

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

Direktor: Prof. Dr. N. Birbaumer

**Änderung der kortikalen Aktivität beim Erwerb eines
multimodalen, Morsecode-ähnlichen Sprachcodes**

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

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

**vorgelegt von:
Sarah Rebekka Pitsch
aus
Freiburg i. Br.**

2008

Dekan:

Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter:

Privatdozent Dr. Ch. Braun

2. Berichterstatter:

Privatdozentin Dr. M. Pavlova

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
1.1. Die Sprache.....	6
1.2. Der Morsecode.....	9
1.3. Die Verarbeitung der taktilen und auditorischen Reize	11
1.3.1. Die auditorische Verarbeitung	11
1.3.2. Die taktile Verarbeitung.....	12
1.3.3. Die kortikale Veränderung durch Lernen und Training	12
1.4. Die Magnetencephalographie	13
1.5. Das Versuchsdesign und die Hypothesen.....	14
2. Material und Methoden.....	16
2.1. Der Versuchsablauf.....	16
2.2. Die Versuchspersonen.....	16
2.3. Die Datenerfassung mit dem MEG	17
2.4. Der Sprachcode	19
2.4.1. Die Darbietung der Stimulation	20
2.4.1.1. Die visuelle Präsentation.....	20
2.4.1.2. Die auditorische Präsentation.....	20
2.4.1.3. Die taktile Präsentation	21
2.5. Der detaillierte Versuchsablauf.....	21
2.5.1. Die Prä- und Posttestsitzungen.....	21
2.5.1.1. Die auditorische Aufgabe.....	22
2.5.1.2. Die taktile Aufgabe.....	23
2.5.1.3. Die motorische Aufgabe	23
2.5.2. Die Trainingssitzungen	24
2.6. Die Auswertung der Verhaltensdaten.....	25
2.7. Die Auswertung der MEG-Daten.....	26
2.7.1. Die frühen Antworten	27
2.7.2. Die späten Antworten	28

3. Ergebnisse	29
3.1. Die Verhaltensdaten	29
3.1.1. Die Performance.....	29
3.1.2. Die Reaktionszeit	32
3.1.2.1. Die mittlere Reaktionszeit.....	33
3.1.2.2. Die Reaktionszeit der richtigen bzw. der falschen Antworten.....	35
3.1.2.3. Die Reaktionszeiten auf die verschiedenen Buchstaben.....	37
3.2. Die MEG-Daten	40
3.2.1. Die frühen Antworten.....	40
3.2.1.1. Die auditorische Aufgabe.....	43
3.2.1.2. Die taktile Aufgabe.....	44
3.2.2. Die späten Antworten	47
4. Diskussion	52
5. Zusammenfassung.....	59
6. Literaturverzeichnis	61
7. Abkürzungsverzeichnis.....	66
Danksagung.....	68
Lebenslauf	69

1. Einleitung

In der vorliegenden Dissertationsarbeit wurde mit Hilfe der Magnetencephalographie die kortikale Aktivität und Verarbeitung beim Erlernen eines künstlichen, morseähnlichen Sprachcodes untersucht, um somit ein besseres Verständnis für die Sprachverarbeitung im Gehirn zu erhalten. Die mit dem Erwerb des Codes einhergehenden Veränderungen, sowohl der kortikalen Aktivität als auch der Verhaltensleistungen, wie die Reaktionszeit und die Prozentzahl der richtigen Antworten (Performance), sollten anhand eines unimodalen auditorischen Trainings getestet werden. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob das unimodale Training sich auch auf andere Modalitäten auswirkt. In den vier Trainingssitzungen sollten die Probanden anhand einer Diskriminationsaufgabe lernen, den akustisch dargebotenen Sprachcode zu erkennen und ihn den jeweiligen Buchstaben zuzuordnen. Zusätzlich wurden im naiven und im trainierten Zustand die jeweiligen Daten mit zwei Kontrollbedingungen (motorisch und taktil) verglichen. Dabei untersuchte man, ob das auditorische Training sich auch auf die Kontrollbedingungen, bei denen der Sprachcode über andere Modalitäten dargeboten wurde, generalisieren lässt. Bei der taktilen Kontrollbedingung wurde der Sprachcode in Form von sensorischen Reizen dargeboten und musste anschließend auch in einer Diskriminationsaufgabe einem Buchstaben zugeordnet werden. In der motorischen Aufgabe musste der dargestellte Sprachcode nur reproduziert werden.

1.1. Die Sprache

Die Sprache ist die Hauptgrundlage menschlicher Kommunikation. Durch die Kommunikation sind wir Menschen überhaupt erst dazu fähig geworden, eine Kultur zu entwickeln und eine Gesellschaft zu prägen.

Meist werden sprachliche Informationen in Form von Sätzen, die eine strukturelle Form wie Syntax und Grammatik haben, ausgedrückt (Saffran 2000). Unsere Kommunikation beruht jedoch nicht nur auf der gesprochenen Sprache, wie sie im Alltag am häufigsten in Form von direkten Gesprächen, Telefon, Radio und Fernsehen auftritt, sondern es gibt eine Reihe von alternativen Kommunikationsmitteln. Diese Kommunikationsmittel, wie z.B. die Gebärdensprache, die Brailleschrift, das Lippenlesen oder Sprachcodes,

wie der Morsecode, sind meist auf bestimmte Situationen und Defizite angepasst. Es stellt sich die Frage, ob die frühe sensorische Verarbeitung ausschließlich in den jeweiligen sensorischen Repräsentationsarealen erfolgt oder ob bereits kurz nach der Darbietung der Sprachinformation, frühzeitig eine Verarbeitung in sprachspezifischen Arealen erfolgt. Die vorliegende Untersuchung, in der von den Probanden ein neuer Sprachcode erworben wurde, könnte einen Beitrag zum Verständnis der Sprachinformationen leisten.

Ab dem 19. Jahrhundert begann man, sich für die Beziehung zwischen Sprache und dem Gehirn zu interessieren. Zuerst dachte man, dass anhand der Form des Schädels Aussagen über die Gestalt des Gehirns und gewisse Fähigkeiten gemacht werden können. Paul Broca stand diesem Standpunkt kritisch gegenüber. Er glaubte, dass gewisse Fähigkeiten mit besonderen Krämpfen der Hemisphären assoziiert wären, die nicht auf die Form des Schädels zurückzuführen seien. Anhand der Autopsie des Gehirns von lernbehinderten Patienten, die Sprache gut verstehen aber nicht gut sprechen konnten, erforschte er das motorische Sprachzentrum im Bereich der Pars triangularis der linken Hemisphäre. Ein paar Jahre später identifizierte Carl Wernicke das sensorische Sprachzentrum, das Zentrum des Sprachverständnisses im linken Temporallappen (Saffran 2000). Heute weiß man, dass neben den klassischen Spracharealen eine Reihe von Netzwerken im Frontal-, Temporal- (Neville & Bavelier 1998) und Parietallappen (Binder et al. 1997, Calandra-Buonaura et al. 2002) sowie das Kleinhirn (Mathiak et al. 2002a) an verschiedenen Aspekten der Sprachverarbeitung beteiligt sind.

Bei den meisten Menschen ist die linke Hemisphäre die sprachdominante Seite (Binder et al. 1997, Mathiak et al. 1999, Saffran 2000, Tallal et al. 1998), während die rechte Hemisphäre eher auf Tonhöhen- und Musikverarbeitung spezialisiert ist (Mathiak et al. 2002b). Die Sprachverarbeitung wird in Untereinheiten, wie die phonologische, syntaktische und semantische Verarbeitung, unterteilt (Neville & Bavelier 1998). Diese unterschiedlichen Aspekte der Verarbeitung sind in speziellen kortikalen Arealen lokalisiert (Posner & Abdullaev 1999). Die Entzifferung von Sprachlauten (Phonemen) sowie die Unterscheidung von anderen auditorischen Stimuli erfolgt sehr früh im supratemporalen, primären auditorischen Kortex (Näätänen et al. 1997, Poeppel et al. 1997). Die

Identifikation kann aber auch in den benachbarten Gebieten erfolgen (Ackermann & Mathiak 1999). Die Verarbeitung semantischer und grammatikalischer Informationen erfordert höhere linguistische Prozesse (Friederici & Schoenle 1980) und erfolgt an unterschiedlichen Orten (Neville et al. 1992 und 1997). Die semantischen Aufgaben aktivieren eher den linken Gyrus medialis und superior des Temporallappens (Friederici et al. 2000). Die syntaktischen und grammatikalischen Aufgaben werden hingegen eher im vorderen Kortextbereich (Mills & Neville 1997, Neville et al. 1997) in der linken Pars opercularis, dem Bereich um den Sulcus frontalis inferior und um den unteren Sulcus praecentralis, verarbeitet (Friederici et al. 2000).

Untersuchungen der Sprachverarbeitung bei Sprachbehinderten, die z.B. eine Behinderung in der Sprachentwicklung aufweisen, sowie Untersuchungen bei Blinden und Tauben, die eine völlig andere Modalität zur Kommunikation nutzen, haben zum Verständnis von Spracherlernen und Sprachverarbeitung beigetragen. Bei dem Erlernen der Gebärdensprache, die eine ähnliche formale Struktur wie die gesprochene Sprache aufweist (Bellugi et al. 1989) und bei Taubstummen die Muttersprache darstellt, ist zu erkennen, dass die Organisation im Gehirn beim Erlernen der Muttersprache gewissen Zwängen, wie z.B. der unterschiedlichen Spezialisierung der Gehirnhälften, unterworfen ist (Neville et al. 1997). Weitere Forschungen zeigten, dass Läsionen im Kortex Taubstummer zu ganz ähnlichen Ausfällen wie bei Normalhörenden führen (Bellugi et al. 1989). Dadurch wird deutlich, dass Hören und artikuliertes Sprechen nicht für die linkshemisphärische Spezialisierung von Sprache nötig sind und dass die Verarbeitung der Gebärdensprache sehr ähnlich wie die der normalen Sprache ist.

Blinde benutzen die so genannte Brailleschrift. Beim Lesen der Brailleschrift muss die einfache taktile Information der Buchstaben in bedeutungsvolle Muster mit lexikalen und semantischen Eigenschaften umgewandelt werden. Dabei werden die üblichen Sprachareale und der somatosensorische Kortex aktiviert (Sadato et al. 1998).

Kinder, die Schwierigkeiten bei der Lese- und Sprachentwicklung aufweisen, sich aber sonst völlig normal entwickeln, zeigen Probleme bei der Erkennung und Verarbeitung von schnell aufeinander folgenden, phonetischen Elementen und Tönen, also auf einer

sehr frühen Ebene der Sprachverarbeitung (Benaisch et al. 2002, Merzenich et al. 1996, Nagarajan et al. 1999, Renval & Hari 2002, Tallal et al. 1998).

Es gibt verschiedene Untersuchungen, in denen eine künstliche Sprache erlernt wurde, die sich zwar von der natürlichen audiovisuellen Sprache unterscheidet, aber grammatikalisch ähnliche Elemente aufweist (Friederici et al. 2002, Opitz & Friederici 2003, Posner & Abdullaev 1999). Friederici et al. untersuchten hierbei, ob sich das Verarbeitungsmuster einer im Erwachsenenalter erlernten Sprache von der Muttersprache unterscheidet. Opitz & Friederici nutzten eine künstliche Sprache, um die Rolle des Hippocampus beim Lernen zu erforschen. Hier konnte gezeigt werden, dass die Mechanismen, die beim Erlernen der natürlichen Sprache eine Rolle spielen, auch beim Erlernen der künstlichen Sprache von Bedeutung sind (Mintz 2002) und dass die künstliche Sprache nach dem Erlernen ein ähnliches Aktivitätsmuster wie die natürliche Sprache aufweist (Friederici et al 2002).

