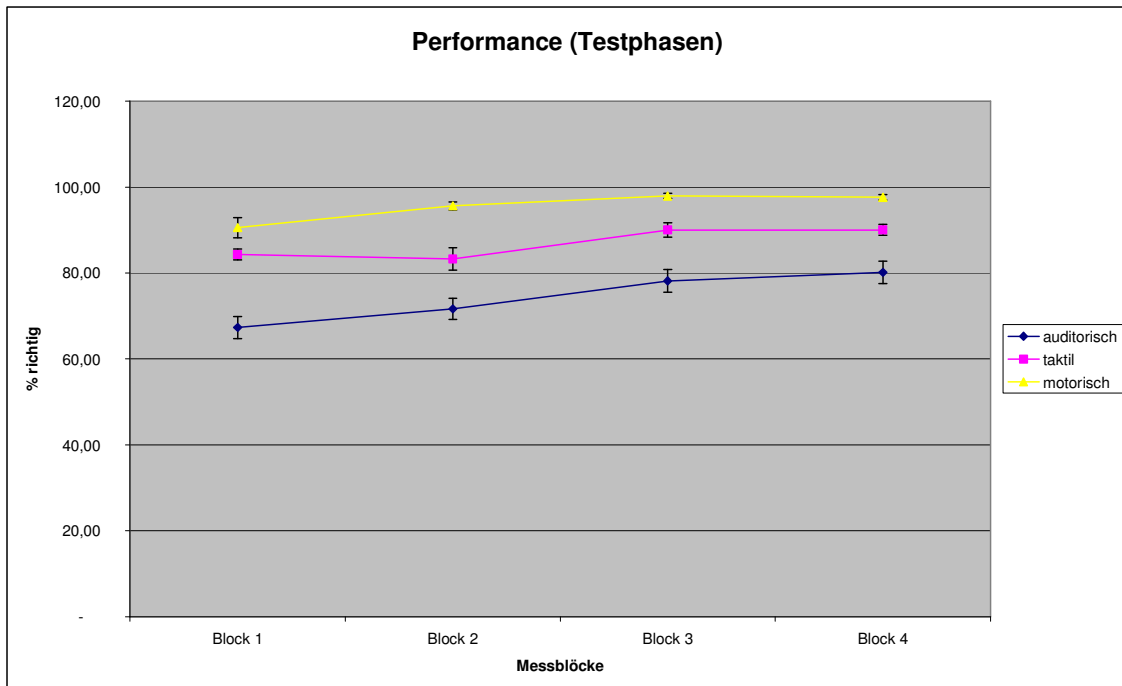
Aufgeschlüsselt nach einzelnen Modalitäten, ergab sich für die auditorische Aufgabe zwischen erstem und zweitem Prä-Testblock eine signifikante Leistungs Zunahme ( $p < 0,013$ ,  $F(1,11) = 8,757$ ). Zwischen den zwei Testsitzungen, also zwischen zweitem Prä-Testblock und erstem Post-Testblock war die Leistungssteigerung am höchsten ( $p < 0,002$ ,  $F(1,11) = 16,325$ ). In den letzten zu vergleichenden Testblöcken, nämlich zwischen erstem Post-Testblock und zweitem Post-Testblock, gab es nur noch eine geringe signifikante Änderung der Leistung ( $p < 0.034$ ,  $F(1,11) = 5,820$ ). Für die taktile Aufgabe stellte sich nur eine signifikante Verbesserung der Leistung zwischen zweitem Prä-Testblock und erstem Post-Testblock heraus ( $p < 0,006$ ,  $F(1,11) = 11,765$ ). Innerhalb der Prä-Testblöcke war der Unterschied nicht signifikant ( $p < 0,839$ ,  $F(1,11) = 0,044$ ) und auch zwischen Post-Testblöcken gab es keine signifikante Leistungsverbesserung ( $p < 0,981$ ,  $F(1,11) = 0,001$ ). Die motorische Aufgabe hingegen zeigte wieder deutlichere Leistungssteigerungen. Zwischen erstem und zweitem Prä-Testblock war eine deutliche Leistungssteigerung erkennbar ( $p < 0,036$ ,  $F(1,11) = 5,690$ ) und zwischen zweitem Prä-Testblock und erstem Post-Testblock gab es sogar einen hochsignifikanten Unterschied ( $p < 0,003$ ,  $F(1,11) = 14,067$ ). Erst zwischen erstem und zweitem Post-Testblock war der Unterschied nicht mehr signifikant ( $p < 0,548$ ,  $F(1,11) = 0,384$ ).

Die geringste Leistung, gemessen in prozentual richtigen Antworten, war für die Testphase in der auditorischen Aufgabe zu sehen. Die VPs begannen im Mittel

mit 67,29 % (48,29 – 80,68 %, Standardfehler (SD) = 2,57 %) und steigerten sich mit jedem Testblock deutlich. So erreichten sie im zweiten Prä-Testblock schon im Mittel 71,64 % (58,94 – 85,99 %, SD = 2,48 %), was sich im ersten Post-Testblock auf 78,16% (65,05 – 97,1 %, SD = 2,65 %) und im zweiten Post-Testblock auf 80,15 % (66,83 – 99,05 %, SD = 2,59 %) steigerte. Bei der auditorischen Aufgabe liegt eine wesentlich größere Streuung der Messdaten vor als bei den anderen beiden Aufgaben. Einige VPs lagen beim ersten Prä-Testblock gerade auf Zufallsniveau von 50 % (2 von 12), während andere schon über 70 % erzielten (4 von 12). Im Mittel war die Steigerung der Leistung in der auditorischen Aufgabe am deutlichsten zu erkennen. Sie betrug in der auditorischen Aufgabe im Mittel 12,86 %, in der motorischen Aufgabe noch 7,08 % und in der taktilen Aufgabe sogar nur 5,73 %.

Hierbei ist deutlich festzustellen, dass in den anderen zwei Aufgaben der Einstiegsprozentsatz richtiger Antworten schon wesentlich höher lag. So begannen die VPs in der taktilen Aufgabe schon im Mittel mit 84,29 % (77,4 – 89,37 %, SD = 1,25 %). Im zweiten Prä-Testblock sackten sie mit den richtigen Antworten ein wenig ab auf 83,27 % (65,22 – 93,75 %, SD = 2,59 %). In der Post-Testphase war aber wieder eine Steigerung zu erkennen: 89,98 % (77,18 – 97,12 %, SD = 1,68 %) im ersten Posttestblock und 90,02 % (83,65 – 99,04 %, SD = 1,29 %) im zweiten.

In der motorischen Aufgabe lag der Einstiegsprozentsatz richtiger Antworten am höchsten. Die VPs begannen im Mittel schon mit 90,55 % (73,43 – 98,54 %, SD = 2,36 %) und steigerten sich im zweiten Block auf 95,61 % (89,42 – 100,0 %, SD = 0,92 %). Auch zwischen 2. und 3. Block war noch eine deutliche Steigerung erkennbar, so lag im 3. Block der Prozentsatz bei 97,92 % (93,78 – 100,0 %, SD = 0,58 %), während sich zwischen den letzten zwei Blöcken so gut wie nichts änderte: 4. Block: 97,63 % (92,75 – 100,0 %, SD = 0,62 %).

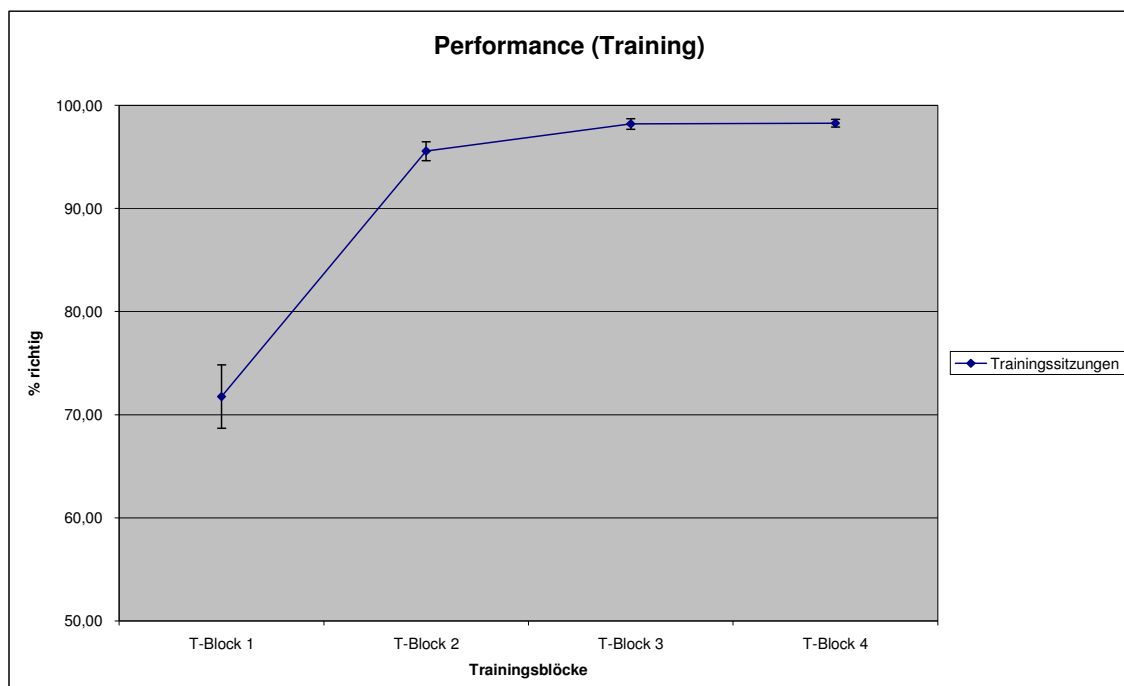


**Abb. 5 Performance (Testphasen)**

Steigerung der Leistung (Prozentsatz richtiger Antworten) im Verlauf der Testphasen (gemittelt über alle VPs) für die motorische, taktile und auditorische Aufgabe.

Aber nicht nur in den Testphasen waren deutliche Verbesserungen der Leistung erkennbar, sondern auch in den motorischen Trainingsitzungen zeigten sich diese Veränderungen. Es ergab sich eine hochsignifikante ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33) = 40,220$ ) Leistungssteigerung über alle Trainingsitzungen hinweg. Bei genauerer Betrachtung allerdings fällt auf, dass die Leistungsverbesserungen im Laufe der Trainingsitzungen kleiner werden und sich die erreichten Prozentzahlen der 100% Grenze asymptotisch nähern. So war der Leistungsunterschied sowohl zwischen der ersten und zweiten Trainingssitzung ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11) = 48,162$ ), als auch zwischen den einzelnen Blöcken der ersten und zweiten Trainingssitzungen ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33) = 74,297$ ) noch hochsignifikant unterschiedlich. Die VPs erreichten in der ersten Trainingssitzung durchschnittlich 71,76% (32,45 – 99,45%,  $SD = 3,073\%$ ) richtige Antworten, während sich diese Zahl in der zweiten Sitzung schon auf durchschnittlich 95,55% (73,65 – 100%,  $SD = 0,931\%$ ) steigerte. Zwischen zweiter und dritter Trainingssitzung war der Unterschied nur noch signifikant ( $p < 0,020$ ,  $F(1,11) = 7,336$ ). Genauso verhielt es sich auch mit dem Unterschied

zwischen den einzelnen Blöcken der zweiten und dritten Trainings-sitzung ( $p < 0,008$ ,  $F(3,33) = 4,686$ ). In der dritten Trainings-sitzung belief sich die durchschnittliche Prozentzahl auf 98,19% (75,32 – 100%,  $SD = 0.520\%$ ). Der Unterschied zwischen den letzten zwei Trainings-sitzungen war nicht mehr signifikant ( $p < 0,902$ ,  $F(1,11) = 0,116$ ), ebenso wenig der Unterschied zwischen den einzelnen Blöcken ( $p < 0,261$ ,  $F(3,33) = 1,399$ ). In der vierten Trainings-sitzung erreichten die VPs mit einem Mittelwert von 98,25% (86,34 – 100%,  $SD = 0.372\%$ ) fast die hundert Prozentgrenze.



**Abb. 6 Performance (Training)**

Verlauf der prozentualen Steigerung im Verlauf der motorischen Trainings-sitzungen, gemittelt über alle VPs.

Als letztes wurden jeweils die ersten zwei Testblöcke der Prä- und Post-Testphase mit den ersten zwei Trainingsblöcken der 4 Trainings-sitzungen verglichen. Innerhalb der Testsitzungen bzw. Trainings-sitzungen fand sich ein hochsignifikanter Effekt ( $p < 0,000$ ,  $F(5,55) = 58,877$ ) und auch der Unterschied zwischen den einzelnen Blöcken der Testsitzungen und der Trainings-sitzungen war hochsignifikant ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11) = 26,678$ ) unterschiedlich.

### 3.1.2 Die Reaktionszeit

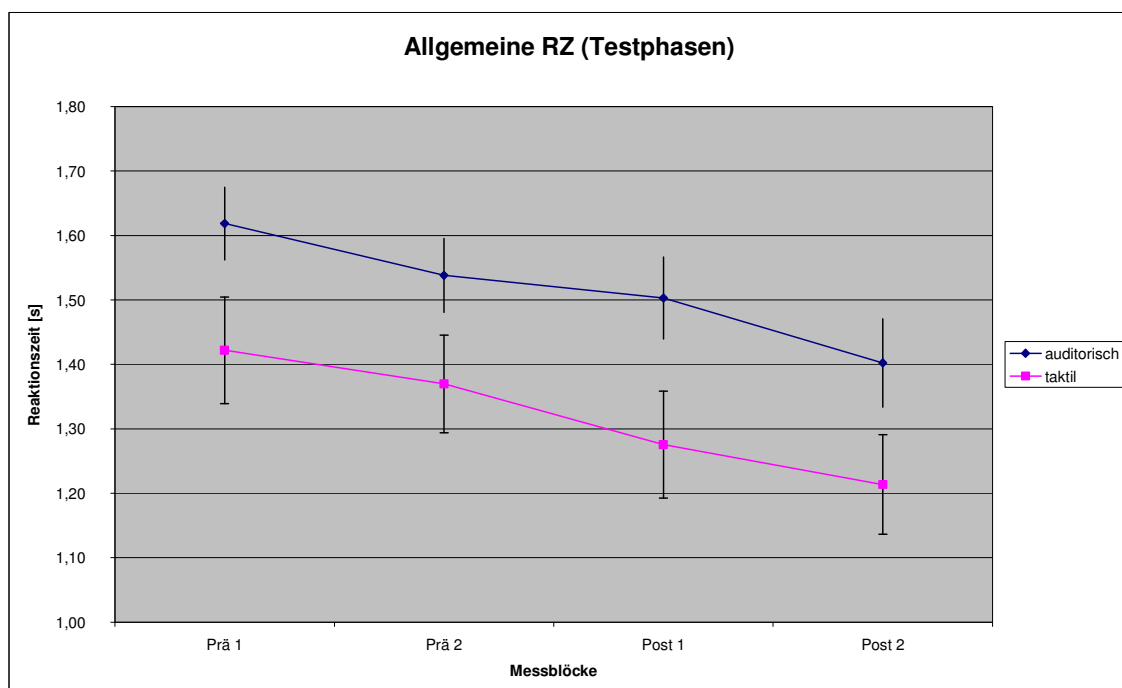
Für die auditorische und taktile Aufgabe wurde jeweils die allgemeine Reaktionszeit ausgewertet (Zeit von Beginn der visuellen Stimulation bis zum Drücken des Tasters als Mittelwerte über die einzelnen Reaktionszeiten). Da sich die motorische Aufgabe wie schon beschrieben von den anderen zwei Aufgaben unterschied, wurden diese Reaktionszeiten nach einem anderen Schema ausgewertet. In der motorischen Aufgabe wurde, um ein Überlappen der Hirnantworten der visuellen Stimulation mit den motorischen Antworten zu verhindern, das Reaktionsintervall durch das Drehen des Fadenkreuzes gestartet. Daher wurde die RZ-Berechnung auf diesen Zeitpunkt bezogen, weshalb sie um 0,5 s kürzer ausfiel als die visuelle Stimulation. Die visuelle Stimulation wurde schon vor dem Drehen des Fadenkreuzes eingeblendet. Die Auswertung der motorischen Reaktionszeiten erfolgte aus diesem Grund zusätzlich zur Berechnung der allgemeinen RZ als Onset RZ und Rest RZ. Zusätzlich wurden noch die Reaktionszeiten auf die unterschiedlichen Buchstaben für die auditorische und taktile Aufgabe erfasst.

#### 3.1.2.1 Die allgemeine Reaktionszeit

Für die allgemeine RZ ergab sich für alle zu überprüfenden Haupteffekte ein hochsignifikanter Unterschied: innerhalb der Modalitäten ( $p < 0,001$ ,  $F(1,11) = 22,720$ ), zwischen den Testsitzungen ( $p < 0,002$ ,  $F(81,11) = 17,919$ ) und auch zwischen den einzelnen Testsitzungsblöcken ( $p < 0,007$ ,  $F(1,11) = 11,299$ ). Die auditorische Aufgabe begannen die VPs in der Prä-Testsitzung im Mittel mit Reaktionszeiten von 1,62 s (1,18 – 1,83 s, SD = 0,06 s) und verbesserten sich im zweiten Prä-Testblock im Schnitt auf 1,54 s (1,12 – 1,77 s, SD = 0,06 s). Auch in der Post-Testsitzung waren Steigerungen zu registrieren, so lag im ersten Post-Testblock die allgemeine RZ schon bei durchschnittlich 1,50 s (1,21 – 1,84 s, SD = 0,06 s) und im zweiten Post-Testblock bei 1,40 s (1,03 – 1,86 s, SD = 0,07 s). In der Aufschlüsselung der Kontraste zwischen den einzelnen Testblöcken wurde für die auditorische Aufgabe deutlich, dass nur zwischen erstem und zweitem Prä-Testblock ( $p < 0,031$ ,  $F(1,11) = 6,148$ ) und zwischen

erstem und zweitem Post-Testblock ( $p < 0,012, F(1,11) = 9,075$ ) eine Verringerung der Reaktionszeiten vorlag. Der Kontrast zwischen der zweiten Prä-Testblock und erstem Post-Testblock war hingegen nicht signifikant ( $p < 0,345, F(1,11) = 0,972$ ).