Der in der Studie benutzte Sprachcode wurde so gewählt, dass er in mehreren Modalitäten einsetzbar war. Als Grundlage diente dafür das Morsecodesystem. Während der Test- und Trainingssitzungen wurde der Sprachcode in der auditorischen Aufgabe gelernt. Die Information sollte hier nicht in Form einer Buchstabensequenz, sondern in einer schnellen Abfolge von Klicks, am rechten und linken Ohr, präsentiert und mit sprachlichen Elementen (Buchstaben) in Verbindung gebracht werden.

1.2. Der Morsecode

Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte Samuel Morse das Morsecodesystem. Dies war ein bedeutender Schritt in der Entwicklung der Nachrichtenübermittlung, denn nun war es möglich, Nachrichten auch über größere Distanzen schnell (125 Buchstaben/min) zu übermitteln. Der Morsecode stellt neben Gebärdensprache und Brailleschrift eine Alternative zur normalen Kommunikation dar.

Bei der Morsetelegraphie werden die Buchstaben und Zahlen durch verschiedene Kombinationen aus kurzen und langen auditorischen Pulsen und nicht, wie in der gesprochenen Sprache, durch spektrale und komplexe Sprachlaute präsentiert (Kujala et al. 2003, Montnemery et al. 1991 & 1992).

Es gibt viele Studien über das Erlernen von Morsecodes, es ist aber wenig über die Wahrnehmung und Verarbeitung von diesen bekannt. Bei einer Studie von Clawson et al. (2001) wurde ein Morsecodetraining durchgeführt, bei dem der Aufnahmeprozess des Codes in zwei Unteraufgaben unterteilt wurde. Eine Gruppe trainierte die Umsetzung des auditorischen Codes in die Elementsequenzen, ein eher prozeduraler Prozess. Eine weitere Gruppe trainierte den eher deklarativen Prozess, die Umsetzung aus den Elementsequenzen in die jeweiligen Buchstaben. Die Ergebnisse ergaben, dass das Erlernen einer Untereinheit sich positiv auf die gesamte Aufgabe, vor allem auf die Prozentzahl der richtigen Antworten, auswirkte.

Zur Erkennung und Produktion des Morsecodes sind verschiedene Befähigungen, wie spezielle linguistische und praktische Fähigkeiten, sowie die Fähigkeit zur auditorischen Diskrimination erforderlich (Ardila 1987). Papçun et al. (1974) erkannten, dass es bei der Präsentation kurzer Morsecodes bei naiven sowie bei geübten Personen einen Wahrnehmungsvorteil im rechten Ohr gab. Bei der Verarbeitung langer Morsecodes zeigte sich bei den naiven Personen ein Wahrnehmungsvorteil des linken Ohrs mit Dominanz der rechten Hemisphäre. Daraus folgerte man, dass die Versuchspersonen Strategien entwickeln, die gesamten Eigenschaften des Stimulus zu erkennen. Weitere Experimente von Kujala et al. (2003) und Lang et al. (1987) zeigten am Anfang des Trainings eine kortikale Aktivität auf der nicht sprachdominanten Hemisphäre mit einer Lateralisierung im Verlauf zur sprachdominanten Seite sowie eine starke Beziehung zwischen der neuralen Repräsentation von Tonmustern und von Lauten.

Der Sprachcode, der in der Studie benutzt wurde, wurde von dem ursprünglichen Morsecode abgewandelt, damit er in verschiedenen Modalitäten vermittelt werden konnte. Zudem sollte mit einem Sprachcode, der beide Hirnhälften involviert, eine eventuelle vorhandene Dominanz einer Hemisphäre und die intrakortikale Kommunikation bei Sprachverarbeitungsprozessen untersucht werden. Die kurzen und langen Elemente (Punkt und Strich) wurden in zeitlich gleichlange Stimulationen an der rechten bzw. linken Körperhälfte umgewandelt. So konnte der Code auditorisch und taktil vermittelt und motorisch reproduziert werden.

1.3. Die Verarbeitung der taktilen und auditorischen Reize

Die aus der Umgebung kommenden sensorischen Reize werden über mehrere Verschaltungen zu den speziellen unimodalen Kortexarealen geleitet und von dort aus über die sekundären unimodalen Kortizes zu den verschiedenen Assoziationskortex weitergeleitet, wo die multimodale Verarbeitung der Reize stattfindet.

1.3.1. Die auditorische Verarbeitung

Die Hörbahn beginnt in den Ncll. cochleares in der Medulla oblongata und wird bilateral mehrmals zum Thalamus verschaltet. Von dort beginnen die Hörstrahlen, die zur primären Hörrinde an der dorsalen Fläche des Temporallappens (Henschl-Querwindungen) ziehen, der lateral direkt die sekundäre Hörrinde anliegt. Beide Ohren projizieren demnach in jeweils beide Hemisphären, wobei die kontralaterale Verschaltung zu einer stärkeren Repräsentation auf kortikaler Ebene führt und anscheinend dabei die ipsilateralen Verschaltungen unterdrückt oder geblockt werden (Mathiak et al. 2002). Da die auditorischen linguistischen Informationen über das linke Ohr erst noch über das Corpus callosum zum linken Temporallappen transferiert werden müssen, neigen diese Informationen eher zur Verzerrung (Mathiak et al. 2002).

Auf einen auditorischen Stimulus erfolgt nach etwa 50 ms ein positiver Peak (P50), dem ein negativer Peak (N1) mit einer Latenz von 100 ms (Mathiak et al. 1999) und danach wieder ein positiver Peak (P2) mit einer Latenz von 200 ms folgen. Frühe und mittlere Antworten (<100 ms) haben ihren Ursprung im primären auditorischen Kortex, die späten Antworten (>100 ms) entstehen im sekundären auditorischen Kortex. Die N1-Antwort, die in der Nähe des primären auditorischen Kortex entsteht, scheint aber bloß die Wahrnehmung von akustischen Veränderungen wie Schalldruck und spektrale Eigenschaften widerzuspiegeln (Mathiak et al. 2002).

Der auditorische Kortex ist unter anderem auf die zeitliche Entschlüsselung auditorischer Signale (Ackermann et al. 1999) sowie auf die Entzifferung von Sprachlauten (Ackermann & Mathiak 1999) und Differenzierung zwischen Sprachelementen und komplexen akustischen Stimuli (Neville & Bavelier 1998) spezialisiert. Zwischen dem

auditorischen Kortex und der weiteren phonologischen Verarbeitung gibt es jedoch einen funktionalen und örtlichen Unterschied (Fiez et al. 1996).

1.3.2. Die taktile Verarbeitung

Die somatosensorischen Reize werden über das Rückenmark, den Hirnstamm und den Thalamus zum primären somatosensorischen Kortex (SI) im Gyrus postcentralis geleitet. Da die somatosensorischen Bahnen auf ihrem Weg zum Kortex kreuzen, werden die Informationen der rechten Körperhälfte zur linken Kortexhälfte geleitet und umgekehrt, wobei auch der ipsilaterale Kortex wahrscheinlich über transcallosale Wege erregt wird (Schnitzler et al. 1995).

Die Aktivität der frühen (20-40 ms) (N20) und mittleren (40-80 ms) Antworten (P50-Peak) ist typischerweise im Gyrus postcentralis der kontralateralen Hemisphäre lokalisiert (Gallen et al. 1993, Hari et al. 1984, Hämäläinen et al. 1990, Kakigi et al. 2000, Lounasmaa et al. 1996). Allerdings werden bereits für die frühe Phase der Verarbeitung in SI Koaktivierungen in SII und den assoziierten Kortizes beschrieben (Karhu & Tesche 1999).

Die späte (80-120 ms) Antwort (P100-Peak) ist schwächer als SI (Forss et al. 2001) und entsteht sowohl kontra- als auch ipsilateral (Hämäläinen et al. 1990, Kakigi et al. 2000, Lounasmaa et al. 1996) im sekundären somatosensorischen Kortex in der Pars opercularis im Bereich des Sulcus lateralis (Hari et al. 1983 & 1984, Kanno et al. 2003). Jedoch ist auf der kontralateralen Seite eine kürzere Latenz und eine stärkere Antwort zu beobachten (Kaukoranta et al. 1986, Simones & Hari 1999).

1.3.3. Die kortikale Veränderung durch Lernen und Training

Das Trainieren und Erlernen von Fähigkeiten hat nicht nur Auswirkungen auf das Verhalten, wie eine schnellere Reaktionszeit und ein besseres Bewältigen der Aufgabe, sondern führt auch zu einer Veränderung der neuronalen Strukturen und Lokalisationen im Kortex (Godde et al. 2003, Mills & Neville 1997, Neville & Bavelier 1998, Posner & Abdullaev 1999). Hierbei kann es sowohl zu einer Vergrößerung der kortikalen Repräsentation als auch zu einer Abnahme der kortikalen Aktivität kommen. So ist bei

Blinden der Finger, mit dem die Brailleschrift gelesen wird und mit dem die sprachliche Information über taktile Reize aufgenommen wird, auf einer deutlich größeren Fläche als die anderen Finger im Kortex präsentiert.

Beim Erlernen einer künstlichen Sprache müssen die bisher unbekannt und unbedeutenden Stimuli erst einmal mit sprachlicher Information in Verbindung gebracht werden. Die Studie von Opitz & Friederici (2003) zeigt, dass sich die Aktivität beim Erlernen einer künstlichen Sprache anfangs im Bereich der medialen Temporallappen beider Hemisphären befindet und so auf Ähnlichkeit basiert und im Verlauf zu den sprachbezogenen Verarbeitungssystemen im linken frontalen Kortex lateralisiert.

Da es sich in der Studie auch um das Erlernen und Verarbeiten sprachlicher Informationen handelt, wird vermutet, dass es hier ebenfalls zu einer Lateralisierung der kortikalen Aktivität auf die linke Hemisphäre kommt.

1.4. Die Magnetencephalographie

Die Magnetencephalographie (MEG) ist ein nicht-invasives Verfahren, mit dem sehr schwache biomagnetische Felder direkt von der Kopfoberfläche aufgezeichnet werden. Diese Magnetfelder, die sich im Bereich von weniger als 1 pT (pikotesla, 10^{-12}) befinden, können aufgrund der biophysikalischen Aktivität der Nerven und der Form sowie der Leitfähigkeit des Gehirns abgeleitet werden (Gallen et al. 1993). Wenn mehrere tausend Neuronen synchron aktiv sind, ist das Magnetfeld stark genug, um mit hochsensiblen Sensoren, den so genannten SQUID-Magnetometern (Superconducting quantum interference devices), von der Kopfoberfläche abgeleitet werden zu können (Lounasmaa et al. 1996).

Da die MEG eine besondere Selektivität gegenüber oberflächlichen, tangential orientierten Nervenströmen und eine besonders gute räumliche (~5 mm) und zeitliche (~1 ms) Auflösung bietet (Lounasmaa et al. 1996, Mathiak et al. 1999), ist es bestens zur Untersuchung von Verarbeitung, auditorischer, visueller und somatosensorischer Stimuli und für die Erforschung neuronaler Mechanismen, die der Sprache zugrunde liegen, geeignet (Hari 1991, Nagarajan et al. 1999).