Im Vergleich zur auditorischen Aufgabe begannen die VPs die taktile Aufgabe mit einer mittleren RZ von 1,42 s (0,85 – 1,73 s, SD = 0,08 s) und verringerten ihre RZ im zweiten Prä-Testblock schon auf 1,37 s (0,86 – 1,80 s, SD = 0,08 s). Im ersten Post-Testblock wurden dann 1,28 s (0,91 – 1,87 s, SD = 0,08 s) und 1,21 s (0,84 – 1,71 s, SD = 0,08 s) im zweiten Post-Testblock im Schnitt gebraucht um auf die Reize zu reagieren. In der taktilen Aufgabe waren allerdings nur der Kontrast zwischen zweitem Prä-Testblock und erstem Post-Testblock signifikant ( $p < 0,014, F(1,11) = 8,484$ ). Zwischen erstem und zweitem Prä-Testblock ( $p < 0,080, F(1,11) = 3,783$ ), und zwischen erstem und zweitem Post-Testblock ( $p < 0,088, F(1,11) = 3,496$ ) gab es hingegen keine signifikanten Veränderungen.

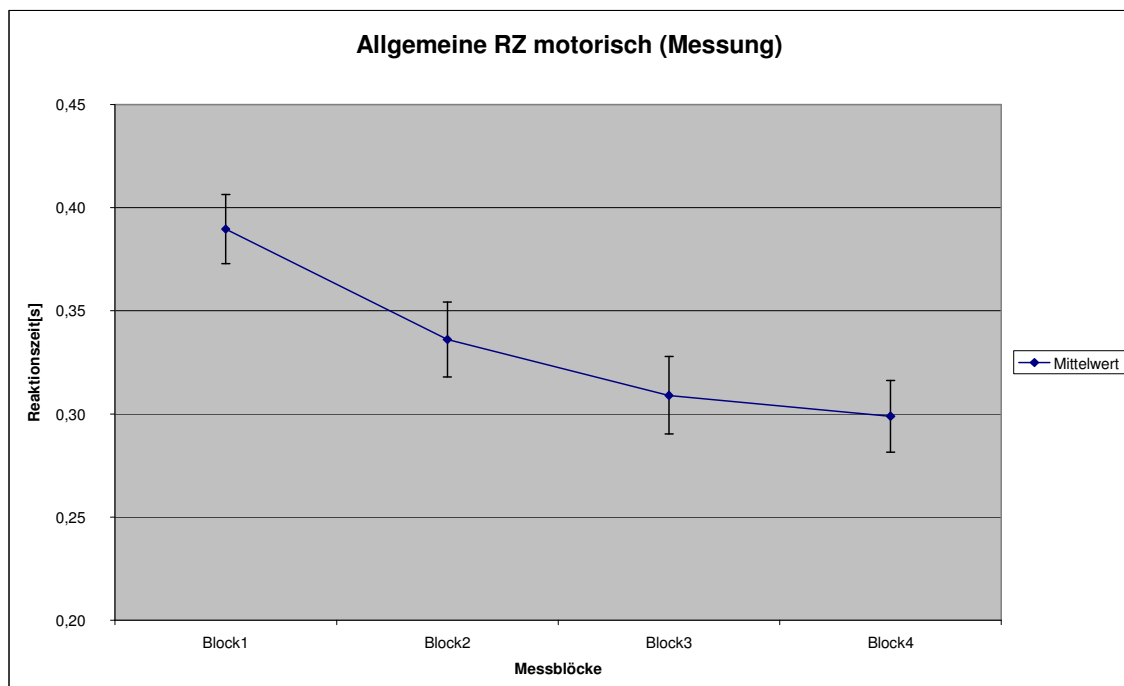


**Abb. 7 Allgemeine RZ (Testphasen)**

Veränderung der über alle VPs gemittelten Reaktionszeiten für die auditorische und taktile Aufgabe.

Auch für die motorische Aufgabe wurde eine Aufschlüsselung der allgemeinen RZ vorgenommen. Aus den oben genannten Gründen ist diese aber nicht mit den allgemeinen RZs aus den anderen zwei Aufgaben vergleichbar und wird deshalb extra dargestellt. Zudem wurden die Änderungen der RZ über die Trainingsblöcke hinweg untersucht und mit denen der Testphasen verglichen.

In der motorischen Aufgabe begannen die VPs mit durchschnittlich 0,39 s (0,32 – 0,48 s, SD = 0,02 s) um sich im zweiten Prä-Testblock auf mittlere 0,34 s (0,24 – 0,46 s, SD = 0,02 s) zu steigern. Auch in der Post-Testsitzung nach dem Training war eine deutliche Abnahme der RZ erkennbar: erster Post-Testblock: im Mittel 0,31 s (0,23 – 0,44 s, SD = 0,02 s), zweiter Post-Testblock: 0,30 s (0,22 – 0,44 s, SD = 0,02 s). In der Kontrastdarstellung war nur ein signifikanter Unterschied zwischen erstem und zweitem Prä-Testblock erkennbar ( $p < 0,001$ ,  $F(1,11) = 22,704$ ).



**Abb. 8 Allgemeine RZ motorisch (Messung)**

Veränderung der über alle VPs gemittelten Reaktionszeit für die motorische Aufgabe

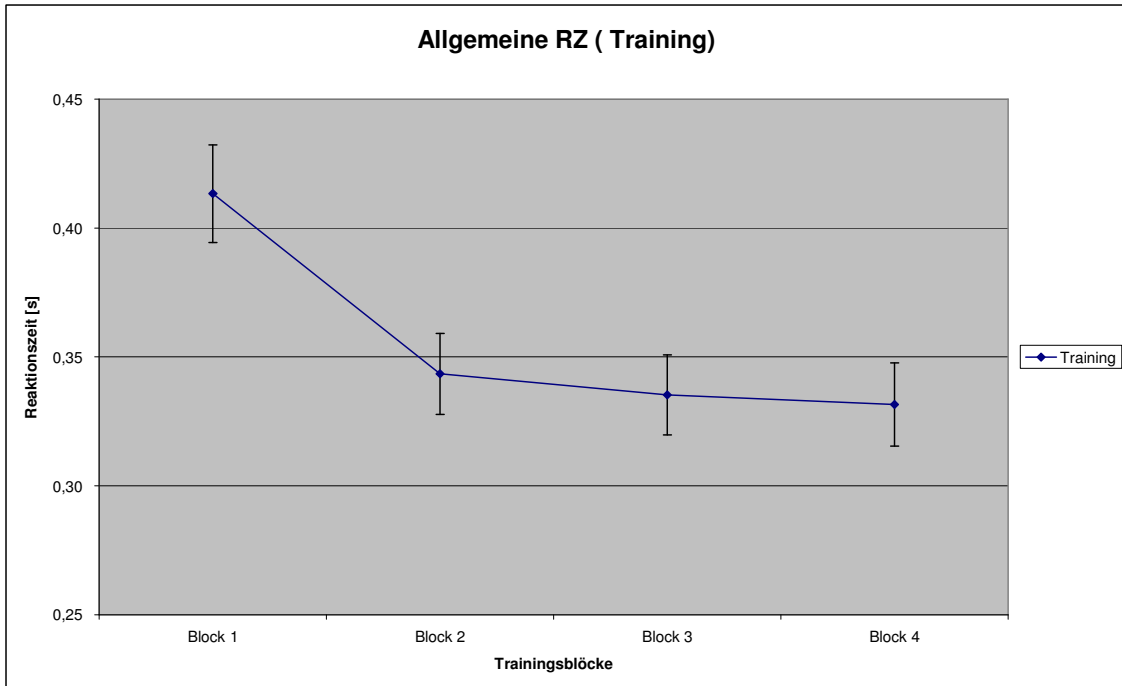
Im Training waren die Unterschiede zwischen den vier Trainingssitzungen hoch

signifikant ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33)=17,157$ ) und auch die einzelnen Trainingsblöcke innerhalb einer Trainingssitzung unterschieden sich hochsignifikant voneinander ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33)=34,204$ ). Im ersten Trainingsblock brauchten die VPs im Mittel 0,41 s (0,30 – 0,49 s, SD = 0,02 s). Im zweiten und dritten Trainingsblock blieb die mittlere RZ gleich bei 0,34 s; zweiter Block: (0,24 – 0,44 s, SD = 0,02 s) & dritter Block: (0,25 – 0,41 s, SD = 0,02 s). Zum vierten Block war dann wieder eine kleine Steigerung zu vermerken: 0,33 s (0,22 – 0,43 s, SD = 0,02 s).

Auch die Kontrastdarstellung der Signifikanzen für das Training zeigt eindeutig, dass die größte Steigerung zwischen erster und zweiter Trainingssitzung zu sehen und auch hochsignifikant ist ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11)=37,982$ ). Zwischen den ersten zwei Trainingssitzungen ist auch der Unterschied der einzelnen Trainingsblöcke zueinander hochsignifikant ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33)=111,805$ ). Zwischen zweiter und dritter Trainingssitzung lässt sich keine signifikante Reaktionszeitsteigerung mehr erkennen ( $p < 0,531$ ,  $F(1,11)=0,418$ ), zwischen den einzelnen Trainingsblöcken hingegen schon ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33)=8,636$ ). Innerhalb der letzten zwei Trainingssitzungen gibt es auch keine signifikante Steigerung mehr zwischen den Trainingssitzungen ( $p < 0,772$ ,  $F(1,11)=0,089$ ) und auch der Effekt zwischen den einzelnen Trainingsblöcken verliert an Signifikanz ( $p < 0,036$ ,  $F(3,33)=3,209$ ).

Auch für die allgemeine RZ wurde wie schon bei der Leistung für die motorische Aufgabe ein Vergleich zwischen den ersten zwei Blöcken jeweils der Testsitzungen als auch der Trainingssitzungen durchgeführt. Auch hier war wieder ein signifikanter Effekt zwischen den Testphasen und Trainingssitzungen zu erkennen ( $p < 0,000$ ,  $F(5,55)=18,749$ ). Ebenso war auch wieder der Effekt zwischen den einzelnen Blöcken hochsignifikant ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11)=47,148$ ).



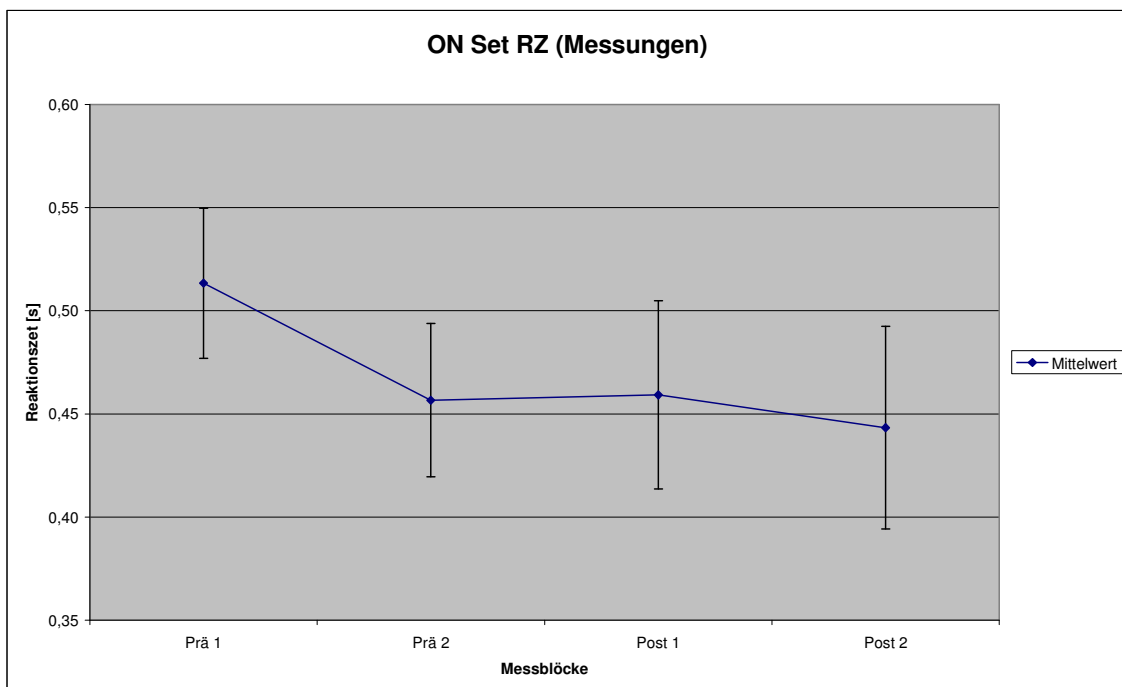


**Abb. 9 Allgemeine RZ (Training)**

Veränderung der über alle VPs gemittelten Reaktionszeiten im Verlauf des Trainings

### 3.1.2.2 Die Onset Reaktionszeit

Wie schon oben erwähnt, beschreibt die Onset RZ die Zeit, die bis zum Drücken des ersten Tasters vergangen ist. Für die Testsitzungen ergab sich keine signifikante Änderung der Onset RZ, weder zwischen den zwei Testsitzungen ( $p < 0,426$ ,  $F(1,11) = 0,684$ ), noch innerhalb der einzelnen Blöcke ( $p < 0,120$ ,  $F(1,11) = 2,840$ ). Die VPs begannen in der Prä-Testsitzung im ersten Prä-Testblock mit einem Onset von 0,51 s (0,29 - 0,67 s, SD = 0,04 s) und steigerten sich im zweiten Prä-Testblock auf 0,46 s (0,24 - 0,65 s, SD = 0,04 s). Im ersten Post-Testblock erreichten die VPs nochmals 0,46 s (0,23 - 0,74 s, SD = 0,05 s) und im zweiten Post-Testblock konnten sie sich auf 0,44 s (0,23 - 0,85 s, SD = 0,05 s) steigern.



**Abb. 10 On-Set-RZ (Messungen)**

Veränderung der On-Set RZ im Verlauf der Testphasen gemittelt über alle VPs.

Im Training war im Vergleich zu den Testphasen eine hoch signifikante Änderung der Onset RZ zu sehen. Zwischen den einzelnen Trainingssitzungen war der Effekt hochsignifikant ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33) = 22,075$ ) und ebenso zwischen

den einzelnen Trainingsblöcken der Trainingssitzungen ( $p < 0,000$ ,  $F(3,33) = 22,298$ ).

In der ersten Trainingssitzung benötigten die Probanden im Durchschnitt 0,71 s (0,39 - 0,97 s, SD = 0,06 s). In der zweiten Trainingssitzung reagierten sie schon schneller mit durchschnittlich 0,51 s (0,15 - 0,77 s, SD = 0,05 s). In der dritten und vierten Trainingssitzung lag die mittlere Onset Zeit bei 0,46 s; dritte Trainingssitzung (0,16 - 0,69 s, SD = 0,05 s) und vierte Trainingssitzung (0,16 - 0,66 s, SD = 0,05 s).

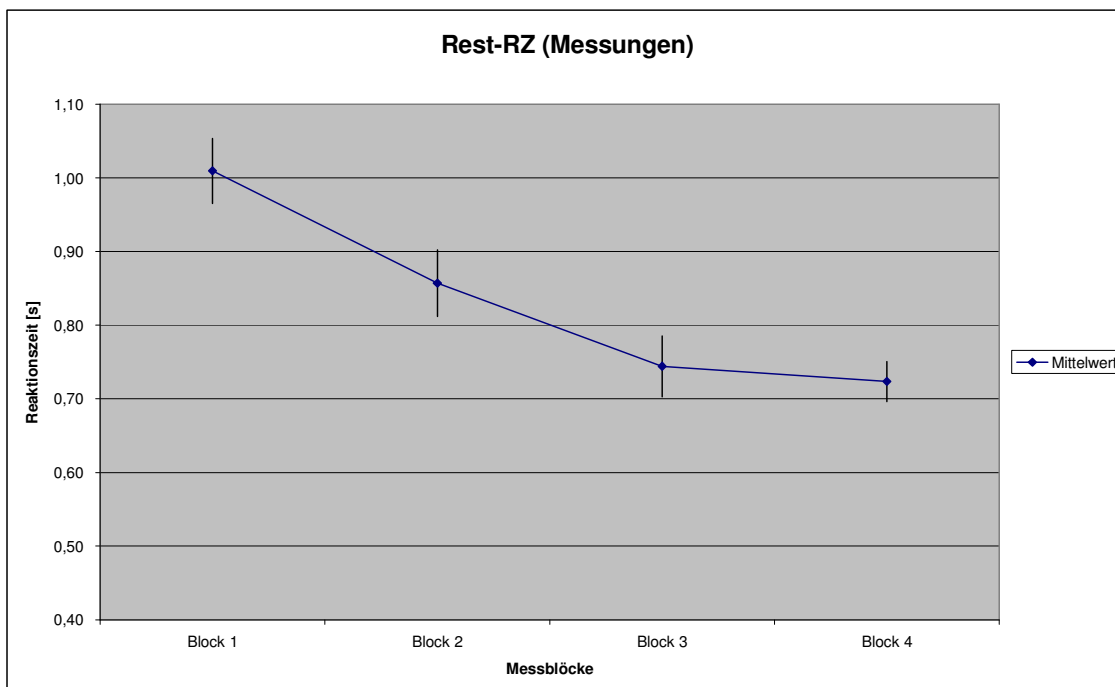


**Abb. 11 On-Set-RZ (Training)**

Verbesserung der On-Set-Rz im Verlauf des Trainings gemittelt über alle VPs.