1.5. Das Versuchsdesign und die Hypothesen

In meiner Studie sollte durch die Verwendung eines einfachen Sprachcodes (s. Abb. 2; Kapitel 2.4.) ein früherer Verarbeitungsprozess kleinster Sprachelemente untersucht werden. Hierzu wurden die kurzen und langen Elemente der Buchstaben des ursprünglichen Morsealphabets in Stimuli an der rechten und linken Körperhälfte umgewandelt, sodass eine akustische und taktile Präsentation sowie eine motorische Reproduktion möglich war. Zwar liegt der Präsentation der Buchstaben, durch Stimuli an der rechten und linken Körperhälfte, im Gegensatz zur Brailleschrift und zum Morsecodesystem ein unterschiedliches Prinzip zugrunde, die Aufnahme der Information von einfachen auditorischen und taktilen Reizen und die gedankliche Verbindung zu den jeweiligen Buchstaben erfolgt jedoch nach dem gleichen Prinzip. Da man in Studien über die Verarbeitung der Brailleschrift und des Morsecodesystems eine Verarbeitung in den sprachbezogenen Arealen nachweisen konnte (Bellugi et al. 1989, Friederici et al. 2002), sollte auch hier untersucht werden, ob die Verarbeitung in diesen Spracharealen stattfindet und ob es eventuell im Verlauf zu einer Lateralisierung zur linken Hemisphäre kommt.

Im naiven und im trainierten Zustand, den so genannten Testsitzungen, wurde den Versuchspersonen (VPs) der Code in drei verschiedenen Aufgaben präsentiert.

Bei den Diskriminationsaufgaben wurde den VPs der Code auditorisch oder taktil präsentiert und visuell wurden ihnen zwei Buchstaben mit den jeweiligen Codepfeilen gezeigt. Wenn die VPs meinten, dass ihnen der rechte Buchstabencode präsentiert wurde, sollten sie den rechten Taster drücken und umgekehrt.

In der motorischen Aufgabe wurde ein Buchstabe mit Pfeilcodes präsentiert und die VPs mussten diesen mit Hilfe der Taster, die links und rechts von ihnen lokalisiert waren, reproduzieren.

Um eine repräsentative Zahl der Daten zu erhalten, führte man in jeder Testsitzung die Aufgaben zweimal durch, sodass es pro Testsitzung sechs Aufgabenblöcke gab. Während der Testsitzungen wurde die kortikale Aktivität bei den Aufgaben mit Hilfe der Magnetencephalographie aufgezeichnet. In einem intensiven unimodalen Training mit vier Trainingssitzungen zwischen den Testsitzungen lernten die Versuchspersonen jedoch nur die Verknüpfung von auditorischen Signalen mit den Buchstaben.

Sowohl in den Test- als auch in den Trainingssitzungen wurden die Verhaltensdaten, wie die Reaktionszeit und die Prozentzahl der richtigen Antworten, festgehalten.

Anhand der aufgezeichneten Daten, wie der kortikalen Aktivität, der Reaktion und Diskriminationsleistung, sollte einerseits geprüft werden, wie gut der Sprachcode erlernt wurde, andererseits sollte untersucht werden, ob das Trainieren der auditorischen Aufgabe sich auch auf die taktile und motorische Aufgabe auswirkt. Der Transfer des Gelernten in die anderen Modalitäten würde auf gemeinsame Prozesse bei der Verarbeitung der verschiedenen Aufgaben hinweisen. Die Studie von Alcantara et al. (1993), in der das Trainieren eines Sprachcodes in einer Modalität (taktile oder auditorisch) sich jeweils positiv auf die andere auswirkt, deutet darauf hin, dass das Auftreten eines Transfers wahrscheinlich ist.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse im Bereich der Sprachforschung, bei denen gezeigt wurde, dass verschiedene Sprachformen (gesprochene und geschriebene Sprache, Brailleschrift, Gebärdensprache und künstliche Sprachen) sehr ähnliche Verarbeitungsmuster aufweisen, wird angenommen, dass die Trainingssitzungen sich voraussichtlich sowohl auf die trainierte Modalität als auch auf die anderen Modalitäten im Bezug auf die Verhaltensleistungen und die kortikalen Aktivitäten auswirken.

2. Material und Methoden

2.1. Der Versuchsablauf

Während der Studie sollten die Versuchspersonen durch mehrere Aufgaben („auditorisch“, „taktil“ und „motorisch“) einen multimodalen Sprachcode erlernen. Die Trainingssitzungen fanden jedoch nur in einer Modalität (auditorisch) statt. Vor bzw. nach den Trainingssitzungen wurde in einer Messung, den so genannten Prä- und Post-Testsitzungen, die Veränderung der kortikalen Aktivität anhand von evozierten Feldern im Magnetencephalogramm gemessen.

Zusätzlich zeichnete man in den Messungen die Prozentzahl und die Reaktionszeit der Versuchspersonen in den einzelnen Aufgaben auf, um zu erfahren, ob das Training in der auditorischen Aufgabe auch eine Steigerung der Prozentzahl und Verminderung der Reaktionszeit in der taktilen und motorischen Modalität bewirkt.

2.2. Die Versuchspersonen

Die vorliegende Studie ist Bestandteil einer Serie von Experimenten. Das gesamte Experiment war in drei Teile mit je 12-13 rechtshändigen Versuchspersonen geteilt. Jede Gruppe trainierte den Sprachcode in einer der drei Modalitäten (auditorisch, taktil oder motorisch). In meiner zwölfköpfigen, „auditorischen“ Gruppe wurden sieben weibliche und fünf männliche Personen im Alter von 17-27 Jahren (mittleres Alter 23.42 Jahre, SD = 0.5 Jahre) getestet. Jede Versuchsperson hatte vor Beginn der Studie einen Fragebogen zur Händigkeit (Oldfield Edinburgh Inventory) auszufüllen, um die Rechtshändigkeit zu prüfen und um Linkshänder vom Experiment auszuschließen.

Vor Beginn der Studie erhielt jede Versuchsperson eine Aufklärung über die möglichen Risiken, die Ziele und den Ablauf der Studie. Die Zustimmung zur freiwilligen Teilnahme wurde in Form einer schriftlichen Einverständniserklärung eingeholt. Für die Teilnahme und den Aufwand bekamen die VPs 65,- € als Entlohnung.

2.3. Die Datenerfassung mit dem MEG

Bei den Messungen vor und nach den Trainingssitzungen (Prä- und Post-Testsitzungen) wurde die kortikale Aktivität anhand evozierter Magnetfelder in einem 151-kanaligen MEG-Ganzkopfgradiometer (CTF Inc., Canada, 1997) aufgezeichnet. Da das MEG sehr anfällig für magnetische Störungen ist, wurde die Messung sitzend, in einem elektromagnetisch abgeschirmten Raum (dreilagige Mu-Metallschicht, Vakuumschmelze, Hannau Deutschland) durchgeführt. Zuvor mussten die VPs alle ferromagnetischen Gegenstände, wie z.B. Schmuck, Uhr usw., ablegen und metallfreie Kleidung (OP-Kittel und -Hosen) tragen.

Der Dewar (der helmförmige, mit Helium gefüllte Thermocontainer, in dem sich die MEG-Sensoren befinden) war in einem Winkel von 15° gekippt, damit die VPs eine möglichst bequeme Sitzposition einnehmen konnten und während der Messung problemlos die Innenseite des Dewars mit dem Kopf berühren konnten. Jeder der MEG-Sensoren war mit einem SQUID (Superconducting quantum interference devices) verbunden, der die magnetische Aktivität des Gehirns maß.

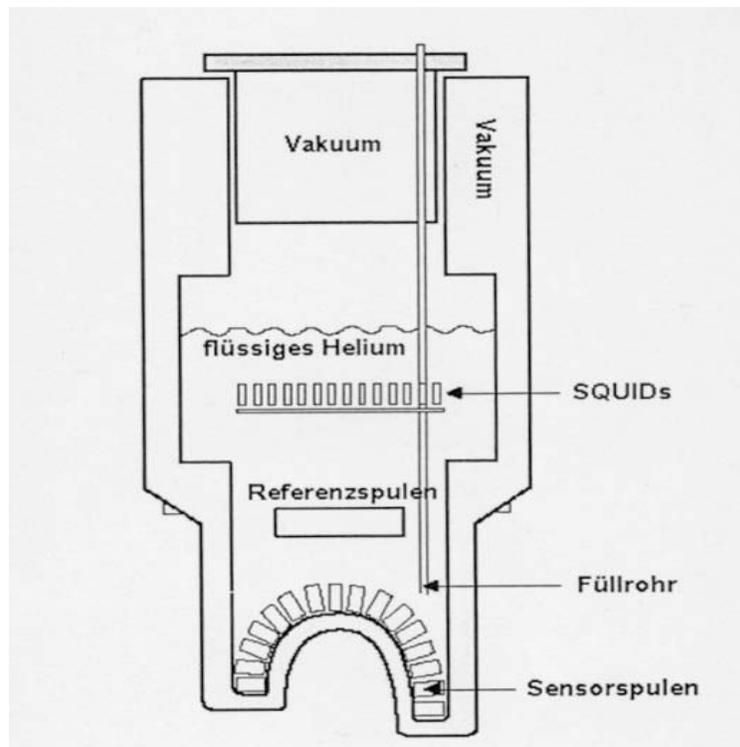


Abb. 1: Schematische Zeichnung des Dewars

Um die Lokalisation des Kopfes bezüglich der Magnetsensoren zu bestimmen und etwaige Kopfbewegung während der Messung zu detektieren, brachte man drei zusätzliche Kopfspulen am Nasion und dem rechten und linken Präaurikularpunkt an, deren Position jeweils vor und nach jedem Durchgang ermittelt wurde. Betrug die Differenz dieser beiden Lokalisationspunkte mehr als 5 mm, musste der Durchgang nochmals wiederholt werden. Um die Kopfbewegung zu minimieren, wurde der Kopf mit Schaumstoffpolstern fixiert.

Die visuelle Präsentation der Buchstaben mit ihren Codes wurde durch einen Projektor über Spiegel in den abgeschirmten Messraum auf eine Mattscheibe, die von den VPs etwa 1 m entfernt war, realisiert. Zu Beginn des Messdurchgangs wurden die VPs instruiert, den Kopf möglichst nicht zu bewegen, die Augen auf die Stimulation zu richten und so wenig wie möglich zu blinzeln. Zur Beantwortung der Aufgaben stand den VPs rechts und links einen Taster auf der Armlehne zur Verfügung. Während jeder Aufgabe wurden 200 Trials der jeweiligen Codestimuli präsentiert und die magnetische Hirnaktivität aufgezeichnet. Je nach Aufgabe und Reaktionszeit des jeweiligen Probanden dauerten die Durchgänge zwischen 10-15 Minuten. Zwischen den einzelnen Aufgaben konnten die VPs sich ausruhen und den Kopf bewegen.

Die Aufzeichnung und Speicherung der MEG-Messdaten erfolgte an einer Workstation (Hewlett-Packard, USA) und dem Programm Acq. Diese Daten wurden kontinuierlich mit einer Samplingrate von 1250 Zeitpunkten pro Sekunde aufgezeichnet und schon online mit einem Lowpass-Filter (416 Hz) 4. Ordnung vorgefiltert sowie in 200 Trials geschnitten.

Zur Stimulation wurde ein zusätzlicher PC als Stimulationsrechner eingesetzt, mit dem man, durch eine speziell der Studie angepasste Software, die auditorische, taktile und motorische Stimulation steuerte. Die Synchronisierung zwischen dem Stimulationsrechner und der Datenaufzeichnung erfolgte über Trigger, die vom Stimulationsrechner gesendet wurden.

Der Stimulationsrechner zeichnete während der Aufgaben die jeweilig präsentierten Buchstaben, die jeweilige Antwort (ob richtig oder falsch) und die dazugehörige Reaktionszeit auf. Nach der Sitzung wurden die Daten zur Auswertung und weiteren Bearbeitung vom Stimulations- und Akquisitionsrechner auf einen peripheren Rechner exportiert.