### 3.1.2.3 Die Rest RZ

Die Rest RZ, repräsentiert die Zeit zwischen dem zweiten und letzten Drücken der Taster. Sie steht für die Reaktionszeit der motorischen Aufgabe. Im Vergleich zur Onset RZ gab es bei der Rest RZ schon in den zwei Testsitzungen hochsignifikante Veränderungen der Reaktionszeiten. Die Änderung war sowohl zwischen den zwei Testsitzungen ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11) = 29,846$ ) als auch zwischen den einzelnen Testsitzungsblöcken der zwei Testsitzungen ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11) = 34,110$ ) hochsignifikant verschieden. Im ersten Prä-Testblock zeigte sich eine mittlere Rest-RZ von 1,01 s (0,71 - 1,26 s, SD = 0,04 s) während im zweiten Prä-Testblock schon nur noch im Schnitt 0,86 s (0,71 - 1,19 s, SD = 0,04 s) benötigt wurden. Im ersten Post-Testblock lag die durchschnittliche Rest-RZ bei 0,74 s (0,58 - 0,97 s, SD = 0,04 s) und im zweiten Post-Testblock brauchten die Probanden nur noch im Mittel 0,72 s (0,61 - 0,87 s, SD = 0,03 s)

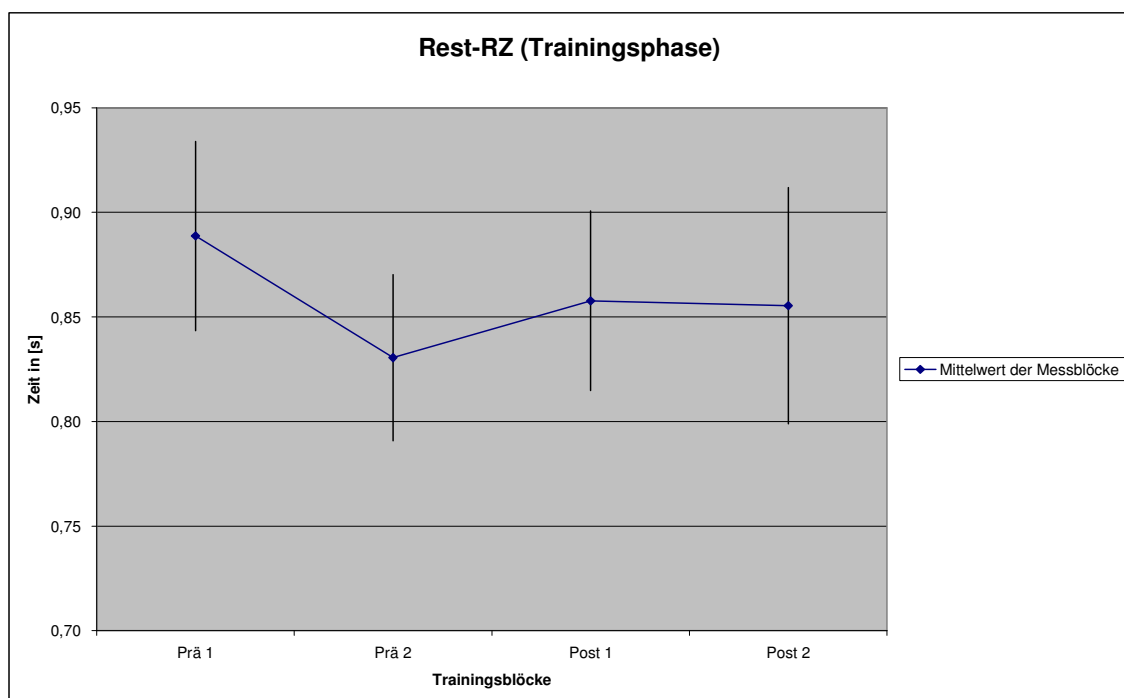


**Abb. 12 Rest-RZ (Messungen)**

Verlauf der Rest-Rz innerhalb der Testphasen, gemittelt über alle VPs.

Im Training war nur zwischen den einzelnen Blöcken einer Trainingssitzung ein

hochsignifikanter Effekt zu sehen ( $p < 0.000$ ,  $F(3,33) = 14,054$ ). Die Trainingssitzungen unterschieden sich nicht signifikant voneinander ( $p < 0,497$ ,  $F(3,33) = 0,811$ ). In der ersten Trainingssitzung lag die mittlere Rest-RZ bei 0,89 s (0,66 - 1,12 s, SD = 0,05 s) und in der zweiten wurden bereits nur noch 0,83 s (0,67 - 1,09 s, SD = 0,04 s) im Schnitt benötigt. Die dritte und vierte Trainingssitzung wiesen eine gleiche mittlere Rest-RZ von 0,86 s auf; dritte Trainingssitzung (0,68 - 1,11 s, SD = 0,04 s) und vierte Trainingssitzung (0,66 - 1,36 s, SD = 0,06 s).



**Abb. 13 Rest-RZ (Trainingsphase)**

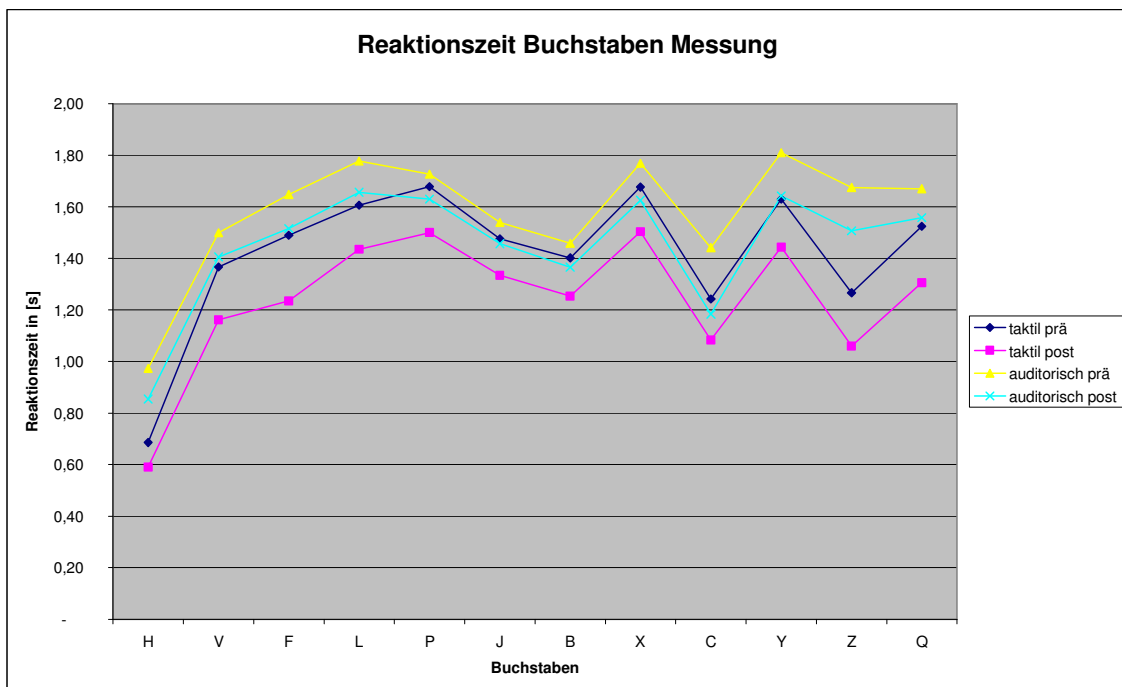
Dargestellt ist die Entwicklung der gemittelten Rest RZ über den gesamten Trainingsverlauf, gemittelt über alle VPs.

### 3.1.2.4 Reaktionszeiten auf die verschiedenen Buchstaben der auditorischen und taktilen Aufgabe

In der Abb.: 14 sind die Reaktionszeiten auf die einzelnen Buchstaben im Kurvenverlauf für beide (auditorische und taktile) Modalitäten zu sehen. Auffällig daran ist, dass der Kurvenverlauf in beiden Modalitäten etwa gleich ist. Er bleibt auch in der Post-Testsitzung fast gleich, mit dem Unterschied dass die

Reaktionszeiten schneller sind und somit die Kurve weiter nach unten verschoben erscheint. Für die auditorische Aufgabe ist ein hochsignifikanter Effekt zwischen Prä- und Posttestsitzung zu sehen ( $p < 0,010$ ,  $F(1,11) = 9,668$ ). In der taktilen Aufgabe zeigt sich sogar ein noch ausgeprägterer hochsignifikanter Effekt ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11) = 25,017$ ).

Um zu untersuchen, ob einige Buchstaben schneller verarbeitet werden als andere wurde eine statistische Analyse der Reaktionszeiten getrennt für die unterschiedlichen durchgeführt und es ergab sich sowohl für die auditorische als auch für die taktile Aufgabe ein hochsignifikantes Ergebnis, was sich schon aus dem Kurvenverlauf vermuten ließ: auditorisch ( $p < 0,000$ ,  $F(11,121) = 40,494$ ) und taktil ( $p < 0,000$ ,  $F(11,121) = 27,604$ ).



**Abb. 14 Reaktionszeit Buchstaben (Messung)**

Dargestellt sind die Reaktionszeiten für jeden einzelnen Buchstaben für die auditorische (gelb und türkis) und taktile (Blau und Pink) Aufgabe in jeweils der Prä- und Post-Testphase, gemittelt über alle VPs.

Aus den Diagrammen lässt sich deutlich ablesen, welche Buchstaben eine geringere Reaktionszeit benötigten. Der Buchstabe „H“ (entspricht ▶ ▶ ▶ ▶) ist der einfachste zu erkennende Buchstabe, da er einen einfachen und

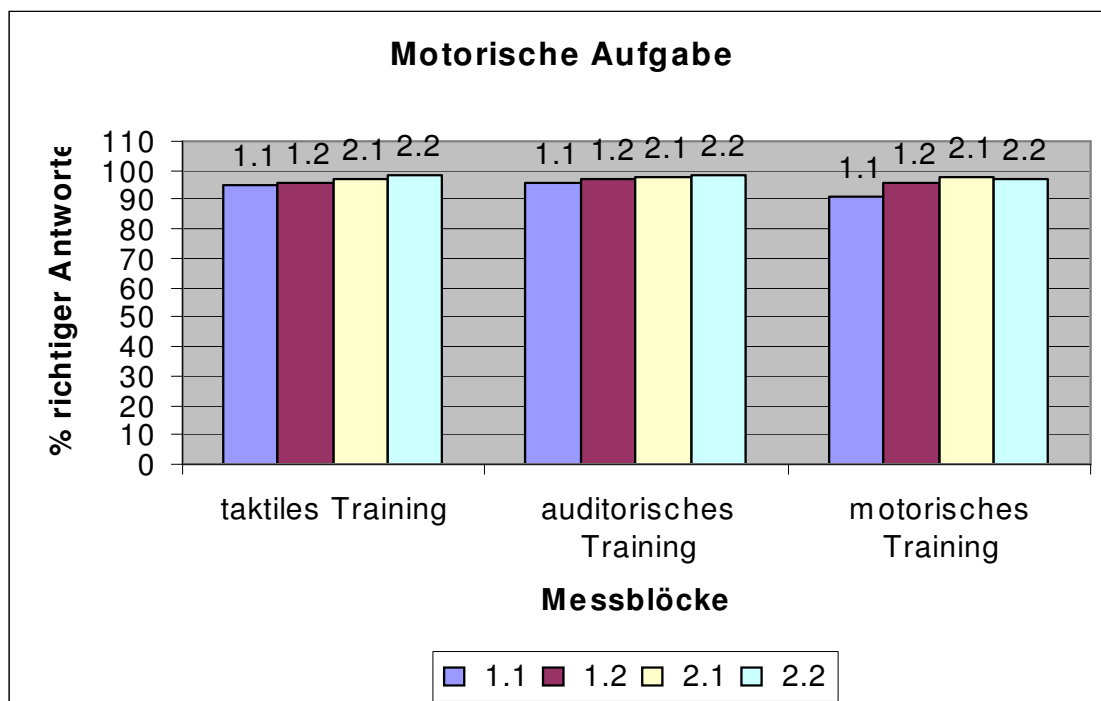
homogenen Pfeilcode ohne Richtungswechsel besitzt. Schon in der Prä-Testsitzung gelang es den meisten VPs diesen Buchstaben auch ohne zugehörigen Pfeilcode sicher zu erkennen. Die restlichen Buchstaben lassen sich in zwei Gruppen einteilen: 1. Gruppe: Buchstabe dessen Pfeilcode ein spiegelverkehrtes Muster innerhalb des Pfeilcodes aufweist; 2. Gruppe: Buchstaben deren Pfeilcode mehrere Richtungswechsel aufweist und die leicht mit einem Buchstaben mit ähnlicher Pfeilcode verwechselt werden können, da der Pfeilcode sehr ähnlich ist.

Zur ersten Gruppe gehören z.B. die Buchstaben „Z“ (◀◀▶▶) und „C“ (◀▶◀▶). Die zweite Gruppe beinhaltet z.B. die Buchstaben „F“ (▶▶◀▶), „L“ (▶◀▶▶), „P“ (▶◀◀▶), „X“ (◀▶▶◀), „Y“ (◀▶◀◀) und „Q“ (◀◀▶◀).

### 3.1.2.5 Vergleich der Messungen aller Gruppen mit unterschiedlichen Trainingsmodalitäten

Hierfür wurden alle Testsitzungen der drei Studienteile, die in der gleichen Modalität dargeboten wurden miteinander verglichen. Bsp.: Vergleich aller Testsitzungen der in der motorischen Modalität dargebotenen Aufgabe von allen drei Trainingsgruppen.

Für die motorische Aufgabe ergab sich ein hoch signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Testsitzungen ( $p < 0.0001$ ,  $F(1,11)=38,802$ ). Auch zwischen den Testsitzungsblöcken ergab sich ein signifikanter Effekt ( $p < 0.0054$ ,  $F(1,11)=11,940$ ). Ein dritter signifikanter Unterschied war in der Interaktion Testsitzung  $\times$  Testsitzungsblock zu sehen ( $p < 0.0054$ ,  $F(1,11)=11,905$ ). Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass dieser Effekt hauptsächlich durch die Leistungssteigerung zwischen in der Prä-Testsitzung zwischen dem erstem und zweitem Block verursacht wird.



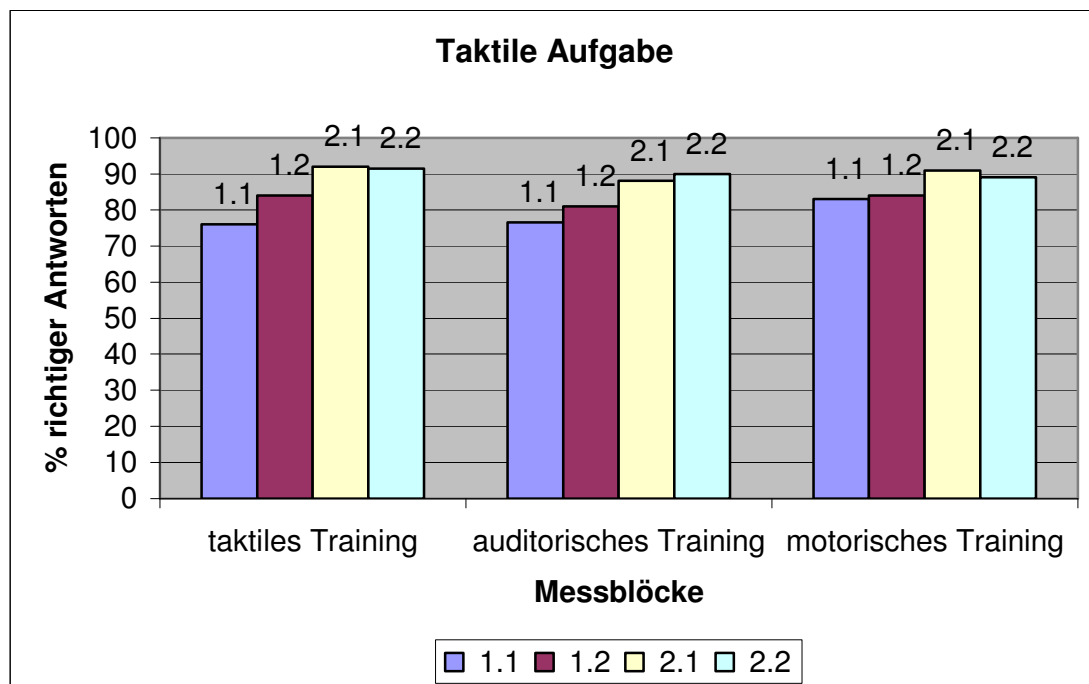
**Abb. 15 Motorische Aufgabe**

Die Darstellung zeigt den Effekt zwischen den Testsitzungen der motorischen Aufgabe für alle drei Trainingsmodalitäten anhand des Prozentsatzes richtiger Antworten in der Prä- und



Posttestmessung, gemittelt über alle VPs.