2.4. Der Sprachcode

Die Versuchspersonen sollten während der Studie einen ihnen völlig neuartigen Sprachcode erlernen. Hierzu wählte man zwölf Buchstaben, die je aus vier Codeelementen bestanden. Als Grundlage dieses Buchstabencodes diente das Morsealphabet, das aber in diesem Fall nicht akustisch in Form von „kurzen Punkten“ und „langen Strichen“ präsentiert wurde, sondern aus Signalen, die entweder auf der rechten bzw. der linken Körperseite dargeboten oder generiert wurden. In den Diskriminationsaufgaben wandelten wir den kurzen Punkt des Morsecodes in eine Stimulation der rechten Seite, den langen Strich zu einer Stimulation der linken Seite um. In der vorliegenden Untersuchung wurde nur ein reduzierter Teil des Morsealphabets verwendet. Um die zeitlichen Schritte der Verarbeitung der Buchstaben vergleichbar zu gestalten, wurden nur Buchstaben benutzt, die aus vier Elementen bestanden. So entstand das unten aufgeführte Alphabet, das insgesamt zwölf Buchstaben umfasste (Abb. 2). Die durch diese Zeichen repräsentierten Buchstaben wurden in den verschiedenen Modalitäten (auditorisch, taktil und motorisch) benutzt, um so später die unterschiedlichen Verarbeitungen zu vergleichen.

Sprachcode-Zeichen

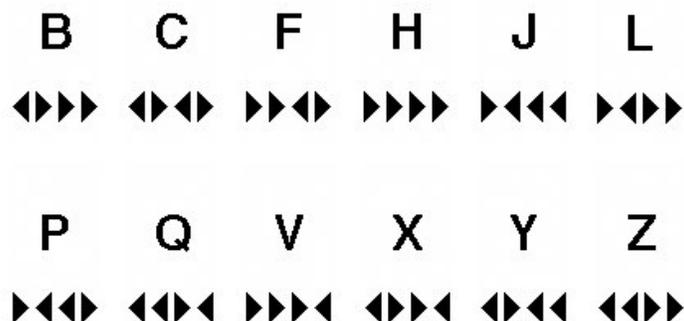


Abb. 2: Der Sprachcode bestand aus zwölf Buchstaben, die sich aus 4-elementiger Kombinationen linker und rechter Stimulationen bzw. motorischer Reaktionen zusammensetzten. Die Pfeilsequenzen sind vom ursprünglichen Morsecodesystem abgeleitet. ▶ bedeutet das Signal auf der rechten Seite, ◀ bedeutet das Signal auf der linken Seite. Diese Kombination der Pfeilsequenzen und Buchstaben wurde für die visuelle Präsentation der Buchstaben während der Messungen verwendet.

2.4.1. Die Darbietung der Stimulation

In diesem Kapitel werden nur die unterschiedlichen Präsentationen der Buchstaben in den jeweiligen Aufgaben beschrieben. Auf die genaue Abfolge und Rolle der Stimulation wird im Kapitel 2.5.1. eingegangen.

2.4.1.1. Die visuelle Präsentation

Die visuelle Präsentation des Sprachcodes war in jeder Aufgabe der Test- und Trainingssitzung enthalten. Bei der auditorischen und taktilen Aufgabe wurden nach Darbietung des Codes in der jeweiligen Modalität zwei Buchstaben visuell präsentiert und die VPs mussten sich entscheiden, welcher der beiden der Dargebotene war. In der motorischen Aufgabe wurde nur ein Buchstabe dargeboten und der Code musste reproduziert werden.

Der Sprachcode wurde dabei auf einer Projektionswand dargestellt, die sich etwa 1m vor den VPs befand. Die Präsentation der Codeelemente erfolgte in Form von Rechts- bzw. Linkspfeilen. Die Buchstaben und ihre jeweiligen Codes wurden in weißer Farbe auf einem grauen Hintergrund abgebildet. Mit einer Schriftgröße von 30pt und einer Pfeilgröße von 30x19 Pixel konnte man bei der MEG-Aufzeichnung unnötige Augenbewegungen vermeiden. Bei dieser Größe von 11.2x11.2 cm und einem Sehwinkel von ca. 7° war es möglich, die Darstellung, auf Grund des fovealen Sehens, auf einen Blick zu erfassen. Bei den Trainingssitzungen wurden die Buchstaben und die jeweiligen Codesequenzen auf einem Bildschirm dargeboten.

2.4.1.2. Die auditorische Präsentation

Da in dem elektromagnetisch abgeschirmten Raum des MEGs die Benutzung von Kopfhörern nicht möglich war, wurde über luftleitende Schläuche und Ohrstöpsel den Probanden ein 2 ms langes Rauschen, das als Klickgeräusch wahrgenommen wurde dargeboten. Je nach Codeelement konnte dieses auf der linken oder rechten Seite gehört werden. Zwischen den Elementen befand sich ein 148 ms langes Interstimulationsintervall.

2.4.1.3. Die taktile Präsentation

An der rechten und linken Fingerkuppe wurde eine pneumatische Reizvorrichtung angebracht. Diese Reizvorrichtung bestand aus einer Membran, die über luftleitende Schläuche mit einer Druckluftvorrichtung verbunden war. Durch die Druckluft wölbte sich die Membran an den Finger und erzeugte so einen nicht schmerzhaften Berührungszreiz. Die einzelnen Stimuli hatten eine Dauer von 30 ms und ein Interstimulationsintervall von 120 ms.

Da elektrische Ventile diese Reize steuerten und so beim Öffnen und Schließen dieser Ventile ein akustisch hörbares Geräusch entstand, erhielten die Probanden über die Ohrstöpsel ein dauerhaftes Rauschen. Mit dieser Maskierung des Schaltgeräusches wurde eine akustische Hirnantwort des taktilen Reizes unterdrückt.

2.5. Der detaillierte Versuchsablauf

Die gesamte Studie wurde in zwei Test- und vier Trainingssitzungen aufgeteilt. Während der beiden Testsitzungen, vor und nach den Trainingssitzungen, testete man die VPs im naiven und im trainierten Zustand, in dem sie gelernt hatten, die verschiedenen Codes einzelnen Buchstaben zuzuordnen. Hierbei sollten sie den Sprachcode in den verschiedenen Modalitäten (auditorisch, taktil und motorisch) anwenden. Zur Untersuchung trainingsinduzierter Hirnaktivität zeichnete man in den Testsitzungen die kortikale Aktivität mit dem MEG auf.

In den Trainingssitzungen wurde die Zuordnung der Buchstaben zu den akustisch dargebotenen Reizen trainiert und die Verknüpfung zwischen Buchstaben und den visuellen Mustern geübt. Zusätzlich wurden in allen Test- und Trainingssitzungen die Reaktionszeit, die Prozentzahl richtiger Antworten und die präsentierten Buchstaben aufgezeichnet.

2.5.1. Die Prä- und Posttestsitzungen

Während der Prä- und Posttestsitzungen zeichnete man die kortikale Aktivität im naiven sowie im trainierten Zustand mit dem MEG auf. Da jede Modalität zweimal pro Testsitzung durchgeführt wurde, gab es sechs Messblöcke, deren Abfolge zwischen den VPs randomisiert wurde. In den einzelnen Aufgaben, die im Folgenden beschrieben werden,

bekamen die VPs 200 Buchstaben mit den jeweiligen Codes dargeboten, erhielten aber keine Rückmeldung, ob ihre Antwort richtig oder falsch war. Nach der Prätestsitzung bekamen die VPs eine Liste der Buchstaben und deren Codes ausgehändigt, damit sie diese selbständig üben konnten.

2.5.1.1. Die auditorische Aufgabe

Bei der auditorischen Aufgabe handelte es sich um eine Diskriminationsaufgabe. Bei jedem Trial hörte der Proband zunächst den Code, der aus vier Elementen bestand, die dem rechten bzw. linken Ohr als Klicks dargeboten wurden. Danach bekam die Person zwei Buchstaben mit den jeweiligen Pfeilcodes visuell auf einer Mattscheibe dargeboten. Sie musste sich nun entscheiden, welches der beiden Zeichen zuvor präsentiert worden war und dies durch Drücken von einem der beiden Taster, die rechts und links auf der Armlehne befestigt waren, anzeigen.

Das Interstimulationsintervall (ISI) zwischen den einzelnen auditorischen Codeelementen betrug 148 ms. 420 ms nach dem letzten Stimulus begann die visuelle Darstellung der beiden Buchstaben, zwischen denen sich die VP entscheiden musste. Die Buchstaben wurden bis zur Reaktion der Versuchsperson maximal aber 3 s dargeboten.

Pro Messung wurden jeweils 200 Buchstaben in zufälliger Reihenfolge dargeboten und die dadurch evozierten Felder kortikaler elektromagnetischer Hirnaktivität aufgezeichnet. Um nur die kortikale Aktivität während der Stimulation und der visuellen Darbietung zu speichern, schnitt man aus den kontinuierlich aufgezeichneten MEG-Daten 2.05 s lange Trialepochen heraus, die 250 ms vor der ersten Stimulation begannen und 900 ms nach der visuellen Stimulation endeten.

Ablauf des auditorischen bzw. taktilen Trials

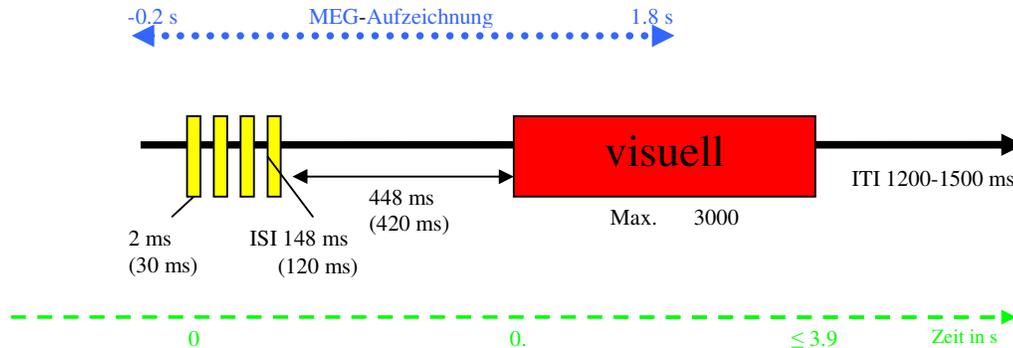


Abb. 3: Schematische Darstellung der auditorischen bzw. taktilen Aufgabe. Die Trials beginnen mit 4 Stimulationen (gelbe Blöcke) von je 2 ms (bzw. 30 ms bei der taktilen Aufgabe) mit einem Interstimulationsintervall (ISI) von 148 ms (taktile 120 ms). 900 ms nach dem 1. Stimulus begann die visuelle Präsentation von zwei Buchstaben mit ihren Pfeilcodes. Bis zu 3.9 s nach Trialbeginn sollten die VPs so schnell wie möglich antworten, danach wurde die visuelle Stimulation abgebrochen und der nächste Trial begann nach 1.2-1.5 s (ITI). Die MEG-Aufzeichnung begann 0.2 s vor und endete 1.8 s nach dem ersten Stimulus.

2.5.1.2. Die taktile Aufgabe

Die taktile Aufgabe stimmte mit der auditorischen Aufgabe weitgehend überein. Die Stimuli wurden jedoch nun nicht durch Klickgeräusche, sondern durch taktile Stimuli präsentiert. Da die Stimulusdauer bei der taktilen Aufgabe 30 ms betrug, passte man das Interstimulusintervall der ursprünglichen Trialdauer an und es ergab so 120 ms. Auch in dieser Aufgabe wurden die unterschiedlichen Buchstabencodes in randomisierter Reihenfolge in 200 Trials dargeboten.

2.5.1.3. Die motorische Aufgabe

Im Gegensatz zu den sensorischen Aufgaben wurde bei der motorischen Aufgabe zuerst der Buchstabe mit dem dazugehörigen Pfeilcode visuell präsentiert. Nun sollten die VPs den Code durch Drücken der rechts und links von ihnen angebrachten Taster reproduzieren. Bei dieser Aufgabe erhielten die VPs sowohl eine somatosensorische (durch Berühren der Taster) als auch eine akustische Stimulation (durch ein Klickgeräusch über die Ohrstöpsel), die den gedrückten Tasten entsprach.