In der taktilen Aufgabe zeigte sich wie auch bei der motorischen Aufgabe der Leistungszuwachs mit der höchsten Signifikanz zwischen den beiden Blöcken der Prä-Testsitzungen ( $p < 0,0001$ ,  $F(1,11)=207,187$ ). Bei den Post-Testsitzungsblöcken war der Effekt nicht so deutlich aber immer noch signifikant ( $p < 0,0136$ ,  $F(1,11)=8,937$ ). Weiterhin zeigte sich in der taktilen Aufgabe ein hoch signifikanter Unterschied in der Interaktion Testsitzung x Testsitzungsblock ( $p < 0,0072$ ,  $F(1,11)=11,330$ ), der auf einen höheren Leistungszuwachs innerhalb der Prä-Testsitzung im Vergleich zur Post-Testsitzung zurückgeht.

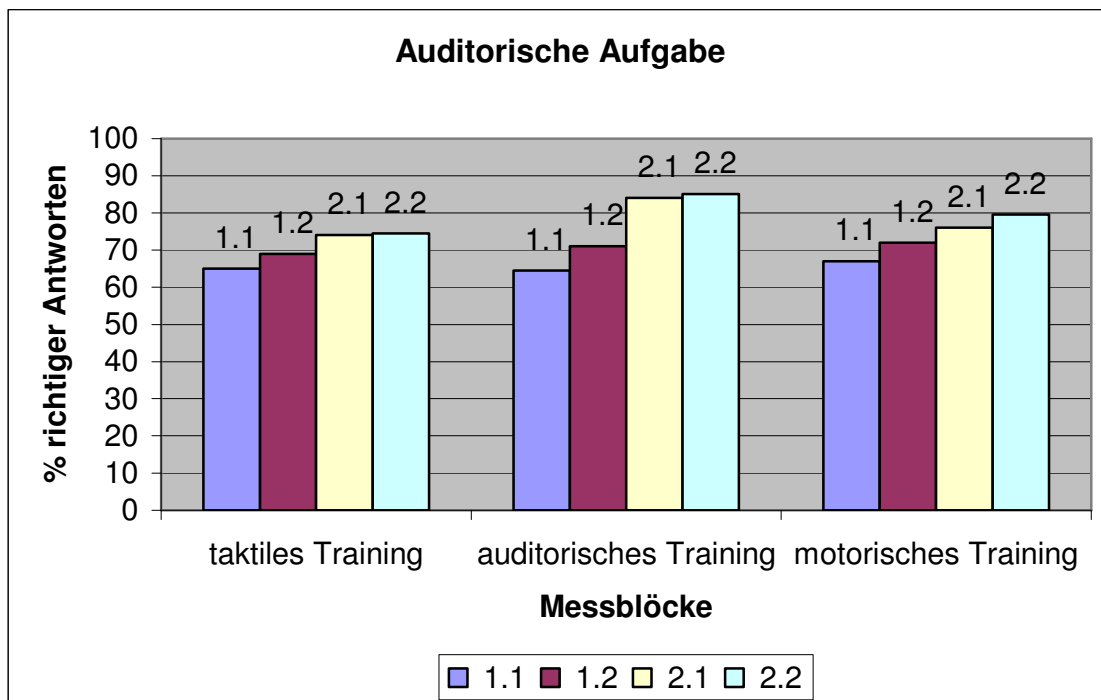


**Abb. 16 Taktile Aufgabe**

Die Darstellung zeigt den Effekt zwischen den Testsitzungsblöcken der taktilen Aufgabe, gemittelt über alle VPs.

Für die auditorische Aufgabe ergaben sich ähnlich wie bei den anderen zwei Aufgaben ein hochsignifikanter Effekt zwischen den Testsitzungen ( $p < 0,0001$ ,  $F(1,11)=114,583$ ), ein ebenfalls hochsignifikanter Effekt zwischen den Testsitzungsblöcken ( $p < 0,0027$ ,  $F(1,11)=14,887$ ) und ein hochsignifikanter

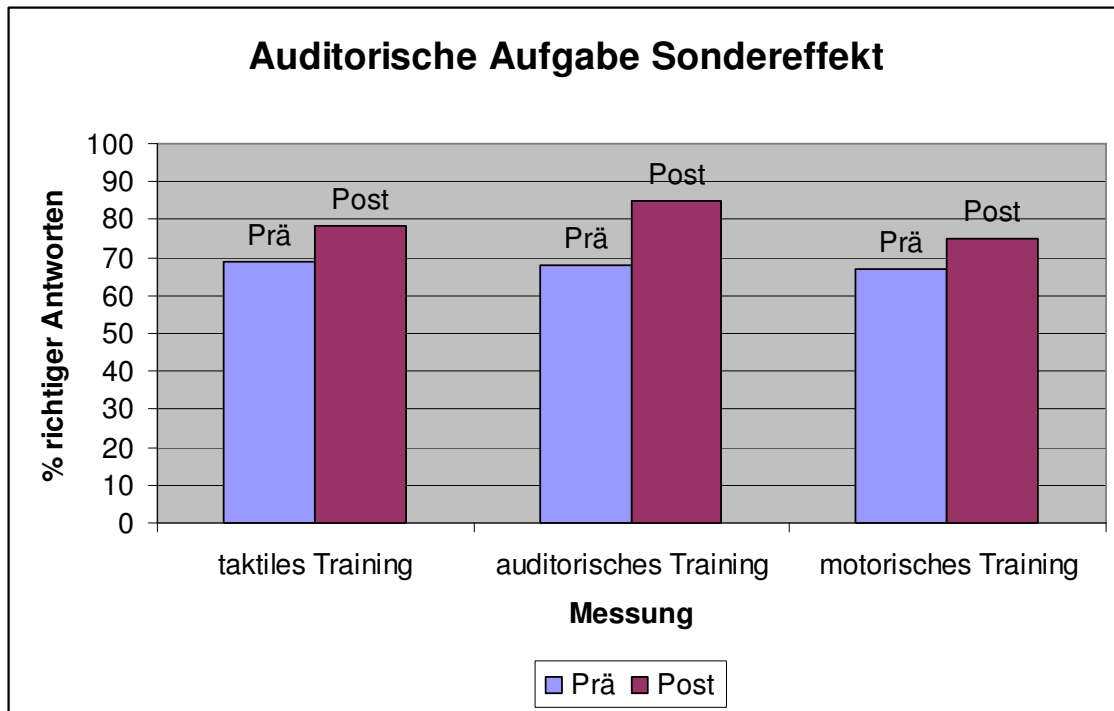
Effekt in der Interaktion Testsitzung x Testsitzungsblock ( $p < 0,0082$ ,  $F(1,11)=10,334$ ). Auch hier liegt der Unterschied wieder zwischen den Testsitzungsblöcken der Prä-Testsitzung.



**Abb. 17 Auditorische Aufgabe**

Die Darstellung zeigt den Effekt zwischen den Testsitzungsblöcken der auditorischen Aufgabe, gemittelt über alle VPs.

Interessanterweise ergab sich für die auditorische Aufgabe noch ein weiterer signifikanter Effekt, der bei den anderen zwei Aufgaben nicht auftrat. Dieser lag in der Interaktion Gruppe x Testsitzung ( $p < 0,0104$ ,  $F(2,22) = 5,666$ ). Aus der Darstellung lässt sich ableiten, dass der Effekt zwischen Prä- und Post-Testsitzung der auditorisch trainierten Gruppe liegen muss.



**Abb. 18 Auditorische Aufgabe Sondereffekt**

Die Darstellung zeigt den Effekt Gruppe x Testsitzung für die auditorischen Aufgabe. Es zeigt sich eine Signifikanz in der Gruppe auditorisches Training von Prä zu Post

## **3.2 Die MEG-Daten**

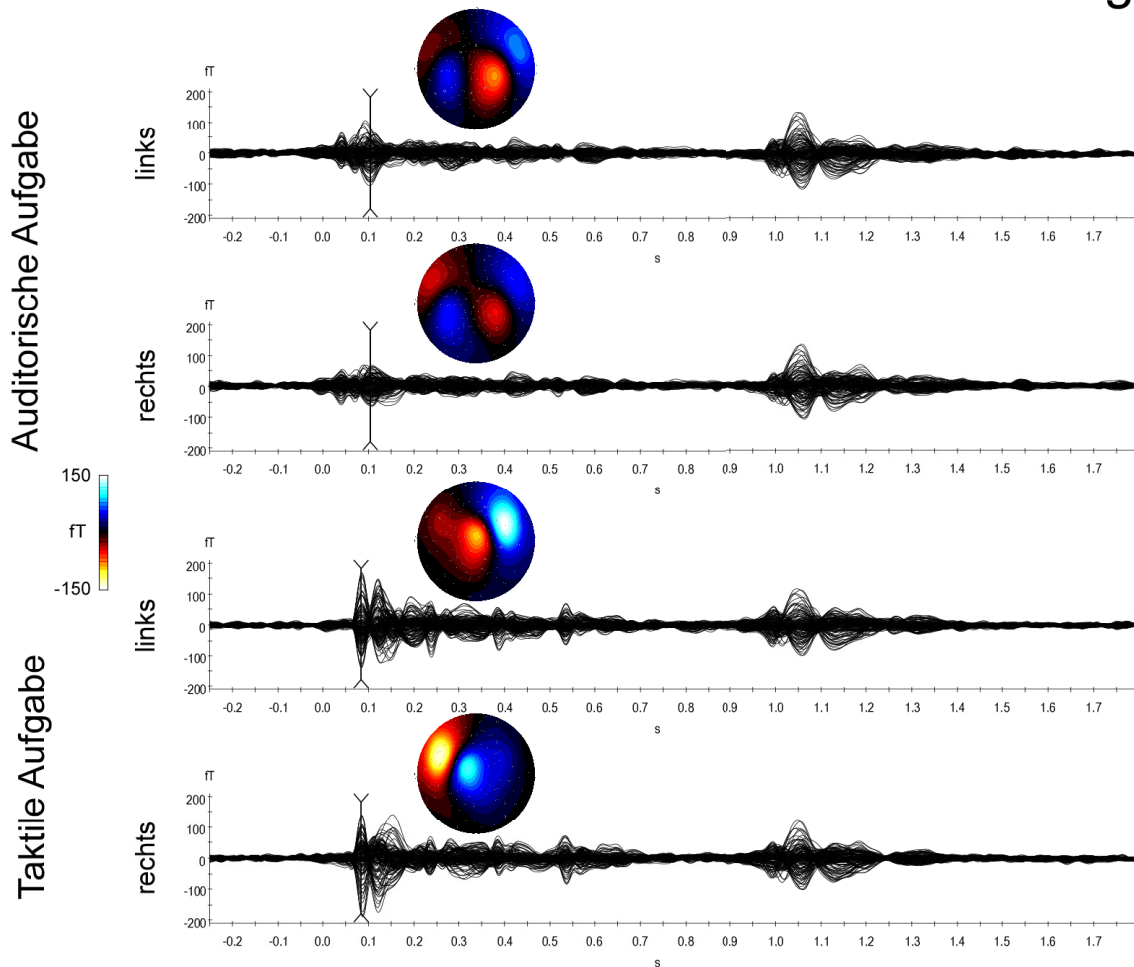
Die MEG-Daten beschreiben die kortikale Aktivität der Probanden bei Ausführung der ihnen vorgegebenen Aufgaben vor und nach dem Training. Die MEG-Daten wurden, ebenso wie die Verhaltensdaten, über den gesamten Verlauf der Studie aufgezeichnet und für eine spätere Auswertung gespeichert. Die Auswertung dieser Daten erfolgte in zwei Schritten:

1. Frühe Antworten – hier wurde die Aktivität derjenigen Antworten, die durch das erste Element der Reizabfolge ausgelöst wurde, mit Hilfe der zeitlichen Aktivitätsverläufe der Dipole in den Prä- und Post-Testphasen verglichen. Die Dipole wurden vorher an die Feldverteilung gemäß den auditorischen und taktilen Testblöcken angepasst. Hiermit wurde die Dipolaktivität der 4 Dipolquellen aus den Zeitverläufen der Magnetfeldverteilung berechnet.
2. Späte Antworten – hierfür wurde der Bereich im zeitlichen Abschnitt zwischen letztem Element der Reizabfolge und Einsetzen der visuellen Darbietung auf topographische Veränderungen geprüft.

### **3.2.1 Frühe Antworten**

Die Aktivitätsverläufe der 151 Sensorkanäle der auditorischen und taktilen Messblöcke sind anhand der Aufzeichnungen im Grand Average in Abb. 19 dargestellt. Diese Abb. zeigt auch die Feldverteilung zum Zeitpunkt der höchsten Aktivität des P50m- bzw. des N1m-Aktivitätsgipfels dieser Blöcke.

# Motorisches Training



**Abb. 19 Aktivitätsverläufe und topographische Feldverteilung der auditorischen und taktilen Aufgabe bei motorischem Training**

Darstellung der Aktivitätsverläufe während der auditorischen (oben) und taktilen (unten) Aufgabe im Grand Average. Die Pfeile markieren die Antworten auf den ersten Stimulus der Codezeichen. Dieser Zeitbereich (0,0 – 0,25 s) wurde für die Analyse der frühen Antworten herangezogen. Ausserdem sind in der Abb. noch die zu dem mit dem Pfeil markiertem Zeitpunkt zugehörigen topographischen Feldverteilungen dargestellt.

Zur Lokalisation und Orientierung der Dipole wurden die Feldverteilungen der auditorischen und taktilen Einzelblöcke herangezogen.

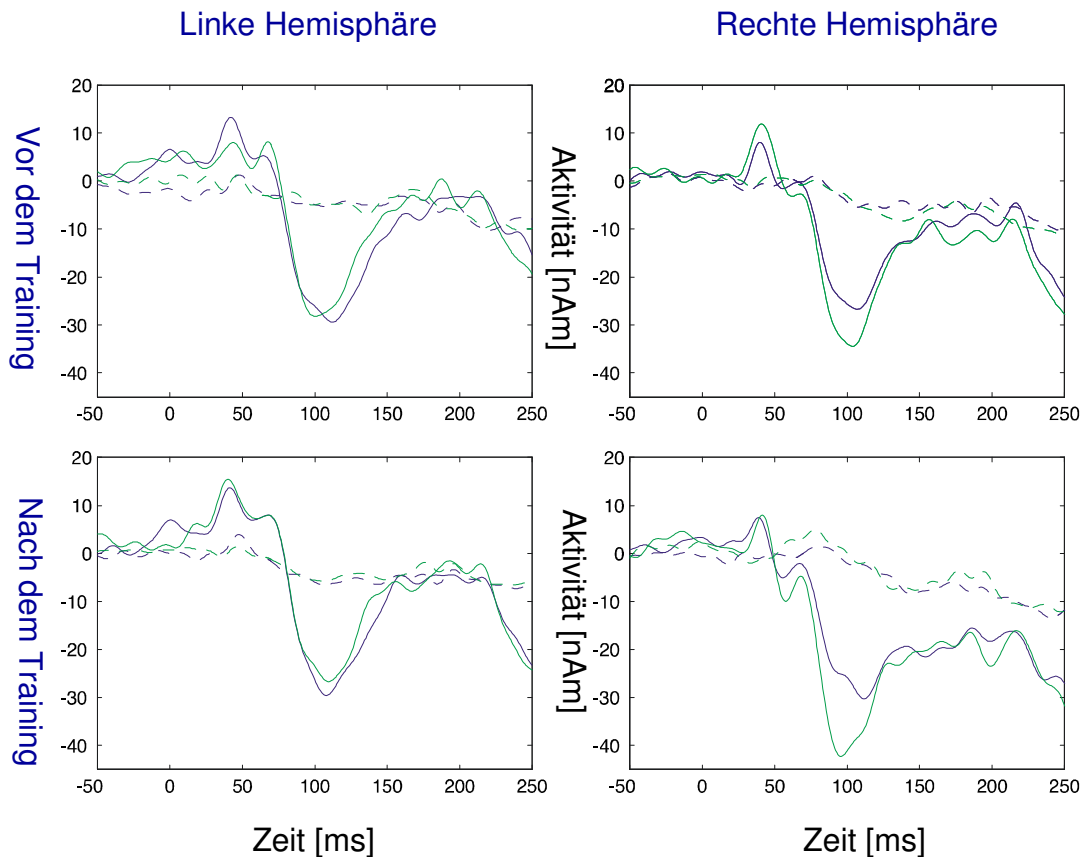
Für die auditorischen Dipole wurde das Feld des N1m-Aktivitätsgipfels (erste große Antwort) verwendet. Die Latenzen der Dipole lagen hierbei zwischen 85,6 und 126,4 ms, gerechnet ab dem Beginn der Reizfolge. Bei den taktilen Dipolen nahm man das Feld des P50m-Aktivitätsgipfels. Für die Latenzzeiten galt hier ein Bereich zwischen 77,6 und 126,4 ms. Da durch den Stimulationsaufbau bei

der taktilen Aufgabe allgemein eine Verzögerung der taktilen Antworten von 40ms entstand mussten die Latenzzeiten noch um diesen Wert korrigiert werden, so dass die Latenzen einem Bereich zwischen 37,6 und 86,4 ms entsprachen.

Abb. 19 zeigt die Aktivitätsverläufe der auditorischen und taktilen Dipole in der jeweiligen Aufgabe. In der Abbildung ist der zeitliche Verlauf, getrennt nach sowohl Stimulationsseite (rechts oder links) als auch Dipolen (auditorisch oder taktil), für die Prä- und Post-Testsitzung exemplarisch an der linken Hemisphäre dargestellt.