Ablauf des motorischen Trials

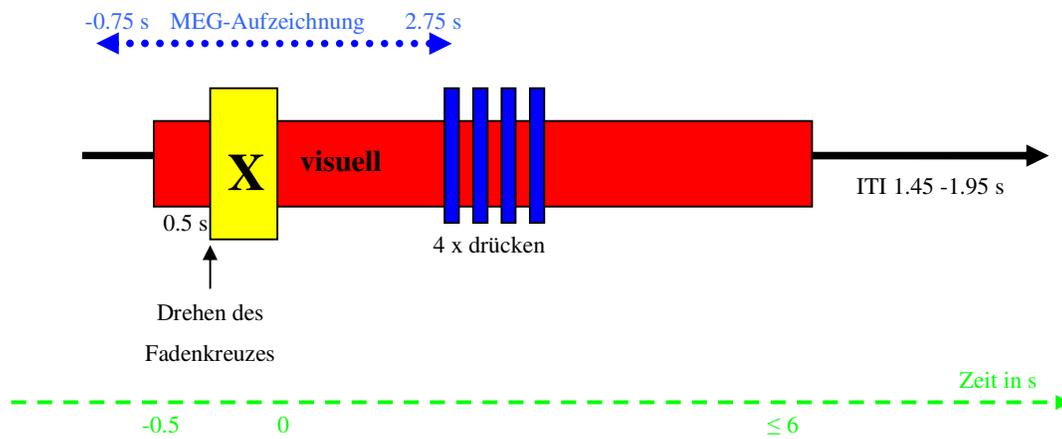


Abb. 4: Schematische Darstellung des motorischen Trials. Beginn der visuellen Präsentation ist zum Zeitpunkt -0.5 s, die über den gesamten Trial abgebildet bleibt. Ab der Drehung des Fadenkreuzes (Zeitpunkt 0) konnten die VPs den Code nachahmen. Die MEG-Aufzeichnung begann zum Zeitpunkt -0.75 s und endete 2.75 s nach der Drehung des Fadenkreuzes.

Der Zeitpunkt ab dem die VPs mit der motorischen Reproduktion des Buchstabencodes beginnen sollten, wurde durch das Drehen eines zentralen Fadenkreuzes signalisiert. Dieses erschien 500 ms nach Beginn der visuellen Präsentation des Buchstabencodes. Die VPs sollten in den nächsten 6 s so schnell wie möglich antworten. 250 ms danach endete die visuelle Darbietung. Auch bei dieser Aufgabe präsentierte man die 200 Aufgaben randomisiert und man schnitt die Trialepisoden aus der kontinuierlichen MEG-Aufzeichnung heraus. Hier begann die Aufzeichnung 0.75 s vor und endete 2.75 s nach dem Drehen des Fadenkreuzes. Dadurch wurde nur die Erkennung und Reproduktion der Codes aufgezeichnet.

2.5.2. Die Trainingssitzungen

Die vier Trainingssitzungen wurden an vier verschiedenen Tagen zwischen Prä- und Posttestsitzung durchgeführt. Zwischen diesen Trainingssitzungen sollte ein möglichst geringer Abstand sein. Jedes Training teilte man in je vier zwölfminütige (dies entsprach etwa der durchschnittlichen Aufgabendauer der Testsitzungen) Blöcke auf. Der Aufbau der Trainingssitzungen stimmte mit der auditorischen Aufgabe der Testsitzung überein, nur wurden hier nicht die kortikalen Aktivitäten aufgezeichnet, sondern die

Trainingssitzung wurde außerhalb der MEG-Kammer an einem Computerbildschirm durchgeführt. Um die VPs zum Lernen des Buchstabencodes zu bringen, erhielten sie nach der akustischen Stimulation nur noch die beiden Buchstaben ohne die dazugehörigen visuellen Codes präsentiert. Die Auswahl des zum akustisch dargebotenen Code passenden Buchstabens erfolgte über eine der beiden Tasten. Nach dem Tastendruck bekamen die VPs ein Feedback (ob ihre Antwort richtig oder falsch war für 0.5 s) und die Prozentzahl der richtig erkannten Codes angezeigt, um so den Lerneffekt zu verbessern und die VPs zu motivieren.

2.6. Die Auswertung der Verhaltensdaten

Aus dem Protokoll des Stimulationsrechners konnten die Informationen über die dargestellten Buchstaben, den dazugehörenden Code, die Reaktionszeit und die richtige bzw. falsche Antwort entnommen werden. Mit einem in Matlab 5.3.0 (The Mathworks Inc., 1999) erstellten Auswertungsprogramm wurden die Daten der einzelnen Test- und Trainingssitzungen für alle VPs berechnet und über die 200 Trials gemittelt. Folgende Aspekte der Reaktionszeit wurden beachtet:

- Die mittlere Reaktionszeit über alle Trials
- Die Reaktionszeit bei richtigen bzw. falschen Antworten
- Die Reaktionszeiten für die einzelnen Buchstabencodes.

Zusätzlich wurde die Prozentzahl der richtigen Antworten (Performance) in den einzelnen Test- und Trainingssitzungen berechnet.

Zur Zusammenstellung der Mittelwerte und zur graphischen Aufbereitung der Daten wurden die Daten in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel (Microsoft Inc., 2000, USA) eingetragen. Es wurde für die Performance und die Reaktionszeit sämtlicher Test- und Trainingssitzungen der Mittelwert sowie der dazugehörige Standardfehler berechnet und diese beiden Parameter in einem Liniendiagramm dargestellt.

Mit dem Programm SPSS 12.0 für Windows erfolgte die statistische Auswertung. Dabei wurde eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung vorgenommen, um den Trainingseffekt und die Modalitätsunterschiede zu analysieren. Zur Korrektur von Verletzung der Sphärizitätsannahme für die Varianzen der Messwiederholung wurde die Greenhouse-Geisser-Korrektur verwendet. Sowohl für die Performance als auch für die Reaktionszeit setzte man bei der Varianzanalyse die Faktoren „Modalität“, „Prä-Post-

Unterschied“ und „Wiederholung der Aufgaben innerhalb der einzelnen Testsitzungen“ ein.

2.7. Die Auswertung der MEG-Daten

Für die Auswertung der MEG-Daten wurden die aus den Messungen aufgezeichneten Trialepochen (200 Trials pro Messung) auf einen externen Computer übertragen.

Mit den Programmen DataEditor, PlotTool und DipoleFit (CTF Inc., Vancouver Canada) wurde die weitere Auswertung, die Mittelung der Daten und die Entwicklung eines auf die Feldverteilung angepassten Dipole-Modells vorgenommen. Mit dem DataEditor konnten die Feldschwankungen aller 151 Kanäle überlagert bzw. getrennt werden und so zunächst defekte Kanäle aus der Auswertung ausgeschlossen werden. Anhand eines zweidimensionalen Kopfmodels stellte man die Feldverteilungen der verschiedenen VPs und Aufgaben im PlotTool dar, um sich einen Überblick über die neuromagnetischen Antworten zu verschaffen. Dabei wurden Ein- bzw. Austritt der magnetischen Feldlinien durch rote bzw. blaue Farbe abgebildet. Anhand dieser Darstellung war es dann möglich, die Quellenanalyse mit dem DipoleFit, durch Dipolanpassung zu bestimmten Zeitpunkten, vorzunehmen.

Mit dem Programm AverageDs (CTF systems, 2001) konnten zu Beginn der Auswertung die Trialepochen jeder Aufgabe gemittelt und dadurch die kortikale Antwort auf die verschiedenen Bedingungen hervorgehoben werden, da die Spontanaktivität, die in den einzelnen Trials die jeweilige Aktivität überlagerte, herausgemittelt wurde. Die Änderungen der reizevozierten Aktivität wurden auf eine Prästimulus-Baseline im Zeitbereich vor der ersten taktilen bzw. auditorischen Stimulation bezogen. Zur Baseline-Korrektur wurde dazu die mittlere Aktivität vor dem ersten Reiz der auditorischen und taktilen Stimulation bzw. vor dem ersten Tastendruck bei der motorischen Aufgabe für jeden Kanal ermittelt und von der nachfolgenden Aktivität abgezogen. Zur Eliminierung von langsamen Drifts, z.B. durch Augenbewegungen, setzte man einen High-pass-Filter von 1.5Hz ein. Zur Glättung der gemittelten Kurven benutzte man einen Low-pass-Filter von 20Hz. Damit die Antwort und der Lerneffekt dargestellt werden konnten, wurden die gemittelten Daten der VPs in Prä- und Posttestsitzungen mit der jeweiligen ersten und zweiten Wiederholung eingeteilt und zu Grand Averages gemittelt.

2.7.1. Die frühen Antworten

Um die Quelle der reizspezifischen neuronalen Aktivität zu bestimmen, wurden anhand der Feldverteilung die Dipolquellen mit dem Programm DipoleFit ermittelt. Hierbei wurden an die gemessene Feldstärke der verschiedenen Aufgaben der einzelnen VPs die Dipole mit einem möglichst geringen Restfehler angepasst. Als Zeitpunkt für die auditorische Antwort wurde die N1m-Antwort im Mittel in einem Latenzbereich von 104.32 ms (von 72 ms bis 130.4 ms, Standardabweichung (stdabw) = 11.37 ms) gewählt. Dieser Zeitpunkt entsprach jeweils der höchsten Aktivität im ersten großen (N1-) Peak. Bei der taktilen Aufgabe wurde für die P50-Antwort im Mittel ein Latenzbereich von 44.36667 ms (von 21.6 ms bis 54.4 ms, stdabw = 5.7546 ms) ausgewählt, der wiederum mit der höchsten Aktivität übereinstimmte. Da der taktile Stimulationsaufbau der taktilen Aufgabe zu einer Latenzverzögerung von 40 ms führte, mussten die Zeiten zuvor bereinigt werden. Zu diesem Zeitpunkt wurden nun zwei Dipole, die die Antwort der linken bzw. rechten Stimulation repräsentieren sollten, im Bereich der primären auditorischen Kortex (Temporallappenregion) bzw. des primären somatosensorischen Kortex (Gyrus postcentralis) eingesetzt. Dabei richtete man die auditorischen Dipole in inferior-superior- und die taktilen Dipole in anterior-posterior-Richtung aus. Durch diese Drehung um 180° wurde aber nicht die Topographie, sondern nur das Vorzeichen der Quellenaktivität verändert, sodass damit die Dipolaktivität aller Versuchspersonen vergleichbar war.

Der Aktivitätsverlauf der auditorischen und der taktilen Dipole wurde nun mit einem Regressionsansatz, einer so genannten „Subspace Projection“, für jede Bedingung errechnet. So konnte der Aktivitätsverlauf der vier Dipole einer VP untersucht werden.

Die aus dieser Berechnung stammenden Aktivitätsverläufe unterteilte und mittelte man über alle VPs in Prä- und Posttestblöcke. Anschließend wurden die Daten in Diagrammen dargestellt. Dies erfolgte getrennt nach somatosensorischen und auditorischen Dipolen, der linken und der rechten Hemisphäre, sowie nach dem Ort der ersten Stimulation (linke und rechte Körperhälfte).

Für die statistische Analyse der Daten wurde eine Boots-trap-Statistik als nicht-parametrisches Analog einer ANOVA verwendet, die sich bei der Analyse von Hirnantworten auf seltene und häufige Reize bewährt hat.

2.7.2. Die späten Antworten

Bei der Untersuchung der MEG-Daten prüfte man nicht nur Einflüsse des Trainings auf die frühen Antworten des ersten Stimulus einer Codesequenz, sondern auch den Zeitbereich zwischen dem letzten Stimulus und dem Beginn der visuellen Präsentation, mit der der Buchstabencode präsentiert wurde (0.6-0.9 s). Nach den Trainingssitzungen sollte schon in diesem Zeitraum eine Art Erkennungsprozess des noch nicht präsentierten Buchstabens anhand des präsentierten Codes erfolgen.

In den Grand Averages der auditorischen und taktilen Prä- und Posttestsitzungsblöcken meiner Studie war deutlich zu erkennen, dass sich die Topographie der auditorischen Blöcke im Verlauf der Studie kaum änderte. Die Topographie der taktilen Blöcke veränderte sich jedoch. Man interpretierte diese Veränderung durch die auditorischen Trainingssitzungen als Veränderung in Richtung der auditorischen Topographie.

Als Mustertopographie für die auditorische Topographie, die man mit den Topographien der auditorischen und taktilen Prä- und Postsitzungsblöcken vergleichen wollte, wählte man die gemittelte Topographie der Grand Averages im Zeitbereich 0.6-0.9 s der auditorischen Postsitzungsblöcke. Anhand dieser Topographie und mit Hilfe des Programms `ctf_residual` wurde nun untersucht, in wie weit sich die Mustertopographie in den Prä- und Posttestsitzungsblöcken der auditorischen und taktilen Aufgabe widerspiegelte. Für jeden Testsitzungsblock bildete man den Mittelwert über die einzelnen Zeitpunkte des oben genannten Zeitfensters. Die Mittelwerte der einzelnen auditorischen und taktilen Testsitzungsblöcke wurde mit dem Programm Excel in Diagrammform dargestellt. Die statistische Auswertung wurde mit einer dreifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren „Modalität“ (auditorisch, taktil), „Prä-Post-Effekt“ und den „Wiederholungen“ (erste und zweite Wiederholung) der einzelnen Prä- und Posttestsitzungen mit dem Programm SPSS durchgeführt.

3. Ergebnisse

Die Diskriminations- und Verhaltensleistung wurde sowohl für die Test- und die Trainingssitzungen jeweils für die auditorische, die taktile und die motorische Aufgabe ausgewertet. Die kortikale Aktivität bei der auditorischen und taktilen Aufgabe in den Testsitzungen wurde anhand der MEG-Daten beurteilt.

3.1. Die Verhaltensdaten

Um den Lerneffekt für die Diskriminations- und Verhaltensleistungen zu zeigen, wurde die mittlere Reaktionszeit und die Performance, d.h. die Prozentzahl richtiger Antworten in den Test- und Trainingssitzungen, für jede Einzelne VP über die jeweiligen 200 Trials pro Blockaufgabe gemittelt. Dabei mittelte man die Reaktionszeit nicht nur über alle Antworten, sondern differenzierte zusätzlich noch zwischen den Reaktionszeiten auf die richtigen bzw. falschen Antworten und den einzelnen Zeichenstimulationen.

3.1.1. Die Performance

Bei der Auswertung der Performance wurde untersucht, wie sich die Prozentzahl der richtigen Antworten im Verlauf der Studie entwickelte. Es war deutlich zu erkennen, dass sich mit der Zeit die Anzahl der richtigen Antworten in den Aufgaben aufgrund der besseren Vertrautheit mit dem Stimulationscode steigerte. Dabei zeigte sich vor allem die signifikante Verbesserung aller Aufgaben zusammen (Haupteffekt Prä-Post-Effekt: $p < 0.001$, $F(1,11) = 125.110$) zwischen den Prä- und Posttestsitzungen, aber auch zwischen den ersten und zweiten Wiederholungen in den jeweiligen Sitzungen war eine signifikante ($p = 0.005$, $F(1,11) = 12.259$) Verbesserung sichtbar.

Am deutlichsten war der Lerneffekt in der auditorischen Aufgabe. Die VPs starteten in der Prätestsitzung im Mittel mit einem Prozentwert richtiger Antworten von 64.87 % (52.91-81.07 %, Standardfehler (SD) = 2.4 %) und steigerten sich signifikant ($p = 0.001$, $F(1,11) = 19.791$) innerhalb der Prätestsitzung auf 71.78 % (64.42-89.37 %, SD = 2.02 %). Nach den Trainingssitzungen erreichten die VPs im Mittel 84.84 % (67.31-97.16 %, SD = 2.28 %) und verbesserten sich somit nochmals hochsignifikant ($p <$

0.001, $F(1,11) = 44.161$) von der ersten zur zweiten Wiederholung. Da sich die VPs nun meist ihrer maximalen Leistung näherten, war die Steigerung auf 85.83 % (73.68-100 %, $SD = 2.22$ %) von der ersten zur zweiten Wiederholung der Posttestsitzung nicht mehr signifikant ($p = 0.530$, $F(1,11) = 0.421$).

In der taktilen Aufgabe war der Prozentsatz richtiger Antworten von 77.1 % (56.25-91.0 %, $SD = 3.08$ %) in der ersten Wiederholung der Prätestsitzung etwas höher als in der auditorischen Aufgabe. Er steigerte sich über die zweite Wiederholung der Prätestsitzung und der ersten Wiederholung der Posttestsitzung mit 80.45 % (68.75-90.95 %, $SD = 2.22$ %) und 89.07 % (78.47-97.64 %, $SD = 1.89$ %) auf 89.47 % (75.12-99.05 %, $SD = 2.24$ %) in der zweiten Wiederholung. Auch hier war die Steigerung vor allem von der zweiten Wiederholung der Prätestsitzung zur ersten Wiederholung der Posttestsitzung signifikant ($p < 0.001$, $F(1,11) = 80.935$).

In die motorische Aufgabe stiegen die VPs schon im Mittel mit einer Diskriminationsrate von 96.14 % (83.01-100 %, $SD = 1.4$ %) in der ersten Wiederholung der Prätestsitzung ein und erreichten letztendlich in der zweiten Wiederholung der Posttestsitzung 98.49 % (94.39-100 %, $SD = 0.51$ %). Im Gegensatz zur auditorischen und taktilen Aufgabe war die Verbesserung trotz des geringeren Standardfehlers nicht signifikant (prä-post: $p = 0.050$, $F(1,11) = 4.840$).

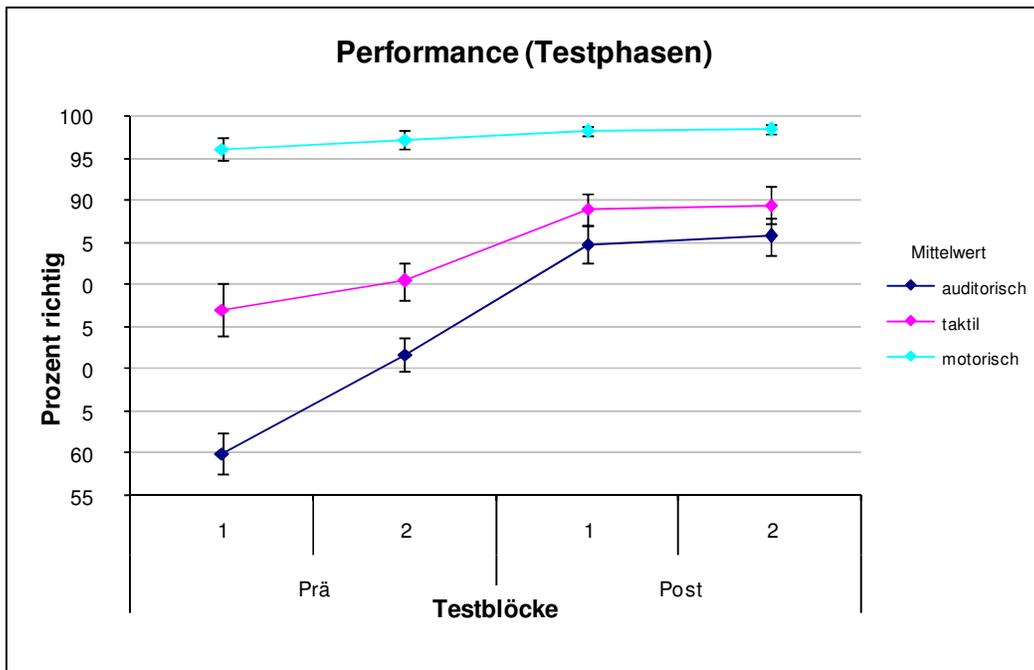


Abb. 5: Die Prozentzahl der richtigen Antworten während der Testsitzungen

Nicht nur in der Testsitzung, sondern auch in den Trainingssitzungen war eine deutliche Leistungssteigerung zu beobachten. Der durchschnittliche Prozentsatz in der ersten Trainingssitzung betrug 74.17 % (52-91.44 %, SD = 1.29 %). Im Verlauf der weiteren Trainingssitzungen steigerte sich die Prozentzahl auf 83.16 % (61.06-95.34 %, SD = 1.42 %) in der zweiten Trainingssitzung, 87.2 % (60.59-97.81 %, SD = 1.4 %) in der dritten und 88.88 % (62.07-98.62 %, SD = 1.41 %) in der vierten Trainingssitzung. Die Verbesserung in den gesamten Trainingssitzungen war hochsignifikant ($p < 0.001$, $F(3,33) = 63.650$; $\epsilon = 0.48967$). Die Unterschiede der ersten und zweiten Sitzung ($p < 0.001$, $F(1,11) = 38.843$), gefolgt von den Unterschieden der zweiten und dritten Sitzung ($p < 0.001$, $F(1,11) = 36.525$) und der dritten und vierten Sitzung ($p = 0.010$, $F(1,11) = 9.579$) waren alle hochsignifikant.

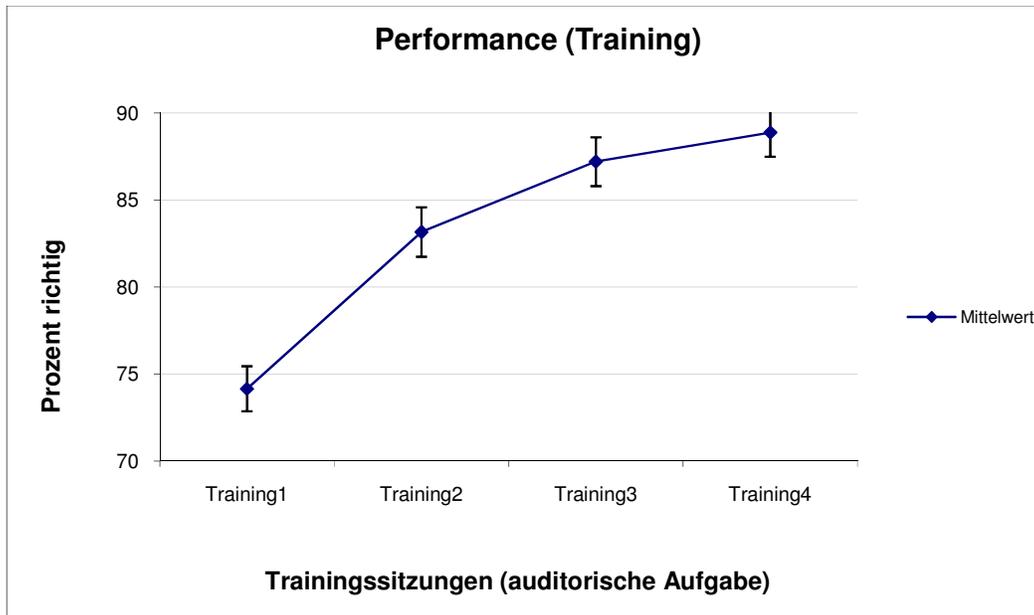


Abb. 6: Die Prozentzahl der richtigen Antworten während des Trainingssitzungen

Mit den vier Trainingssitzungen wurde ein Mindestmaß an Trainingsaufwand festgelegt. Die VPs hatten aber die Möglichkeit anhand der ausgehändigten Liste auch außerhalb der Sitzungen die Zeichen zu üben. Schon in der ersten Sitzung war ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der Diskriminationsleistung zwischen den VPs zu erkennen, der sich auch in den weiteren Sitzungen zeigte. Im Verlauf der Trainingssitzungen erreichten 10 der 12 VPs mehr als 80 %. Die anderen zwei VPs starteten schon mit relativ niedrigen Werten von 62.48 und 63.65 % und blieben auch unter der 80 %-Grenze.