### 3.2.1.1 Die Auditorische Aufgabe

In der auditorischen Aufgabe ist sowohl in allen Prä- als auch in allen Post-Testblöcken genauso wie in beiden Hemisphären bei ca. 40ms ein erster kleiner positiver Aktivitätsgipfel zu sehen. Darauf folgt ein weitaus deutlicherer negativer Aktivitätsgipfel zwischen 90 & 110ms (N1m). In Abb.20 ist der zeitliche Aktivitätsverlauf der Dipole während der auditorischen Aufgabe in der Prä- und Post-Testmessung zu sehen (auch hier wieder exemplarisch an der linken Hemisphäre). Für die statistischen Analysedaten wurden, im Gegensatz zu den grafisch dargestellten Verläufen, robuste Mittelwerte aus der Bootstrap – Methode verwendet.



**Abb. 20 Aktivitätsverläufe der auditorischen Dipole**

Darstellung der Aktivitätsverläufe der auditorischen Dipole in der auditorischen Aufgabe vor und nach dem Training. Die Farben codieren die Stimulationsseite (grün = links, blau = rechts) und die Unterschiedlichen Linien codieren den Messort im Kortex (durchgezogene Linie = auditorischer Kortex / S2, gestrichelte Linie = somatosensorischer Kortex / S1)

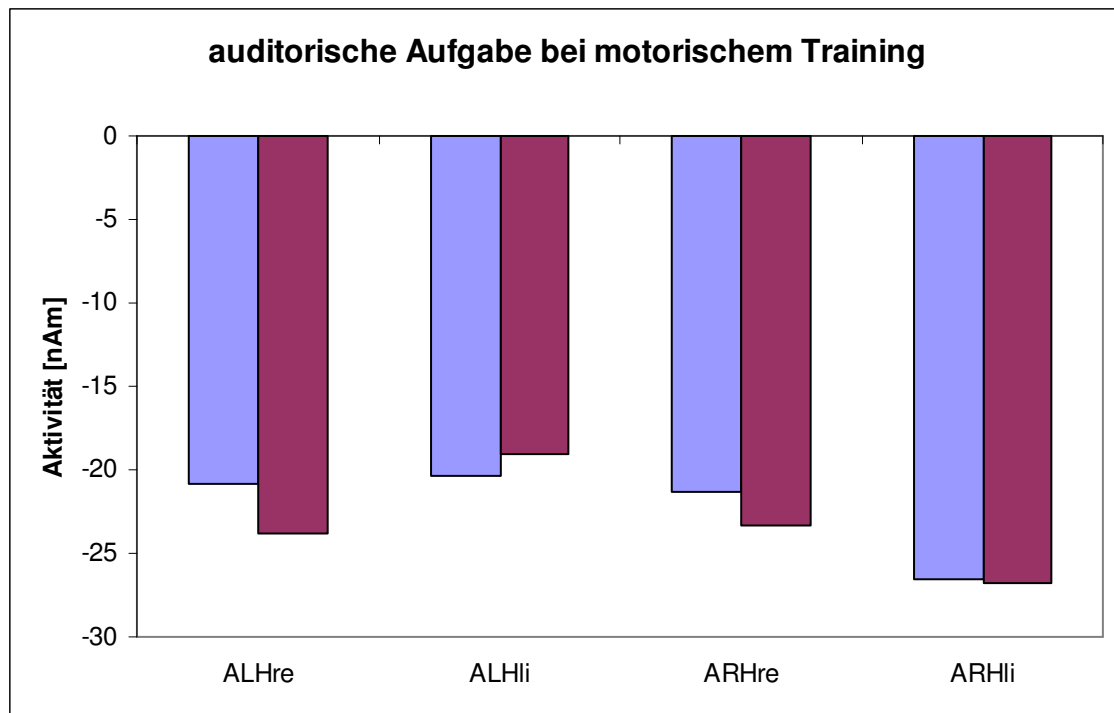
In der folgenden statistischen Auswertung wurde hauptsächlich auf den Seiten- und Trainingseffekt für beide Hemisphären geachtet.

Wie schon in vorherigen Studien belegt worden ist, treten kortikale Antworten auf auditorische Stimulationen im A1 beider Hemisphären auf.

Für die Prä-Testsitzung ergab sich in der linken Hemisphäre (LH) im Bereich des N1m -Aktivitätsgipfels (rMW (rechte Stimulation)= - 20,7803nAm; rMW (linke Stimulation)= -20,3753nAm) ein signifikanter Seitenunterschied ( $Z = -2,2275$ ). Für die rechte Hemisphäre (RH) (rMW (linke Stimulation)= - 26,5768nAm; rMW (rechte Stimulation)= -21,3087nAm) war der signifikante Effekt noch deutlicher ( $Z = 5,6981$ ). Auffällig war hier, dass jeweils auf der kontralateralen Seite die Aktivität höher war als auf der ipsilateralen Seite.

Nach der Trainingsphase ergaben sich zwar für beide Hemisphären veränderte Aktivitäten (LH: rMW (linke Stimulation)= -19,0371nAm; rMW (rechte Stimulation)= -23,7873nAm; RH: rMW (linke Stimulation)= -26,7281nAm; rMW (rechte Stimulation)= -23,3458nAm), jedoch war der Trainingseffekt weder für die linke, noch für die rechte Hemisphäre signifikant (LH:  $Z = -1,4929$ ; RH:  $Z = -0,5121$ ).





**Abb. 21 Auditorische Aufgabe bei motorischem Training**

A steht für auditorisch, LH für linke Hemisphäre, RH für rechte Hemisphäre, li für Stimulation linke Körperhälfte, re für Stimulation rechte Körperhälfte

### 3.2.1.2 Die taktile Aufgabe

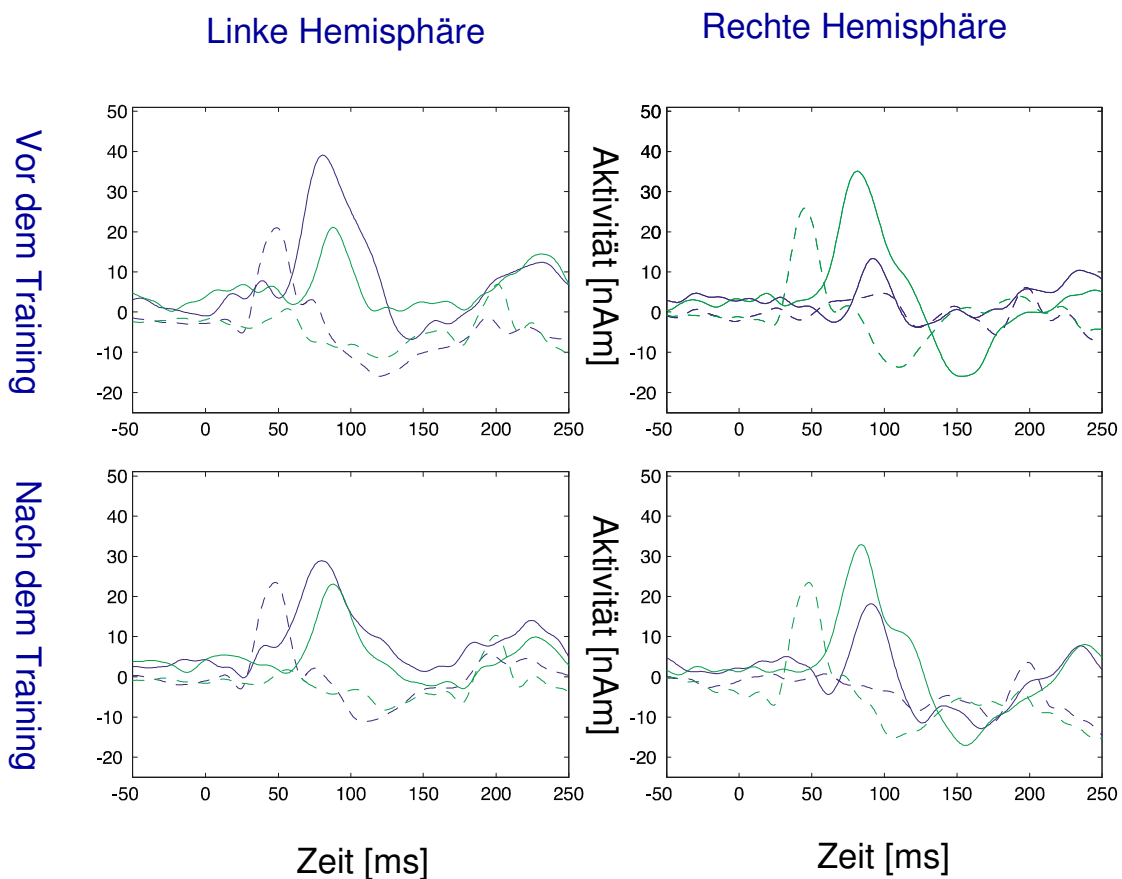
In der taktilen Aufgabe ergab sich das Aktivitätsmaximum für die taktilen Dipole in beiden Hemisphären ein Zeitbereich zwischen 30 – 50 ms (P50m). Des Weiteren war in beiden Hemisphären ein weiterer Aktivitätsgipfel im Aktivitätskurvenverlauf der Aktivitätsquellen zu sehen. Dieser lag bei 70 – 90 ms. Meine Vermutung ist, dass es sich hierbei um eine späte bilaterale Antwort des sekundär somatosensorischen Kortex (S2) handelt. Schon in früheren Studien wurde davon berichtet, dass der kontralateralen frühen und mittleren Antwort des S1 eine späte bilaterale Antwort des S2 folgt. Der S2 befindet sich in unmittelbarer Nähe zum auditorischen Kortex. Anhand der Ausrichtung der Dipole lassen sich diese aber eher zum S2 Areal zuordnen als zum auditorischen Kortex (A1).

Die Aktivitätsverläufe für die Dipole der S1 und S2 Antwort sind in dem gewählten Zeitbereich mittels der gemittelten Daten für die linke Hemisphäre abgebildet. Für die S1 Dipole (Zeitbereich des P50- Aktivitätsgipfels) ergab sich

in beiden Hemisphären in der Prä-Testsitzung ein deutlich signifikanter Seitenunterschied. Für die linke Hemisphäre (LH: rMW (rechte Stimulation) = 14,7524nAm; rMW (linke Stimulation) = -0,5245nAm) ergab sich eine Signifikanz von  $Z = 8,1215$ . In der rechten Hemisphäre (RH: rMW (rechte Stimulation) = 0,4311nAm; rMW (linke Stimulation) = 12,4804nAm) war der Effekt nicht ganz so deutlich ( $Z = -7,9911$ ).

Nach dem Training war in der rechten Hemisphäre eine signifikante Aktivitätszunahme von  $Z = 3,2355$  (RH: rMW (linke Stimulation) = 14,4545nAm; rMW (rechte Stimulation) = -2,7511nAm) erkennbar. Die linke Hemisphäre wies keine signifikante Veränderung durch das Training auf:  $Z = 0,2832$  (LH: rMW (linke Stimulation) = -2,2601nAm; rMW (rechte Stimulation) = 12,795nAm).

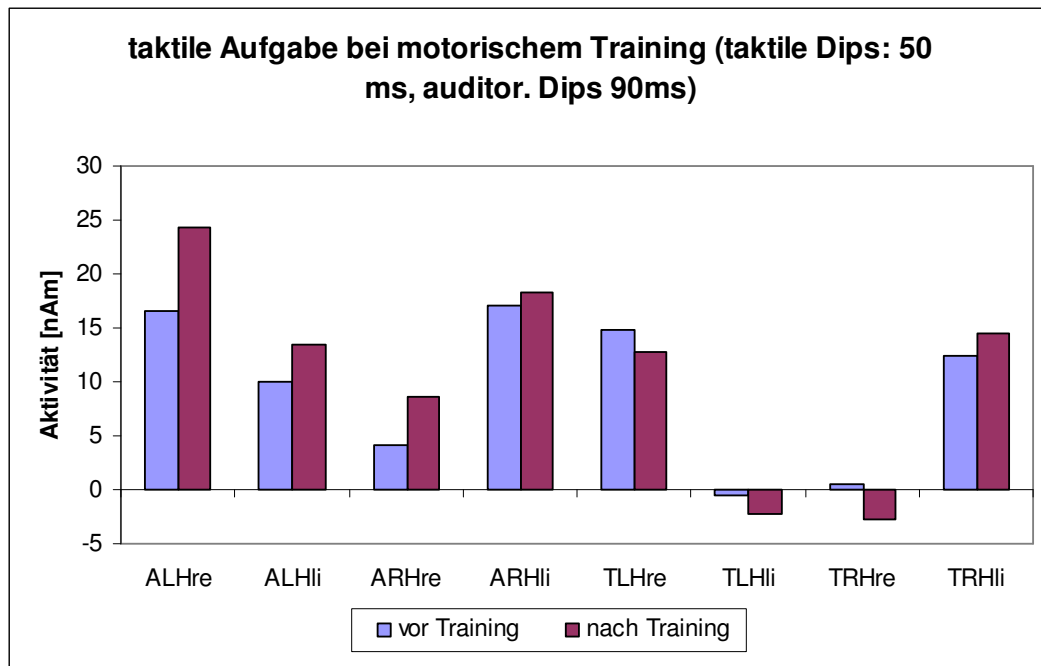
Auch für die S2 Dipole (Zeitbereich des 70 - 90ms Aktivitätsgipfel) ergab sich ein signifikanter Seitenunterschied für beide Hemisphären. In der linken Hemisphäre betrug er  $Z = 4,4711$  (LH: rMW (linke Stimulation) = 10,0271nAm; rMW (rechte Stimulation) = 16,497nAm) und in der rechten Hemisphäre ergab sich  $Z = -5,8883$  (RH: rMW (linke Stimulation) = 18,2608nAm; rMW (rechte Stimulation) = 8,6621nAm).



**Abb. 22 Aktivitätsverläufe der taktilen Dipole**

Darstellung der Aktivitätsverläufe der S1- und S2- Dipole anhand der linken Hemisphäre.

Im Vergleich mit den S1-Antworten gab es für die S2-Antworten im Training in keiner Hemisphäre einen signifikanten Seitenunterschied [LH: rMW (linke Stimulation) = 13,3793nAm; rMW (rechte Stimulation) = 24,3179nAm; Z (LH) = -0,2164; RH: rMW (linke Stimulation) = 18,2608nAm; rMW (rechte Stimulation) = 8,6621nAm; Z (RH) = 0,5250].

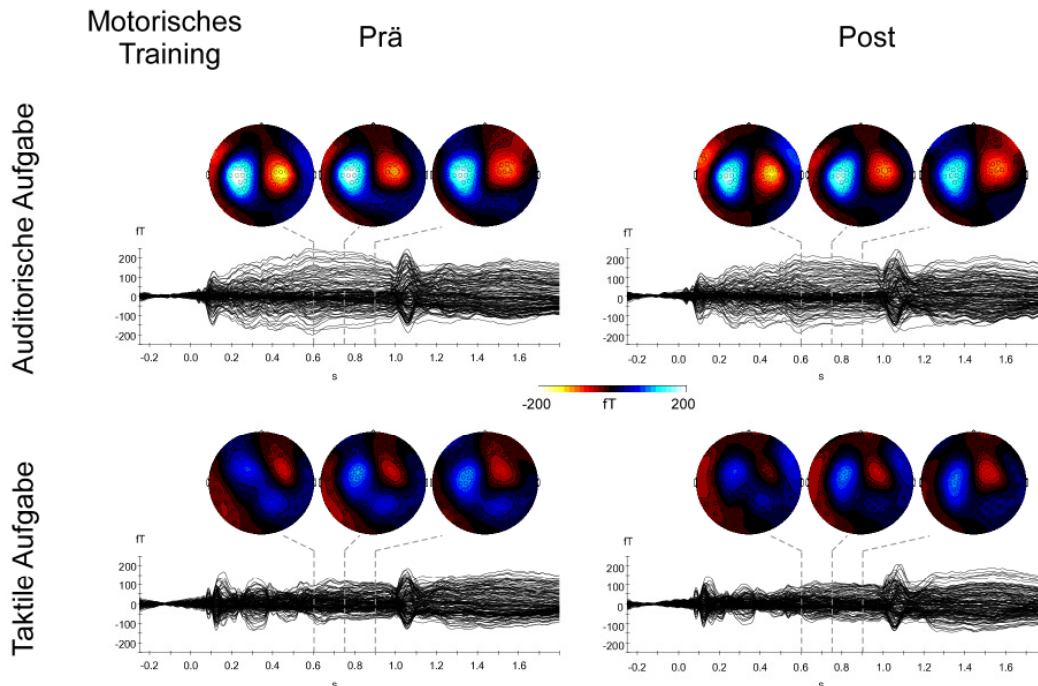


**Abb. 23 Aktivität der Dipole zum Zeitpunkt der P50m- (50ms) und P1m-Peaks (90ms)**

Die blauen Balken geben die Aktivität vor dem Training, die lila Balken die Aktivität nach dem Training an. In den 4 linken Abschnitten ist die Aktivität der auditorischen Dipole (A) der linken Hemisphäre (LH) und rechten Hemisphäre (RH) für linke (li) bzw. rechte (re) Stimulation zum Zeitpunkt des P100m Peak dargestellt. Die rechten Abschnitte zeigen in gleicher Form die Aktivität der taktilen (T) Dipole im P50m-Peak.