3.1.2. Die Reaktionszeit

Mit der Auswertung der Reaktionszeit sollte nicht nur der Verlauf der mittleren Reaktionszeit dargestellt werden, sondern auch mit welcher Geschwindigkeit die VPs auf die richtigen und falschen Antworten antworteten und wie sich die Reaktionszeit im Bezug auf die einzelnen Buchstaben, d. h. Codesequenzen, verhielt.

Für die Reaktionszeit wurden nur die Daten der auditorischen und taktilen Aufgabe verwendet. Bei der motorischen Aufgabe war der zeitliche Aufbau eines Reizdurchgangs gegenüber den sensorischen Aufgaben verändert. So durften die Probanden nach der Darbietung der zu generierenden Sequenz erst ab der Drehung des Fadenkreuzes mit der Bewegungsausführung beginnen. Diese verzögerte Reaktion wurde eingeführt, da es

sonst zu einer Überlappung der kortikalen Antwort der visuellen Stimulation und der motorischen Antwort gekommen wäre. Damit unterscheiden sich jedoch die Planung und die Ausführung der motorischen Aufgabe in der motorischen Bedingung von den sensorischen Bedingungen und die Reaktionszeiten sind nicht mehr vergleichbar. Die Reaktionszeit von der Drehung des Fadenkreuzes bis hin zum ersten Tastendruck fiel in der motorischen Aufgabe demnach viel kürzer als in der auditorischen und taktilen Aufgabe aus, da die visuell dargebotene Aufgabe bis zum Drehen des Kreuzes schon 0.5 s eingeblendet war.

3.1.2.1. Die mittlere Reaktionszeit

Der Unterschied der gemittelten Reaktionszeit auf alle Antworten von Prä- zur Postsitzung war für die beiden Modalitäten auditorisch und taktil hochsignifikant ($p < 0.001$, $F(1,11) = 29.765$), wobei sich die beiden Modalitäten untereinander nicht unterschieden ($p = 0.050$, $F(1,11) = 4.861$).

Bei der auditorischen Aufgabe stiegen die VPs in der Prätestsituation im Mittel mit einer Reaktionszeit von 1.65 s (1.32-1.91 s, $SD = 0.05$ s) ein und wurden im Verlauf mit 1.62 s (1.18-1.93 s, $SD = 0.05$ s) in der zweiten Wiederholung nur etwas schneller. Von der zweiten Wiederholung der Prätestsituation zu ersten Wiederholung der Posttestsituation mit 1.31 s (0.71-1.76 s, $SD = 0.09$ s) kam es zu einer deutlichen Abnahme der Reaktionszeit. Innerhalb der Posttestmessung veränderte sich die Zeit dann kaum noch (zweite Wiederholung: 1.27 s (0.66-1.61 s, $SD = 0.09$ s)). Die Veränderungen der Reaktionszeiten waren im Verlauf nur zwischen zweiter Prätestsituation und erster Posttestsituation signifikant ($p = 0.004$, $F(1,11) = 13.400$), während sich die Wiederholungen in der Prä- und Posttestsituation nicht signifikant voneinander unterschieden ($p = 0.546$, $F(1,11) = 0.387$ bzw. $p = 0.337$, $F(1,11) = 1.006$).

Auch in der taktilen Aufgabe starteten die VPs in der ersten Wiederholung der Prätestsituation im Mittel mit einer Reaktionszeit von 1.65 s (1.41-1.84 s, $SD = 0.04$ s), wurden schon in der zweiten Wiederholung mit 1.5 s (1.05-1.81 s, $SD = 0.06$ s) schneller und verminderten die Zeit in der Posttestsituation auf 1.24 s (0.77-1.62 s, $SD = 0.07$ s) und 1.2 s (0.81-1.63 s, $SD = 0.08$ s). Im Gegensatz zur auditorischen Aufgabe war schon der Unterschied zwischen den Wiederholungen in der Prätestsituation in dieser Aufgabe signifikant ($p = 0.016$, $F(1,11) = 8.074$). Am stärksten war aber wie im Auditorischen der

Unterschied zwischen zweiter Wiederholung der Prätestsitzung und erster Wiederholung der Posttestsitzung ($p < 0.001$, $F(1,11) = 24.013$).

Zwischen den Modalitäten auditorisch und taktil war schon in der ersten Wiederholung der Prätestsitzung kein Unterschied zu sehen ($p = 0.935$, $F(1,11) = 0.007$) und auch in der zweiten Posttestsitzung war keine signifikante Differenz zu erkennen ($p = 0.206$, $F(1,11) = 1,810$)

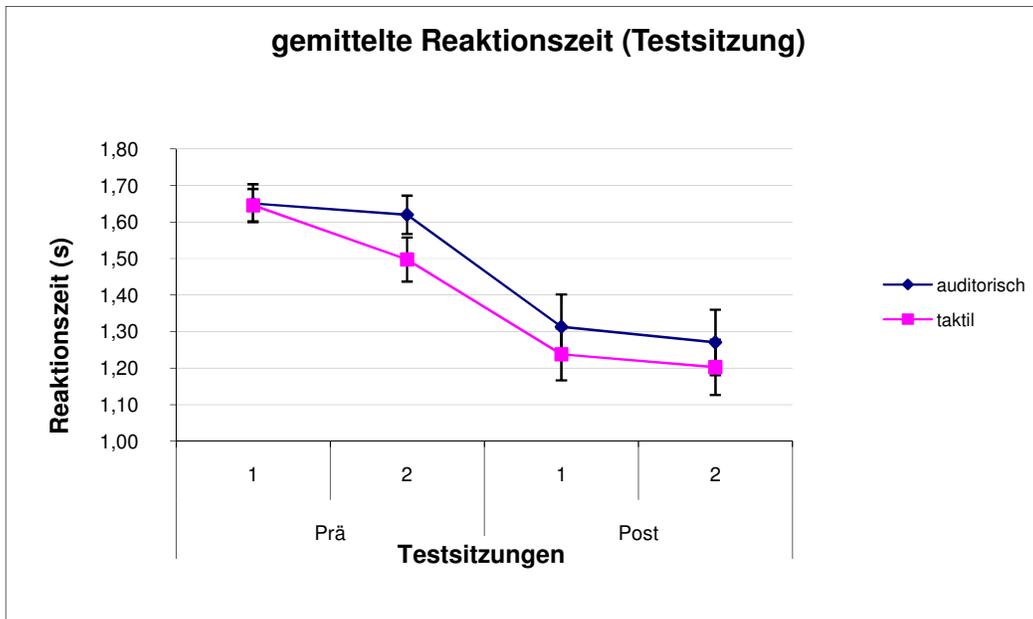


Abb. 7: Die allgemeine Reaktionszeit während der Testsitzungen

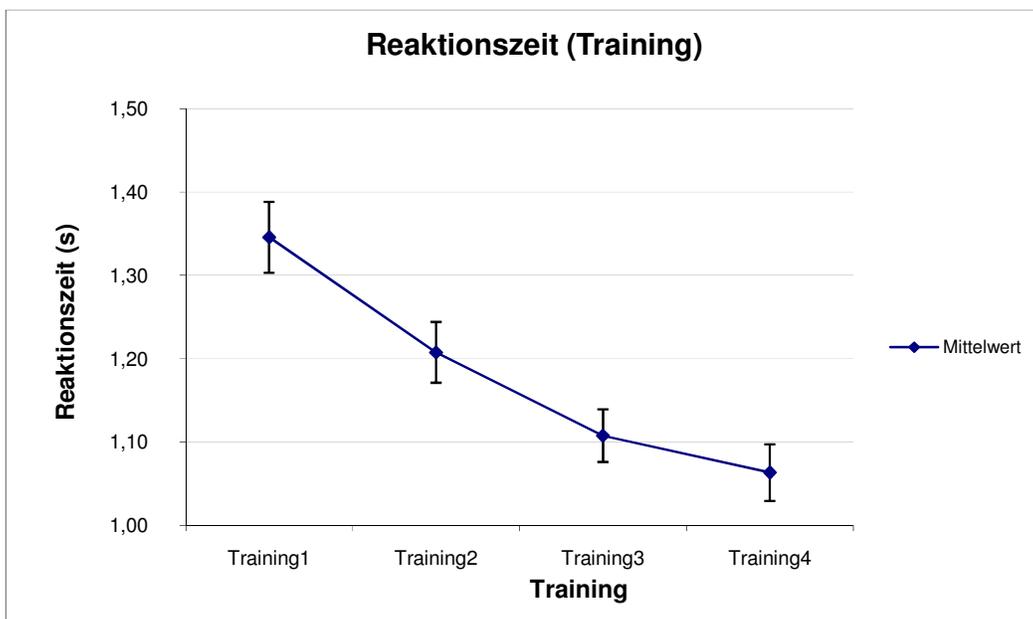


Abb. 8: Die Reaktionszeit während der Trainingssitzungen

Im Verlauf der Trainingssitzungen konnten die VPs im Mittel, wie schon in der Performance zu sehen war, ihre Leistung deutlich verbessern und zeigten eine offensichtliche Verminderung ($p < 0.001$, $F(1,11) = 32.875$) der Reaktionszeit von der ersten Trainings- bis zur letzten Trainingssitzung.

Anfangs hatten die VPs eine Reaktionszeit von 1.35 s (0.6-1.84 s, SD = 0.04 s), verminderten diese in der zweiten Trainingssitzung auf 1.21 s (0.58-1.6 s, SD = 0.04 s) und in der dritten Trainingssitzung auf 1.11 s (0.53-1.58 s, SD = 0.03 s). In der vierten Trainingssitzung erreichten sie letztendlich 1.06 s (0.53-1.47 s, SD = 0.03 s).

3.1.2.2. Die Reaktionszeit der richtigen bzw. der falschen Antworten

Während aller Testsitzungen unterschieden sich die Geschwindigkeiten der richtigen Antworten hochsignifikant von denen von den Reaktionszeiten der falschen Antworten (Haupteffekt $p < 0.001$, $F(1,11) = 138.212$). Die beiden Modalitäten auditorisch und taktil unterschieden sich jedoch nicht ($p = 0.653$, $F(1,11) = 0.2139$).

In der ersten Wiederholung der Prätestssitzung antworteten die VPs mit einer Reaktionszeit von 1.71 s (1.29-1.93 s, SD = 0.07 s) im Auditorischen auf die richtigen Antworten und mit 1.68 s (1.37-1.99 s, SD = 0.06 s) auf die taktile Aufgabe. Während es in der Prätestssitzung keinen signifikanten Unterschied ($p = 0.108$, $F(1,11) = 3.066$) zur zweiten Wiederholung mit einer Reaktionszeit für die richtigen Antworten von 1.63 s (1.18-1.84 s, SD = 0.07 s) gab, zeigte sich in der Prätestssitzung der taktilen Aufgabe im Gegensatz zu oben genannten schon eine signifikante Verminderung ($p = 0.003$, $F(1,11) = 14.452$) der Reaktionszeit auf 1.49 s (1.01-1.95 s, SD = 0.07 s). Nach den Trainingssitzungen war sowohl ein deutlicher Unterschied von zweiter Wiederholung der Prätestssitzung zu erster Wiederholung der Posttestssitzung in der auditorischen ($p = 0.001$, $F(1,11) = 20.586$) als auch in der taktilen Aufgabe ($p < 0.001$, $F(1,11) = 30.162$) zu sehen. Die VPs erreichten in der ersten Wiederholung der Posttestssitzung Reaktionszeiten für die richtigen Antworten von 1.28 s (0.89-1.89 s, SD = 0,09 s) im Auditorischen und 1.21 s (0.75-1.71 s, SD = 0.07 s) im Taktilen, konnten sich aber in der zweiten Wiederholung mit 1.23 s (0.81-1.66 s, SD = 0.09 s) bzw. 1.17 s (0.77-1.59 s, SD = 0.08 s) nicht signifikant verbessern (auditorisch: $p = 0.232$, $F(1,11) = 1.601$; taktil: $p = 0.276$, $F(1,11) = 1.316$).