### 3.2.2 Die Späten Antworten

Für die Auswertung der späten kortikalen Antworten wurde der Zeitbereich von 600 – 900 ms auf Veränderungen untersucht. In der folgenden Abbildung (Abb. 24) sind die Aktivitätsverläufe der 151 Sensorkanäle (dargestellt in überlagerter Form) über den gesamten Durchgang für die Grand Averages der auditorischen und taktilen Prä- und Post-Testsitzungen gezeigt.



**Abb. 24 Aktivitätsverläufe der 151 Sensorkanäle und topographische Feldverteilung**

Darstellung der der Aktivitätsverläufe der 151 Sensorkanäle (überlagert) während des gesamten Trials für die auditorischen (90 ms) und taktilen (50 ms) Dipole der Prä- und Post-Testmessung. Ebenfalls dargestellt sind die topographischen Feldverteilungen anhand von zweidimensionalen Kopfmodellen. Für jeden Grand Average sind Topogaphien von drei Zeitpunkten innerhalb des Zeitfensters (0,6 – 0,9 s) dargestellt. Rot kennzeichnet eintretende und blau austretende Feldlinien.

In allen Kurven der Prä- und Post-Testsitzungen lassen sich deutlich spezifische Aktivitätsgipfel erkennen. Diese stehen für die vier Stimulationen und den Anfang der visuellen Darbietung. Der Aktivitätsgipfelbeginn liegt jeweils ca. 1 s nach Stimulus On-Set. Für die taktile Aufgabe lässt sich des Weiteren nach der letzten Stimulation (ca. 520ms nach Stimulus On-Set) eine eindeutige Antwort erkennen, die sich durch das Training noch verstärkt wird.

Die Untersuchung der Topographien der auditorischen und taktilen Aufgabe im angegebenen Zeitbereich zwischen 600 und 900ms ergab zwar in jeder Hemisphäre ein sichtbar abgegrenztes Areal für ein- und austretende Feldlinien, jedoch ähnelten sie sich kaum im Vergleich zwischen den auditorischen und taktilen Feldern. Allerdings konnte festgestellt werden, dass sich die Topographie der taktilen Aufgabe in diesem Zeitbereich nach dem

Training verändert hatte und jener der auditorischen Aufgabe ähnelte. Die Areale der auditorischen Aufgabe waren weitgehend gleich geblieben. Durch die Topographie der Grand Averages der auditorischen Post-Testsitzung wurde nun eine Mustertopographie erstellt. Anhand dieser ließ sich die Ähnlichkeit der Topographie in den einzelnen Testsitzungsblöcken mit der Mustertopographie anhand einer Regressionsanalyse bestimmen.

Die auditorischen Testsitzungsblöcke zeichneten sich in allen Blöcken durch große Anteile der Mustertopographie aus. Für die Prä-Testsitzung ergaben sich folgende Mittelwerte: 1. Prätestsitzungsblock: 0,9067 (SD = 0,1178) und 2. Prä-Testsitzungsblock: 0,8475 (SD = 0,1061). In der Post-Testsitzung blieben die Werte in einem ähnlichen Bereich (1. Post-Testsitzungsblock: 0,8488) SD = 0,0930, und 2. Post-Testsitzungsblock: 0,8348 (SD = 0,0956)) und daher ergab sich zwischen Prä- und Post-Testsitzung auch kein signifikanter Unterschied ( $p < 0,601$ ,  $F(1,11) = 0,29$ ).

Die durchschnittlichen Anteile der Mustertopographie in der taktilen Aufgabe betragen für die Prä-Testsitzung im ersten Block 0,3172 (SD = 0,0996) und im zweiten Block 0,3607 (SD = 0,0909). In der Post-Testsitzung stieg der Anteil der Mustertopographie leicht an: 1. Post-Testsitzungsblock: 0,4647 (SD = 0,0756) und 2. Post-Testsitzungsblock 0,3992 (SD = 0,0623). Auch hier war der Unterschied zwischen Prä- und Post-Testsitzung nicht signifikant ( $p < 0,087$ ,  $F(1,11) = 3,534$ ).

Die Varianzanalyse der beiden Modalitäten auditorisch und taktil ergab einen hochsignifikanten Effekt im Vergleich der Modalitäten ( $p < 0,000$ ,  $F(1,11) = 78,15$ ). Allerdings war der Effekt im Vergleich der Prä- und Post-Testphasen nicht mehr signifikant ( $p < 0,533$ ,  $F(1,11) = 0,414$ ).

## 4. Diskussion

Sprache ist für uns Menschen ein essentieller Bestandteil des Lebens. Wir können uns nicht nur durch Sprache verständigen, auch unser Denken erfolgt zum größten Teil in Sprache. Sprache bestimmt somit nicht nur unsere kognitiven Fähigkeiten, sondern definiert darüber hinaus ganz wesentlich unsere Persönlichkeit.

Bei der Verarbeitung von Sprache im Gehirn wird zwischen Perzeption und Produktion unterschieden. Die Perzeption von Sprache findet in der dominanten Hemisphäre im sekundären auditorischen Kortex, dem so genannten Wernicke-Sprachzentrum statt. Hier werden neuronale Signale aus dem primären auditorischen Kortex, den Heschlschen Querwindungen, prozessiert und integriert. Die Lage des sekundären auditorischen Kortex ist dem primären auditorischen Kortex benachbart. Bei der perzeptiven Verarbeitung von Sprache werden aus dem auditorischen Reizeinstrom sprachrelevante Signale detektiert. Diese werden zu Phonemen und Wörtern integriert und den kortikalen Assoziationsarealen zugeführt. Die primären Stufen der Sprachverarbeitung die Detektion von Sprachlauten und deren Integration zu Wörtern und Phonemen erfolgt in der dominanten Hemisphäre. In dem entsprechenden Areal in der nicht-dominanten Hemisphäre wird dagegen die Sprachmelodie verarbeitet, die die affektive Komponente von Sprache, die Prosodie, bestimmt und auch für die Verarbeitung von Musik relevant ist.

Für die Produktion von Sprache ist das so genannte Broca-Areal verantwortlich. Das Broca-Areal liegt in der dominanten Hemisphäre im Bereich der Pars opercularis und nimmt Teile der Pars triangularis des Gyrus frontalis inferior ein. Im Gegensatz zum sekundären auditorischen Kortex ist dieses Areal nur in der dominanten Hemisphäre zu finden und hat keine funktionelle Entsprechung in der nicht-dominanten Hemisphäre. Im Broca-Areal wird Sprache in Wortlaut und

Satzbau geformt. Erst danach findet über Zwischenstationen eine Aktivierung der für das Sprechen zuständigen Muskelgruppen statt. (Trepel M., Kapitel 9.8.3 Motorisches Sprachzentrum. In Neuroanatomie Struktur und Funktion, Urban & Fischer(1999)).

Die vorliegende Studie ist Teil einer Serie von Experimenten, die die Änderungen der kortikalen Aktivität beim Erlernen eines Morse-ähnlichen Sprachcodes untersuchten. Mit den Experimenten sollten Schritte der Sprachverarbeitung charakterisiert werden und die Hirnaktivität beim Erwerb sprachlicher Fähigkeiten erforscht werden. Der Sprachcode, der in den Untersuchungen verwendet wurde, war aus einzelnen kurzen Elementen zusammengesetzt, die sprachliche Information in Form von Buchstaben vermittelten. Dieser Sprachcode wurde in verschiedenen Modalitäten, taktil, auditorisch und motorisch gelernt und nach dem Lernen in diesen Modalitäten getestet. Je eine der insgesamt drei Versuchspersonengruppen trainierte jeweils eine Modalität. Während eine Gruppe lernte, Buchstaben mit einer Abfolge von Tastendrücken der rechten und linken Hand zu assoziieren, lernten die beiden anderen Gruppen die Zuordnung von Buchstaben zu auditorischen und taktilen Reizabfolgen. Um zu prüfen, ob es aufgrund des Trainings zu einem intermodalen Transfer der erworbenen Sprachverarbeitung kommt, wurden die Leistung und die Hirnaktivierung bei der Zuordnung zwischen Buchstaben und Codesequenzen vor und nach dem Training in allen Gruppen und allen Modalitäten untersucht.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf dem Training in der motorischen Modalität und seiner Auswirkungen auf die Verarbeitung des Sprachcodes in der taktilen und auditorische Modalität. Von besonderem Interesse war es herauszufinden, ob das Training in der motorischen Modalität einen generalisierenden Effekt auf die beiden anderen, nicht trainierten Modalitäten besitzt. Ergebnisse des auditorischen und des taktilen Trainings auf die verschiedenen Modalitäten der Testaufgaben sollen im Folgenden ebenfalls berücksichtigt werden.



Im Ergebnis zeigte das motorische Training nicht nur eine fördernde Wirkung auf die Leistung im motorischen Test, sondern auch auf die Fehlerrate und Reaktionszeiten in den nicht eingeübten auditorischen und taktilen Testmodalitäten. Die Versuchspersonen konnten nach dem Training die motorischen Sequenzen mit den entsprechenden Buchstaben verknüpfen. Sie waren nach der Trainingsphase in der Lage, die Abfolge der Tastendrucke für einzelne Buchstaben schneller und mit weniger Fehlern zu produzieren. Die Probanden hatten somit eine motorische Repräsentation des Buchstabencodes erworben.

Im Alltag sind wir gewohnt, sprachliche Informationen nicht nur auditorisch, sondern auch in anderen Modalitäten zu verarbeiten. Beim Lesen wird beispielsweise visueller Input und beim Morsen auditorischer Input bzw. peripher motorischer Output genutzt bzw. generiert. Es stellt sich daher die Frage, ob der Erwerb eines neuen Sprachcodes modalitätsspezifisch erfolgt, oder ob dabei Verarbeitungsmechanismen erworben werden, die modalitätsunabhängig sind. Für den Fall eines modalitätsunabhängigen Mechanismus sollte man eine Generalisierung der trainierten Fähigkeiten auf andere Modalitäten erwarten. Weiterhin sollten trainingsinduzierte Muster der Hirnaktivität ebenfalls modalitätsunabhängig auftreten.

Aus den magnetenzephalographischen Aufzeichnungen der Hirnaktivität in den Prä- und Posttestsitzungen, den Fehlerraten und Reaktionszeiten in Test- und Trainingssitzungen, sowie aus den Ergebnissen der beiden Studien, in denen ein taktiler bzw. auditiver Sprachcode trainiert wurde, ergaben sich folgende Sachverhalte:

- Das motorische Training bewirkt eine Leistungssteigerung und eine Verkürzung der Reaktionszeit in der motorischen Aufgabe sowohl während des Trainings als auch in der Post-Testsitzung im Vergleich zur Prä-Testsitzung.
- Die Leistungssteigerung und die Reaktionszeitverkürzung in der

motorischen Aufgabe der Testmessungen sind unabhängig von der Trainingsmodalität. Das heißt, unabhängig davon, ob der Sprachcode auditorisch, taktil oder motorisch trainiert wurde, ergibt sich eine vergleichbare Leistungssteigerung in der motorischen Aufgabe der Post-Testmessungen im Vergleich zur Prä-Testuntersuchung. Ein derartiger genereller Trainingseffekt findet sich auch bei den Testmessungen in der auditorischen und somatosensorischen Modalität. Unabhängig davon, ob die auditorische, die taktile oder die motorische Aufgabe eingeübt wurde, finden sich Leistungsverbesserungen in allen Modalitäten. Es ist daher davon auszugehen, dass durch das Training ein modalitätsunabhängiges System trainiert wird.

- Die größte Leistungssteigerung von der Prä- zur Post-Testsitzung wurde in der auditorischen Modalität, bei auditorischem Training, erzielt. In der taktilen und motorischen Modalität ergaben sich bei auditorischem Training keine signifikanten Leistungssteigerungen von der Prä- zur Post-Testsitzung.
- Das motorische Training führte im Gegensatz zum auditorischen und taktilen Training zu keiner Veränderung der Hirnaktivitäten, wie sie während der auditorischen und taktilen Codeverarbeitung mit Hilfe der Magnetoenzephalographie in der Prä- und Post-Testsitzung gemessen wurden: Beim motorischen Training zeigte die kortikale Antwort, die durch die ersten Reize der Codesequenzen der auditorischen und taktilen Aufgabe evoziert wurde, einen rein kontralateralen Effekt. Eine Verschiebung der kortikalen Aktivität in Richtung der linksseitigen Sprachregion konnte in diesen beiden Modalitäten nicht nachgewiesen werden.
- Die topographischen Muster der Hirnaktivität ließen bei der motorischen Aufgabe in der Post-Testmessung unabhängig davon in welcher Modalität das Training stattgefunden hatte, keine Lateralisierung zur linken Hemisphäre erkennen. Es ist daher davon auszugehen, dass für die Programmierung und Ausführung

der mit den Sprachcode assoziierten Fingerbewegungen der linken und rechten Hand keine sprachspezifischen motorischen Areale beteiligt waren.

## **4.1 Generalisierung der Codier- und Decodierleistung**

Schon Alcantara et al. (1993) konnten mittels eines getrennten auditorischen oder taktilen Trainings mit sprachunterstützenden Hilfen (Tickle Talker) zeigen, dass sich unabhängig von der trainierten Modalität (auditorisch oder taktil) die Leistung in der auditorischen oder taktilen Aufgabe verbessert. Wie in der vorliegenden Studie wurde auch von Alcantara et al. ein Versuchsablauf gewählt, in dem zwei Versuchspersonengruppen jeweils zwei multimodale Testphasen und eine unimodale Trainingsphase absolvierten. Es zeigte sich ein generalisierter Trainingserfolg sowohl des auditorischen als auch des taktilen Trainings auf die jeweils anderen Aufgaben. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie decken sich dabei weitgehend mit denen von Alcantara et al.. In der hier durchgeführten Studie konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass das motorische Training ebenfalls eine Verbesserung in der Codier- und Decodierleistung des Sprachcodes in den nicht trainierten Modalitäten bewirkte.

### **4.1.1 Leistung nach motorischem Training**

Die Leistungssteigerung nach dem motorischen Training war interessanterweise unterschiedlich für die einzelnen Modalitäten. Die geringste Leistungsverbesserung ergab sich in der motorischen Aufgabe. Dies ist insofern verwunderlich, als für Testaufgaben in der trainierten Modalität die größten Leistungsverbesserungen zu erwarten gewesen wären. Eine Erklärung für diesen Sachverhalt ergibt sich daraus, dass die Versuchspersonen in der motorischen Testaufgabe im Vergleich zu den Aufgaben in den anderen

Modalitäten hier schon mit einer sehr hohen Leistung begannen und damit sich nur geringfügig verbessern konnten. Die im Vergleich zur taktilen und auditorischen Modalität bessere Leistung in der Prä-Testphase für die motorischen Aufgabe könnte wiederum daran liegen, dass die motorische Aufgabe einfacher war als die Aufgaben in den anderen beiden Modalitäten. Für die Lösung der sensorischen Aufgaben, bei der zunächst die Reizsequenz dargeboten wurde und anschließend zwei Antwortalternativen in Form von Buchstaben bzw. der Reizrichtungsabfolge visuell präsentiert wurden, gab es prinzipiell zwei Strategien. (1) Die präsentierte Reizsequenz wird gespeichert, und bei der Auswahl der korrekten Antwort mit den visuell präsentierten Richtungspfeilen verglichen. (2) Die Reizsequenz wird decodiert und der entsprechenden Buchstaben ausgewählt. Während die erste Strategie mehrere komplexe Schritte erfordert, erfordert die 2. Strategie weder eine längere Speicherung der Reizabfolge, noch einen sequentiellen Vergleich mit den Antwortalternativen. Damit erbringt das Erlernen des Codes einen wesentlichen Vorteil hinsichtlich der Decodierleistung in der Testaufgabe. In der motorischen Aufgabe hingegen wurde der zu encodierende Buchstabe zusammen mit den Richtungssymbolen, die die Seite des Tastendrucks vorgeben, dargeboten. Damit konnte die motorische Aufgabe ohne Kenntnis des Codes mit geringem Verarbeitungsaufwand erledigt werden. Letztendlich konnte die Aufgabe in der Testbedingung auch ohne Einübung des Codesystems durch Abtippen der Pfeilsequenzen ohne große zeitliche Verluste gelöst werden.

Die verbesserte Leistung in der auditorischen und taktilen Testaufgabe nach motorischem Training kann dahingehend interpretiert werden, dass die Probanden von dem motorischen Training profitierten. Ob die Trainingseffekte jedoch auf ein Erlernen des Codierschemas zurückzuführen sind, oder lediglich das Resultat eines Transfers der motorischen Tastendrucksequenz in die auditorische bzw. taktile Modalität der Testaufgabe sind, bleibt ungeklärt. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass die verbesserte Leistung in der auditorischen und taktilen Testaufgabe ausschließlich auf die wiederholte Konfrontation mit der Testaufgabe zurückzuführen ist, und demnach unabhängig vom dem Einüben der motorischen Aufgabe ist.

#### **4.1.2 Leistung in der motorischen Testaufgabe**

Vergleicht man die Leistungsveränderungen in der motorischen Aufgabe für die verschiedenen Trainingsmodalitäten, so sieht man deutlich, dass die Leistungsverbesserung von der Trainingsmodalität unabhängig ist, d.h. unabhängig davon, ob motorisch, auditorisch oder taktil trainiert wurde, ergab sich in der motorischen Testaufgabe eine signifikante Leistungssteigerung im Vergleich zur Prä-Testsitzung. Dieser generelle, modalitätsunabhängige Trainingseffekt lässt sich nicht nur in der motorischen Testaufgabe erkennen, sondern ist in den Aufgaben der anderen beiden Modalitäten ebenfalls zu finden. Demnach ist die Modalität, in der der Code eingeübt wurde für das Abschneiden der Versuchspersonen in den Testaufgaben unerheblich. Das Ausmaß der Leistungssteigerung wird allein durch die Modalität der Testaufgabe bestimmt. Allerdings scheinen sich die Testaufgaben der drei Modalitäten hinsichtlich ihres Schwierigkeitsgrades zu unterscheiden, da die Anzahl korrekter Codeidentifikationen bereits vor dem Training für die auditorische Aufgabe am geringsten und für die motorische am höchsten war. Wie bereits oben erwähnt, erforderte die motorische Aufgabe, im Vergleich zu den sensorischen Modalitäten einen geringeren Verarbeitungsaufwand.

Das schlechtere Abschneiden hinsichtlich der Identifikation der Buchstabencodes in der auditorischen Aufgabe, im Vergleich zur taktilen und zur motorischen Aufgabe vor und auch nach dem Training, könnte sich durch ein Problem mit der Lokalisation der einzelnen links- oder rechtsseitig dargebotenen Reizelemente erklären. Nach subjektiver Einschätzung aller Versuchspersonen war die Abfolge der monaural dargebotenen Stimuli der Buchstabensequenzen sehr schnell, so dass sie Probleme hatten, die Seite der einzelnen Reize richtig zuzuordnen und somit zu entscheiden, welchen Buchstabencode sie gehört hatten. Offensichtlich unterscheiden sich die Zeitkonstanten der sequentiellen Reizverarbeitung in den sensorischen

Systemen. Dabei erscheint die auditorische Verarbeitung hinsichtlich der sequentiellen Integration lateral dargebotener Informationen langsamer zu sein, als die taktile. Es ist allerdings anzunehmen, dass diese Unterschiede zumindest teilweise durch intensives Training der auditorischen Aufgabe kompensiert werden können. Amitay et al. (2006) konnten in ihrer Studie Lerneffekte für die Unterscheidung sensorischer Stimuli nachweisen.

### **4.1.3 Leistungsverbesserung aufgrund der Wiederholung im Test**

Ein weiterer Punkt, der bei der Interpretation der Leistungssteigerungen in den Testsitzungen berücksichtigt werden sollte, ist der bereits erwähnte Wiederholungseffekt der Testaufgaben. Jede Modalität (auditorisch, taktil und motorisch) wurde zwei Mal untersucht. Allein die Wiederholung der Testaufgaben in dem Prä-Testsitzungsblock, in dem die Kodierung gelernt wird, verbessert die Leistung und Reaktionszeit. Dieser Effekt zeigt sich zwischen den aufeinanderfolgenden Messblöcken der Prä-Testsitzung, in denen der Sprachcode nacheinander in den drei Modalitäten abgefragt wurde. Die Leistungsverbesserung stellte sich ohne systematische Übung der Buchstabencodes und ohne eine Rückmeldung darüber, ob die Antworten richtig oder falsch waren, ein. Diese Verbesserung allein aufgrund der Wiederholung könnte daher auch für die Leistungsverbesserungen von der Prä- zur Post-Testsitzung verantwortlich sein.

### **4.1.4 Trainingsdauer**

Schon in früheren Studien konnte gezeigt werden, dass das Erlernen sowohl künstlicher Sprachsysteme (KEKI) (Review: Posner & Abdullaev) als auch taktiler Worterkennung (Galvin et al. 1999, Szeto et al. 1986) durch eine

intensive Einübung im Zeitraum weniger Wochen zu einer deutlich verkürzten Reaktionszeit bei Diskriminationsaufgaben führt. Die Eigenart der Stimuli und das Ausmaß des zu erlernenden Vokabulars bestimmen die Dauer des Trainings, die Versuchspersonen benötigen um einen Sprachcode bzw. eine artifizielle Sprache zu erlernen (Galvin et al. 1999). Offensichtlich war die in der vorliegenden Studie gewählte Trainingsdauer von vier Sitzungen im Laufe einer Woche ausreichend, um den aus zwölf Elementen bestehenden Sprachcode zu lernen und dadurch die Leistung und die Reaktionszeit eindeutig zu steigern.

## **4.2 Trainingsinduzierte Änderungen kortikaler Aktivität**

Die ersten Schritte der kortikalen Verarbeitung des Sprachcodes wurden mittels magnetencephalographischer Aufzeichnungen für die verschiedenen Modalitäten ermittelt. Die auditorische und taktile Stimulation, sowie die Ausführung der Tastendrucke in der motorischen Aufgabe löste evozierte Magnetfelder aus, die sich durch Felder von Dipolquellen beschreiben lassen. Die Lokalisation der Quellen aus den Magnetfeldern erfolgte mittels eines räumlich-zeitlichen Dipolmodells. Mit dieser Methode lässt sich auch der zeitliche Aktivitätsverlauf der Quellen bestimmen. Für die auditorisch evozierten Felder ergaben sich typische Lokalisationen im auditorischen Kortex. Die frühen taktilen Aktivitäten ließen sich durch Dipolquellen in der Region des zentralen Sulcus beschreiben. Die zeitlichen Aktivitätsverläufe dieser Dipole zeigten charakteristische Peaks (auditorisch N1 und taktil P50 sowie N1) (auditorisch: Mathiak et al. 2002b; taktil Hämäläinen: et al. 1990).

#### **4.2.1 Dipollokalisierung in der taktilen und auditorischen Aufgabe in der Prä-Testmessung**

In der taktilen Aufgabe der Testmessungen zeigte sich eine zu erwartende kontralaterale Verarbeitung des somatosensorischen Stimulus im primären somatosensorischen Kortex S1 (Simoes & Hari 1999; Hämäläinen et al. 1990). Trotz einer Reduktion der Quellenaktivitäten von der Prä- zur Post-Testsitzung blieb die Lateralisierung der frühen Hirnantworten erhalten. In der auditorischen Aufgabe ergab sich eine deutliche Aktivität der Dipole im primären auditorischen Kortex. Auch hier führte die Darbietung des ersten Reizes der auditorischen Reizsequenz zur stärksten Antwort in der kontralateralen Hemisphäre.

#### **4.2.2 Dipollokalisierung in der taktilen und auditorischen Aufgabe in der Post-Testmessung**

In den beiden Teilstudien der Experimentalserien, in denen die Versuchspersonen auditorisch und taktil trainiert worden waren, ergab sich in der Post-Testsitzung eine deutliche Verschiebung der Dipollokalisierungen im Vergleich zu denen der Prä-Testsitzung. Als Folge des Trainings konnte eine deutliche Lateralisierung der kortikalen Aktivität in Richtung der linken Hemisphäre für beide Modalitäten belegt werden. Das bedeutet, dass der zunächst nicht mit Sprachinformation assoziierte Code als Folge des Trainings eine veränderte Verarbeitung erfährt. Die verstärkt linksseitige Aktivierung lässt sich im Sinne einer Nutzung sprachrelevanter Hirnareale für die Decodierung der Codestimuli interpretieren. Diese Ergebnisse bestätigen Befunde unterschiedlicher Studien, die eine Dominanz der linken Hemisphäre bei der Verarbeitung von sprachlicher Information berichten (Binder et al. 1997, Tallal et al. 1998, Mathiak et al. 1999, Saffran et al. 2000, Calandra-Bounara et al. 2002).



### **4.2.3 Dipollokalisierung in der motorischen Aufgabe**

In der motorischen Aufgabe wurde die bewegungskorrelierte Hirnaktivität bei der Produktion des Buchstabencodes ausgewertet. Im Gegensatz zu den sensorischen Aufgaben, konnte die Linksverschiebung der Aktivität bei der Verarbeitung in der motorisch trainierten Gruppe nicht beobachtet werden. Die Dipollokalisierungen in der Prä- und der Post-Testsitzung unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Die Dipolaktivität in der motorischen Aufgabe, die sich ebenfalls im Bereich des Sulcus centralis lokalisieren lässt, entspricht vom Zeitpunkt her in erster Linie, der der motorischen Antwortreaktion. Da die sprachbezogene Verarbeitung der Codeelemente vor der motorischen Reaktion stattfinden muss, ist es nicht notwendigerweise zu erwarten, dass sich die Codeverarbeitung in den motorisch evozierten Antworten abbildet. Demnach erfordert die Untersuchung sprachbezogener Aktivität möglicherweise die Fokussierung auf Phasen kortikaler Aktivität, die vor der motorischen Reaktion auftreten.

## **4.3 Visuelle Präsentation**

In der motorischen Aufgabe war der auslösende Reiz für die motorische Reaktion die visuelle Präsentation der Buchstaben (in den Testmessungen mit Pfeilsequenz und in den Trainingseinheiten ohne Pfeilsequenz). Die Probanden lernten im Laufe der Studie auf die visuell dargebotenen Buchstaben mit einem bestimmten motorischen Muster zu reagieren; d.h. zu jedem präsentierten Buchstaben die richtige Pfeilsequenz anhand der linken und rechten Taster einzugeben. Die VPs mussten also zwischen den Buchstaben und den dazugehörigen Codes eine Assoziation bilden. Um das Lernen der Codes zu erleichtern, wurde den VPs ein Blatt mit den Buchstaben und den entsprechenden Codes ausgehändigt, damit sie zu Hause die Codes vertiefen konnten. Fraglich bleibt, ob die Versuchspersonen tatsächlich eine Assoziation

der visuellen und der motorischen Repräsentation der Buchstaben unter Einbeziehung sprachlicher Verarbeitung gelernt haben, oder ob sie lediglich eine direkte visuo-motorische Assoziation erwarben, die keine Einbeziehung sprachspezifischer Prozesse erforderte. Falls die zweite Alternative zuträfe, sollte, wie in der vorliegenden Studie beobachtet, keine Aktivierung sprachrelevanter Areale zu beobachten sein.

#### **4.4 Änderungen des Experimentdesigns vorteilhafter für die Fragestellung?**

Um zu prüfen, ob zwischen dem visuellen Reiz und der motorischen Antwort eine über Sprachareale vermittelte Assoziation vorliegt, wäre eine Änderung des Experimentdesign von Vorteil. Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten:

1. Abfrage von Buchstaben ohne visuelle Präsentation der dazugehörigen Pfeilcodes auch in den Testsitzungen, um sicher zu gehen, dass die VPs auch wirklich den gelernten Code eingeben und nicht einfach nur den visuell vorgegebenen nachtippen.

2. Abfrage von einfachen Wörtern, die durch die Buchstabencodes eingegeben werden müssen. In dieser Anordnung sollte ebenfalls keine visuelle Präsentation erfolgen. In einem solchen Experimentdesign wären die VPs gezwungen die Buchstabencodes mit Sprache in Verbindung zu bringen, da sie mehrere Codes in richtiger Reihenfolge hintereinander reihen müssten, um die abgefragten Wörter zu bilden. Die Aufgabe ließe sich nicht lösen, wenn zwischen den Buchstaben lediglich eine visuo-motorische Assoziation gebildet würde.

3. Eine Untersuchung der zerebralen Aktivität, die durch die visuelle Präsentation der Buchstaben ausgelöst wurde, könnte möglicherweise Aufschluss über eine Beteiligung sprachrelevanter Regionen in dieser Aufgabe geben.

## **4.5 Verschiebung der taktil evozierten Aktivitäten in Richtung einer auditorischen Topographie in der Post-Testmessung**

Neben der Lateralisierung der Dipolaktivität auf die linke Hemisphäre in der Post-Testmessung, konnte man in den ersten beiden Teilen der Studie, in den in der somatosensorischen und der auditorischen Modalität trainiert wurde, noch einen weiteren Effekt in der magnetischen Hirnaktivität erkennen. Es zeigte sich, dass sich die in der taktilen Aufgabe evozierte Hirnaktivität in der Post-Testsitzung im Vergleich zur Prä-Testsitzung sowohl für die taktil als auch für die auditorisch trainierte Gruppe in Richtung der auditorischen Topographie verschoben hatten. Dieser Effekt wurde mittels eines Projektionsverfahrens quantifiziert. Bei diesem Verfahren, wird der Anteil einer definierten topographischen Aktivitätsverteilung, der prototypischen Topographie, an einem gemessenen, räumlich-zeitlichen Signalverlauf berechnet. Als prototypische auditorische Topographie wurde die Aktivitätsverteilung für eine Latenz von 0,6-0,9 s aus den Grand Averages der auditorischen Aufgabe in der auditorisch trainierten Gruppe herangezogen. Mit diesem Verfahren konnte gezeigt werden, dass sich sowohl für die taktil als auch für die auditorisch trainierte Gruppe die in der taktilen Testaufgabe evozierten Aktivitäten aufgrund des Trainings in Richtung der auditorischen Mustertopographie verschoben. Dieser Effekt war in der auditorisch trainierten Gruppe deutlicher ausgeprägt, als in der taktil trainierten Gruppe. Die Quellen der prototypischen Topographie liegen in der Nähe des primären bzw. sekundären auditorischen Kortex. Möglicherweise beschreiben sie Aktivierungen des Wernicke-Sprachzentrums. Bereits Kujala et al. (2003) vermuteten eine große Ähnlichkeit zwischen der mit der Verarbeitung von Phonemen assoziierten Hirnaktivität und der Aktivität, wie sie beim Verarbeiten von Morsecodemustern registriert werden kann. Vergleichbar mit der hier beschriebenen Studie, führte bei ihnen ein Morsecodetraining eine Lateralisierung der Aktivität auf die sprachdominante linke Hemisphäre herbei, in der sprachliche Information aus dem Code dechiffriert werden konnte.

## **Schlussfolgerung**

In dem vorliegenden Experiment wurde Veränderung der Decodierleistung nach dem Erlernen eines artifiziellen Buchstabencodes untersucht. Diese Studie konnte eindeutig zeigen, dass unimodal erlernte Fähigkeiten bei der Verarbeitung eines Sprachcodes auf andere Modalitäten übertragen werden können und sich damit die Erkennungsleistung der Buchstabencodes steigert und die Reaktionszeit verringert. Mit dem gewählten Ansatz ist es in der vorliegenden Studie gelungen, einen kleinen Beitrag zum Verständnis der Verarbeitung von Sprache, eine allein dem Menschen eigene Funktion, zu leisten.

## 5. Zusammenfassung

Sprache, die wohl überragendste kognitive Fähigkeit des Menschen, wurde schon in vielerlei Hinsicht untersucht. Allerdings ist nicht genau bekannt, wie das Erlernen einer Sprache im Gehirn verarbeitet wird. Man weiß nicht genau, welche Areale im Gehirn für diese Funktion zuständig sind. Auch ist unklar, ob das Erlernen einer Sprache nicht in unterschiedlichen Gehirnarealen abläuft und wie sich die Verarbeitung im Verlauf des Lernprozesses verändert. Die MEG ermöglicht es, kortikale Verarbeitungsprozesse durch Dipolanalysen bestimmten Regionen zuzuordnen und somit einen Anhalt für Sprachverarbeitungsmechanismen und deren Lokalisation zu geben.

12 Versuchspersonen wurde in 2 Test- und 4 Trainingssitzungen ein multimodaler Sprachcode, bestehend aus zwölf durch Pfeile codierten Buchstaben, präsentiert. Die Modalitäten waren auditorisch, taktil und motorisch, wobei erstere zwei Diskriminationsaufgaben waren und die letztere eine Nachahmaufgabe.

Im Ergebnis zeigten die Verhaltens-Daten eindeutig, dass Training eine fördernde Wirkung auf alle durchgeführten Testaufgaben hat, die in den drei unterschiedlichen Modalitäten angeboten wurden. Die Einbeziehung der beiden Studienteile, in denen das Training in der somatosensorischen und auditorischen Modalität stattfand, zeigte eine Leistungsverbesserung in den Posttests unabhängig von der trainierten Modalität. Die größte Leistungssteigerung ergab sich für die auditorische Aufgabe bei auditorischem Training. Außerdem bewirkte das Training eine Verknüpfung motorischer Sequenzen mit bestimmten Buchstaben. Die Analyse der MEG-Daten zeigte in der taktilen und auditorischen Aufgabe bei auditorischem oder taktilem Training eine eindeutige Lokalisationsänderung der kortikalen Aktivität in Richtung der auditorischen Mustertopographie. Außerdem konnte für die kortikale Aktivität in beiden Aufgaben auch eine deutliche Linkslateralisierung beobachtet werden. Das motorische Training zeigte diesen Effekt allerdings nicht. Dies scheint ein

Anhalt dafür zu sein, dass die Verarbeitung von Sprache doch eher den auditorischen und somatosensorischen Systemen unterliegt.

In dieser Studie konnte eindeutig gezeigt werden, dass unimodal gelernte Fähigkeiten bei der Verarbeitung eines Sprachcodes auf andere Modalitäten übertragen werden können und sich damit Erkennungsleistung der Buchstabencodes steigert und die Reaktionszeit verringert wird. Eine genaue Aussage über die Lokalisation der Sprachverarbeitung beim Erlernen einer neuen Sprache konnte allerdings nicht gemacht werden. Hierfür müsste das Experimentdesign noch geändert und verfeinert werden hinsichtlich der visuellen Präsentation der Buchstabencodes, der eventuellen Abfrage von ganzen Wörtern durch die Buchstabencodes und der Untersuchung der zerebralen Aktivität, die durch die visuelle Präsentation ausgelöst wird. Mit dem gewählten Ansatz ist es in der vorliegenden Studie jedoch gelungen, einen kleinen Beitrag zum Verständnis der Verarbeitung von Sprache, eine allein dem Menschen eigene Funktion, zu leisten.

## 6. Anhang

### 6.1 Literaturverzeichnis

1. Ackermann H., Lutzenberger W., Hertrich I.: (1999) Hemispheric lateralization of the neural encoding of temporal speech features: a whole-head magnetencephalography study. *Cognitive Brain Research*, 7: 511-518
2. Alcantara J.I., Blamey P.J., Clark G.M.: (1993) Tactile-auditory speech perception by Unimodally and bimodally trained normal-hearing subjects. *J Am Acad Audiol*, 4(2): 98-108
3. Amitay S., Irwin A., Moore DR.: (2006) Discrimination learning induced by training with identical stimuli. *Nat Neurosci*, 9(11):1446-1448
4. Ardila A.: (1987) Aphasia for Morse code: a comment on Wyler and Ray (1986). *Brain Lang*, 30(2):363-366
5. Bellugi U., Poizner H., Klima E.S.: (1989) Language, modality and the brain. *Trends Neurosci.*, 12(10): 380-388
6. Benasich A..A., Thomas J.J., Choudhury N., Leppanen P.H.: (2002) The importance of rapid auditory processing abilities to early language development: evidence from converging methodologies. *Dev Psychobiol.*, 40(3): 278-292
7. Binder J.R., Frost J.A., Hammeke T.A., Cox R.W., Rao S.M., Prieto T.: (1997) Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, 17(1): 353-362
8. Calandra-Buonaura G., Basso G., Gorno-Tempini M.L., Serafini M., Pagoni G., Baraldi P., Porro C.A., Nichelli P. : (2002) Human brain language processing areas are identified by functional magnetic resonance imaging using a lexical decision task. *Funct Neurol.*, 17(4): 183-91

9. Clawson D.M., Healy A.F., Ericsson K.A., Bourne Jr. L.E.: (2001) Retention and Transfer of Morse Code Reception Skill by Novices: Part-Whole Training. *J Exp Psychol Appl*, 7(2): 129-142
10. Fiez J.A., Raichle M.E., Balota D.A., Tallal P., Petersen S.E.: (1996) PET activation of posterior temporal regions during auditory word presentation and verb generation. *Cereb Cortex*, 6(1): 1-10
11. Forss N., Jousmäki V.: (1998) Somatosensory integration in human primary and secondary Somatosensory cortices. *Brain Research*, 781: 259-267
12. Foxe J.J., Wylie G.R., Martinez A., Schroeder C.E., Javitt D.C., Guilfoyle D., Ritter W., Murray M.M.: (2002) Auditory-Somatosensory Multisensory Processing in Auditory Association Cortex: An fMRI Study. *J Neurophysiol*, 88: 540-543
13. Friederici A.D., Opitz B., von Cramon D.Y.: (2000) Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: an fMRI investigation of different word types. *Cereb Cortex*, 10(7): 698-705
14. Friederici A.D., Schoenle P.W.: Computational dissociation of two vocabulary types: (1980) Evidence from Aphasia. *Neuropsychologia*, 18: 11-20
15. Friederici A.D., Steinhauer K., Pfeifer E.: Brain signatures of artificial language processing: (2002) Evidence challenging the critical period hypothesis. *Proc Natl Acad Sci USA*, 99(1): 529-534
16. Fu K.M.G., Johnston T.A., Shah A.S., Arnold L., Smiley J., Hackett T.A., Garraghty P.E., Schroeder C.E.: (2003) Auditory cortical neurons respond to somatosensory stimulation. *J Neurosci*, 23(20): 7510-7515
17. Gallen C.C., Sobel D.F., Lewine J.D., Sanders J.A., Hart B.L., Davis L.E., Orrison Jr. W.W.: (1993) Neuromagnetic mapping of brain function. *Radiology*, 187: 863-867
18. Galvin K.L., Blamey P.J., Oerlemans M., Cowans R.S., Clark G.M.: (1999) Acquisition of a tactile –alone vocabulary by normally hearing users of the Tickle-Talker. *J Acoust Soc Am*, 106(2): 1084-1089



19. Godde B., Ehrhardt J., Braun C.: (2003) Behavioral significance of input-dependent plasticity of human somatosensory cortex. *Neuroreport*, 14(4): 543-546
  
20. Hämäläinen H., Kekoni J., Sams M., Reinikainen K., Näätänen R.: (1990) Human Somatosensory evoked potentials to mechanical pulses and vibration: contributions of SI and SII somatosensory cortices to P50 and P100 components. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 75: 13-21
  
21. Hari R., Reinikainen K., Kaukoranta E., Hämäläinen H., Ilmoniemi R., Penttinen A., Salminen J., Teszner D.: (1984) Somatosensory evoked cerebral magnetic fields from SI and SII in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 57: 254-263
  
22. Karhu J., Tesche C.D.: (1999) Simultaneous early processing of sensory input in human primary (SI) and secondary (SII) somatosensory cortices. *J Neurophysiol*, 81(5): 2017-2025
  
23. Kaukoranta E., Hari R., Reinikainen K.: (1983) Magnetic fields evoked by peroneal nerve stimulation. *Aus: Weinberg H., Stroink G., Katila T.: Biomagnetism: Applications and Theory, New York: Pergamon Press*
  
24. Kujala A., Huotilainen M., Uther M., Shtyrov Y., Monto S., Ilmoniemi R.J., Näätänen R.: (2003) Plastic cortical changes induced by learning to communicate with non-speech sounds. *Neuroreport*, 14(13): 1683- 1687
  
25. Lang M., Lang W., Uhl F., Kornhuber A., Deecke L., Kornhuber H.H.: (1987) Slow negative Potential shifts indicating verbal cognitive learning in a concept formation task. *Human Neurobiol*, 6: 183-190
  
26. Lounasmaa O.V., Hämäläinen M., Hari R., Salmelin R.: (1996) Information processing in The Human brain: Magnetencephalographic approach. *Proc Natl Acad Sci USA*, 93: 8809-8815
  
27. Mathiak K., Hertrich I., Lutzenberger W., Ackermann H.: (1999) Preattentive processing of Consonant vowel syllables at the level of the supratemporal plane: a whole head Magnetencephalography study. *Cogn Brain Res*, 8: 251-257
  
28. Mathiak K., Hertrich I., Grodd W., Ackermann H.: Cerebellum and speech perception: (2002b) A functional magnetic resonance imaging study. *J Cogn Neurosci*, 14(6):902-912

29. Mathiak K., Hertrich I., Lutzenberger W., Ackermann H.: (2002a) Functional cerebral asymmetries of pitch processing during dichotic stimulus application: a whole-head magnetencephalography study. *Neuropsychologia*, 40: 585-593
30. Merzenich M.M., Jenkins W.M., Johnston P., Schreiner C., Miller S.L., Tallal P.: (1996) Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science*, 271(5245): 77-81
31. Mills D.L., Neville H.J.: (1997) Electrophysiological studies of language and language Impairment. *Semin Pediatr Neurol*, 4(2): 125-134
32. Mintz Th.: (2002) Category induction from distributional cues in an artificial language. *Mem Cognit*, 30(5): 678-686
33. Montnemery P., Almqvist B., Harris S.: (1991) Recognition of telegraphy disturbed by noise at different s/n-ratios and different telegraphy speeds. *Scand Audiol*, 20(1): 33-39
34. Montnemery P., Almqvist B., Harris S.: (1992) Recognition of telegraphy signs at different Listening levels and frequencies. *Scand Audiol*, 21(4): 255-260
35. Nagarajan S., Mahncke H., Salz T., Tallal P., Roberts T., Merzenich M.M.: (1999) Cortical Auditory signal processing in poor readers. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96(11): 6483-6488
36. Neville H.J., Bavelier D., Corina D., Rauschecker J., Karni A., Lalwani A., Braun A., Clark V., Jezzard P., Turner R.: (1998) Cerebral organization for language in deaf and Hearing subjects: Biological constraints and effects of experience. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95: 922-929
37. Neville H.J., Bavelier D.: (1998) Neural organization and plasticity of language. *Curr Opin Neurobiol*, 8(2): 254-258
38. Neville H.J., Coffey S.A., Lawson D.S., Fischer A., Emmorey K., Bellugi U.: (1997) Neural systems mediating American sign language: effects of sensory experience and age of acquisition. *Brain Lang*, 57(3): 285-308
39. Neville H.J., Mills D.L., Lawson D.S.: (1992) Fractionation language: different neural Subsystems with different sensitive periods. *Cereb Cortex*, 2(3): 244-258

40. Opitz B., Friederici A.D.: (2003) Interactions of the hippocampal system and the prefrontal Cortex in learning language-like rules. *Neuroimage*, 19(4): 1730-1737
41. Papcun G., Krashen S., Terbeek D., Remington R., Harshman R.: (1974) Is the left Hemisphere specialized for speech, language and/ or something else? *J. Acoust. Soc. Am.*, 55(2): 319-327
42. Pascual-Leone A., Torres F.: (1993) Plasticità of sensorimotor cortex representation of the reading finger in Braille readers. *Brain*, 116:39-52
43. Perani D., Paulesu E., Galles NS., Dupoux E., Dehaene S., Bettinardi V., Cappa SF., Fazio F., Mehler J.: (1998) The bilingual brain. Proficiency and age of acquisition of the second language. *Brain*, 121 (Pt 10):1841-1852
44. Poeppel D., Phillips C., Yellin E., Rowley H.A., Roberts T.P., Marantz A.: (1997) Processing of vowels in supratemporal auditory cortex. *Neurosci. Lett.*, 221(2-3):145-148
45. Posner M.I., Abdullaev Y.G.: (1999) Neuroanatomy, circuitry and plasticity of word reading. *Neuro Report*, 10(3): R12-23
46. Renvall H., Hari R.: (2002) Auditory cortical responses to speech-like stimuli in dyslexic Adults. *J Cogn Neurosci*, 14(5): 757-768
47. Rosenberg B., Zurif E., Brownell H., Garrett M., Bradley D.: Grammatical class Effects in relation to normal and aphasic sentence processing. *Brain Lang.* (1985), 26(2): 287-303
48. Sadato N., Pascual-Leone A., Grafman J., Deiber M.P., Ibanez V., Hallett M.: (1998) Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain*, 121: 1213-1229
49. Saffran E.M.: (2000) Aphasia and the relationship of language and brain. *Semin Neurol*, 20(4): 409-418
50. Schnitzler A., Salmelin R., Salenius S., Jousmäki V., Hari R.: (1995) Tactile information from the human hand reaches the ipsilateral primary somatosensory cortex. *Neurosci Lett.*, 200(1): 25-28
51. Schroeder C.E., Lindsley R.W., Specht C., Marcovici A., Smiley J.F., Javitt D.C.: (2001) Somatosensory input to auditory association cortex in the macaque monkey. *Neurophysiol.*, 85(3): 1322-1327

52. Simoes C., Hari R.: (1999) Relationship between responses to contra- and ipsilateral stimuli in the human second somatosensory cortex SII. *Neuroimage*, 10(4): 408-416
53. Szeto A.Y., Chung Y.M.: (1986) Effects of training on human tracking of electrocutaneous signals. *Ann. Biomed. Eng.*, 14(4): 369-381
54. Tallal P., Merzenich M.M., Miller S., Jenkins W.: (1998) Language learning impairments: integrating basic science, technology, and remediation. *Exp Brain Res* 123: 210-219
55. Topka H.: (2003) Kapitel B-24 Motorisches System, in Schmidt, Unsicker (Hrsg). *Lehrbuch Vorklinik: Teil B Anatomie, Biochemie und Physiologie des Nervensystems und des Bewegungsapparates*. Köln, Deutscher Ärzte-Verlag
56. Trepel M.: (1999) Kapitel 9.8.3 Motorisches Sprachzentrum. In : *Neuroanatomie Struktur und Funktion*, Urban und Fischer

## 6.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Schematische Zeichnung des Dewars .....	22
Abb. 2 Der Buchstabencode.....	25
Abb. 3 Schematische Darstellung des Ablaufs der Trials der auditorischen bzw. taktilen Aufgabe.....	30
Abb. 4 Schematische Darstellung der motorischen Trials. ....	32
Abb. 5 Performance (Testphasen) .....	43
Abb. 6 Performance (Training) .....	44
Abb. 7 Allgemeine RZ (Testphasen) .....	46
Abb. 8 Allgemeine RZ motorisch (Messung) .....	47
Abb. 9 Allgemeine RZ (Training) .....	49
Abb. 10 On-Set-RZ (Messungen).....	50
Veränderung der On-Set RZ im Verlauf der Testphasen .....	50
Abb. 11 On-Set-RZ (Training) .....	51
Abb. 12 Rest-RZ (Messungen).....	52
Abb. 13 Rest-RZ (Trainingsphase).....	53
Abb. 14 Reaktionszeit Buchstaben (Messung).....	54
Abb. 15 Motorische Aufgabe .....	56
Abb. 16 Taktile Aufgabe .....	57
Abb. 17 Auditorische Aufgabe .....	58
Abb. 18 Auditorische Aufgabe Sondereffekt.....	59
Abb. 19 Aktivitätsverläufe und topographische Feldverteilung der auditorischen und taktilen Aufgabe bei motorischem Training.....	61
Abb. 20 Aktivitätsverläufe der auditorischen Dipole .....	63
Abb. 21 Auditorische Aufgabe bei motorischem Training.....	65
Abb. 22 Aktivitätsverläufe der taktilen Dipole .....	67
Abb. 23 Aktivität der Dipole zum Zeitpunkt der P50m- (50ms) und P1m-Peaks (90ms) .....	68
Abb. 24 Aktivitätsverläufe der 151 Sensorkanäle und topographische Feldverteilung.....	69

## 6.3 Abkürzungsverzeichnis

Abb. - Abbildung

A1-Kortex - primärer auditorischer Kortex

A2-Kortex - sekundärer auditorischer Kortex

M1-Kortex - primärer motorischer Kortex

S1-Kortex - primärer somatosensorischer Kortex

S2-Kortex - sekundärer somatosensorischer Kortex

EEG - Elektroencephalographie

ISI - Interstimulusintervall

ITI - Intertrialintervall

LH - linke Hemisphäre

RH - rechte Hemisphäre

SQUID - super conducting interference devices

RZ - Reaktionszeit

rMW - robuster Mittelwert

## 7. Danksagung

Diese Dissertationsarbeit entstand im Institut für medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie der Universitätsklinik Tübingen am Lehrstuhl von Herrn Prof. Dr. N. Birbaumer.

Mein erster und größter Dank gilt Herrn PD. Dr. C. Braun für die freundliche Überlassung des Themas und für die kompetente Betreuung in seiner hilfsbereiten Art. Ohne ihn wäre diese Studie nicht entstanden. Seine immer neuen Ideen und die gute Betreuung haben mich sehr für diese Arbeit motiviert.

Besonderer Dank gilt auch Frau Dipl. Biol. A. Wühle, die mir mit ihrem Wissen und ihrer hilfsbereiten Art bei der Durchführung der Messungen und der Auswertung der Daten stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Für die Lösung technischer Probleme, sowohl am MEG, als auch an den PCs für die Datenauswertung möchte ich mich besonders bei Herrn J. Dax bedanken, der mir bei auftretenden Problemen stets behilflich war.

Bei Herrn Prof. Dr. Dr. K. Mathiak möchte ich mich für die Teilauswertung meiner MEG-Daten bedanken.

Mein letzter Dank gilt meinen Eltern und meinem Bruder für die Korrekturlesung und moralische Unterstützung während der ganzen Zeit. Ich danke, dass sie mir mein Studium und damit auch diese Arbeit ermöglicht haben.

## Lebenslauf

Name: Langkrär

Vorname: Stefanie

Geburtsdatum: 26.11.1980

Geburtsort: Oldenburg i. Oldb.

Eltern: Jürgen Langkrär  
Diplom Ingenieur

Angela Langkrär  
Hausfrau

Geschwister: Christian Langkrär  
Student

Schulbildung: 1987-1988 Grundschule Saulheim  
1988-1990 Elementary School  
Boca Raton / Florida USA  
1990-1991 Grundschule Saulheim  
1991-1995 Gymnasium am Römerkastell Alzey  
1995-2000 Kepler-Gymnasium Tübingen  
Abschluss: Abitur Jahr 2000

Ausbildung: 2000-2001 ein Semester an der MTA-Schule des  
Katharinen-Hospitals in Stuttgart



	2001	Sommersemester Beginn des Medizinstudiums an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
	2002 2004-2005	Physikum 2 Semester Auslandsstudium an der Université Victor Ségalen Bordeaux II
	2006	Im August Beginn des Praktischen Jahres im Kreiskrankenhaus Böblingen
	2007	27.November Ärztliche Prüfung
Praktika:	1997	Im Rahmen der 10. Klasse einwöchiges Praktikum in der Praxis Dr. med. Eberhard Rupp, Dettenhausen
	2001	achtwöchiges Krankenpflegepraktikum in der Universitäts-Frauenklinik Tübingen
	2002	Famulatur Kinderklinik Olga Krankenhaus Stuttgart
	2005	Famulatur Praxis Dr. med. Eberhard Rupp, Dettenhausen
	2006	Famulatur in der Frauenklinik des Städtischen Klinikums Oldenburg
Nebentätigkeiten:	2001-2004	Hiwistelle in der Stabsstelle Wissenschaftsmanagement der Universitäts-Augenklinik Tübingen
	2001-2003	Bedienung in der Tanzschule Tanzen am Europaplatz Tübingen
	2006-2007	Studentische Hilfskraft in der Vollblutspende der Blutspendezentrale Tübingen

Tübingen den 07.09.08