Bei den falschen Antworten stiegen die VPs in die Prätestsitzung mit einer Reaktionszeit im Auditorischen von 1.96 s (1.4-2.37 s, SD = 0.09 s) und im Taktilen von 2.05 s (1.64-2.27 s, SD = 0.06 s) ein und konnten sich zur zweiten Wiederholung mit auditorisch 1.95 s (1.19-2.39 s, SD = 0.09 s) und taktile 1.89 s (1.6-2.54 s, SD = 0.11 s) nicht signifikant verbessern (auditorisch: $p = 0.901$, $F(1,11) = 0.016$; taktile: $p = 0.072$, $F(1,11) = 3.968$). Wie bei der Reaktionszeit der richtigen Antworten war auch bei den Reaktionszeiten der falschen Antworten ein signifikanter Unterschied (auditorisch: $p = 0.022$, $F(1,11) = 7.125$; taktile: $p = 0.020$, $F(1,11) = 7.330$) zur ersten Wiederholung der Posttestsitzung mit Reaktionszeiten von 1.67 s (1.01-2.29 s, SD = 0.11 s) im Auditorischen und 1.7 s (1.0-2.48 s, SD = 0.11 s) im Taktile zu erkennen. Innerhalb der Posttestmessung konnten sich die VPs wiederum mit Zeiten von 1.55 s (1.05-2.04 s, SD = 0.17 s) im Auditorischen und 1.62 s (1.04-2.12 s, SD = 0.09 s) nicht signifikant (auditorisch: $p = 0.352$, $F(1,11) = 0.945$; taktile: $p = 0.378$, $F(1,11) = 0.844$) steigern.

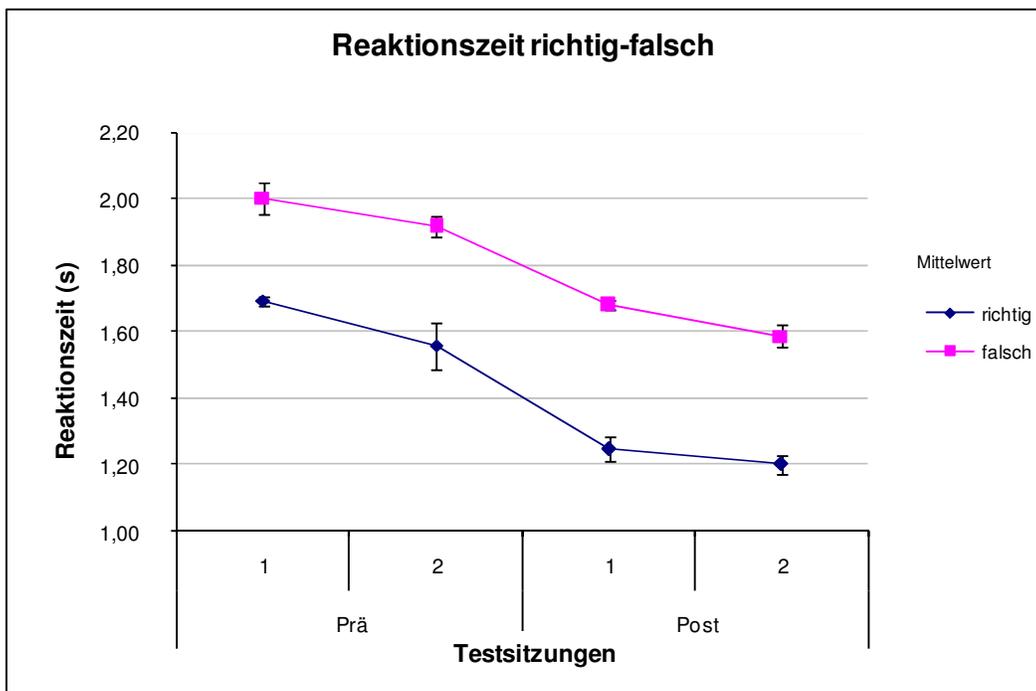


Abb. 9: Die Reaktionszeiten der richtigen und falschen Antworten während der Testsitzungen

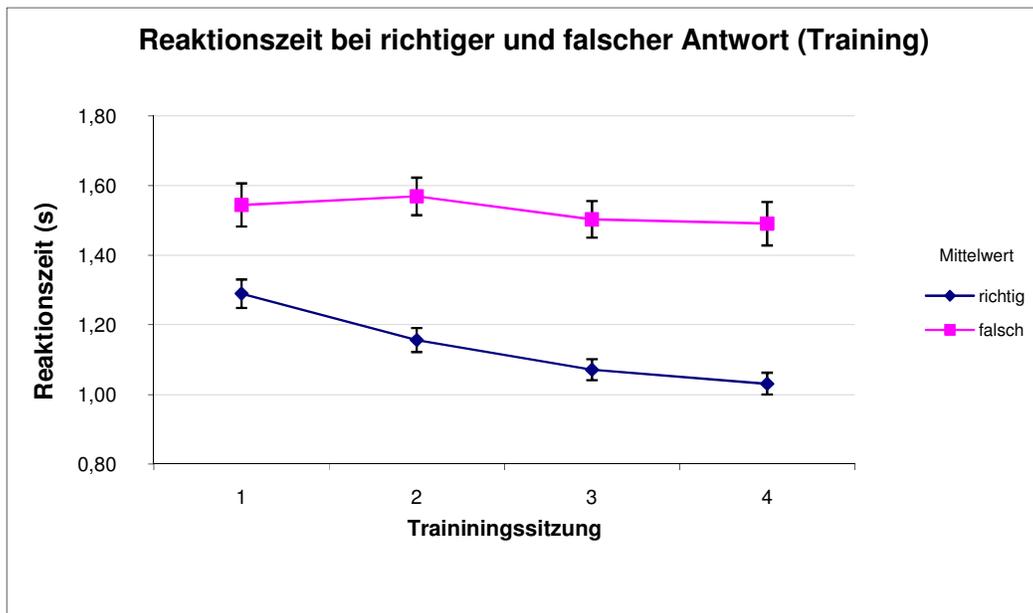


Abb. 10: Die Reaktionszeiten der richtigen und falschen Antworten während der Trainings-sitzungen

Die VPs verbesserten sich hochsignifikant ($p = 0.001$, $F(1,11) = 19.440$) von der ersten Wiederholung der Prätest-sitzung zur zweiten Wiederholung der Posttest-sitzung.

In den Trainings-sitzungen war erwartungsgemäß wie in den Testsitzungen ein signifikanter Unterschied (Haupteffekt $p < 0.001$, $F(1,11) = 48.824$) zwischen den Reaktionszeiten für richtige und falsche Antworten zu erkennen. Im Verlauf erzielten die VPs im Mittel Reaktionszeiten auf die richtigen Antworten von 1.29 s (0.77-1.91 s, SD = 0.04 s) im ersten Block, im zweiten und dritten Block 1.16 s (0.56-1.55 s, SD = 0.03 s) und 1.07 s (0.51-1.56 s, SD = 0.03 s) und 1.03 s (0.52-1.43 s, SD = 0.03 s) im vierten Block. Bei den Reaktionszeiten auf die falschen Antworten waren die VPs mit 1.54 s (0.60-2.21 s, SD = 0.06 s) im ersten, 1.57 s (0.65-2.14 s, SD = 0.05 s) im zweiten, 1.50 s (0.77-2.20 s, SD = 0.05 s) im dritten und 1.49 s (0.65-2.44 s, SD = 0.05 s) im vierten Block deutlich langsamer.

3.1.2.3. Die Reaktionszeiten auf die verschiedenen Buchstaben

In den beiden Abbildungen 11 und 12 ist die Reaktionszeit auf die einzelnen Codestimuli in den Trainings-sitzungen und den auditorischen und taktilen Testsitzungen dargestellt. Hierbei ist auffällig, dass der Verlauf der Kurven sich in allen Sitzungen stark ähnelt, die Reaktionszeit im Verlauf zwar bei jedem einzelnen Buchstaben geringer

wird, es aber deutliche Unterschiede in der Antwort auf die unterschiedlichen Buchstaben gibt. Die statistische Auswertung ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Modalitäten ($p = 0.050$, $F(1,11) = 4.828$) und zwischen Prä- und Postsitzung ($p < 0.001$, $F(1,11) = 29.827$). Der Unterschied zwischen Prä- und Postsitzung war im Taktilen jedoch etwas signifikanter ($p < 0.001$, $F(1,11) = 42.837$) als im Auditorischen ($p = 0.003$, $F(1,11) = 15.123$). Für die jeweiligen Buchstabencodes gab es sowohl im Auditorischen ($p < 0.001$, $F(11,121) = 34.821$; $\epsilon = 2.1526$) sowie im Taktilen ($p < 0.001$, $F(11,121) = 43.544$; $\epsilon = 2.5761$) hochsignifikante Unterschiede.

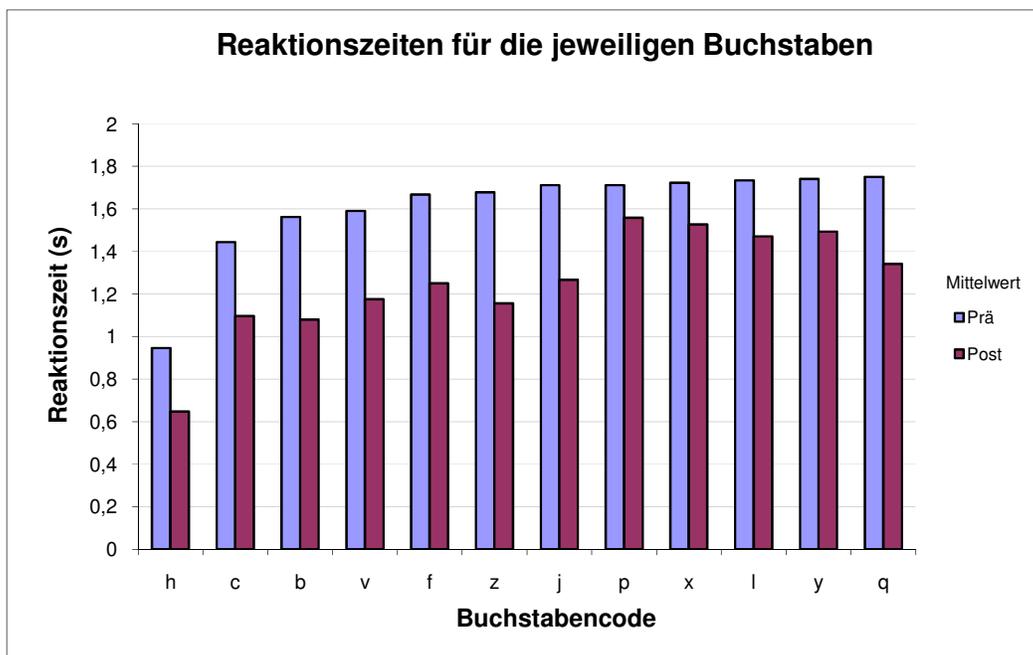


Abb. 11: Die Reaktionszeiten für die einzelnen Codestimuli während der Testsitzungen

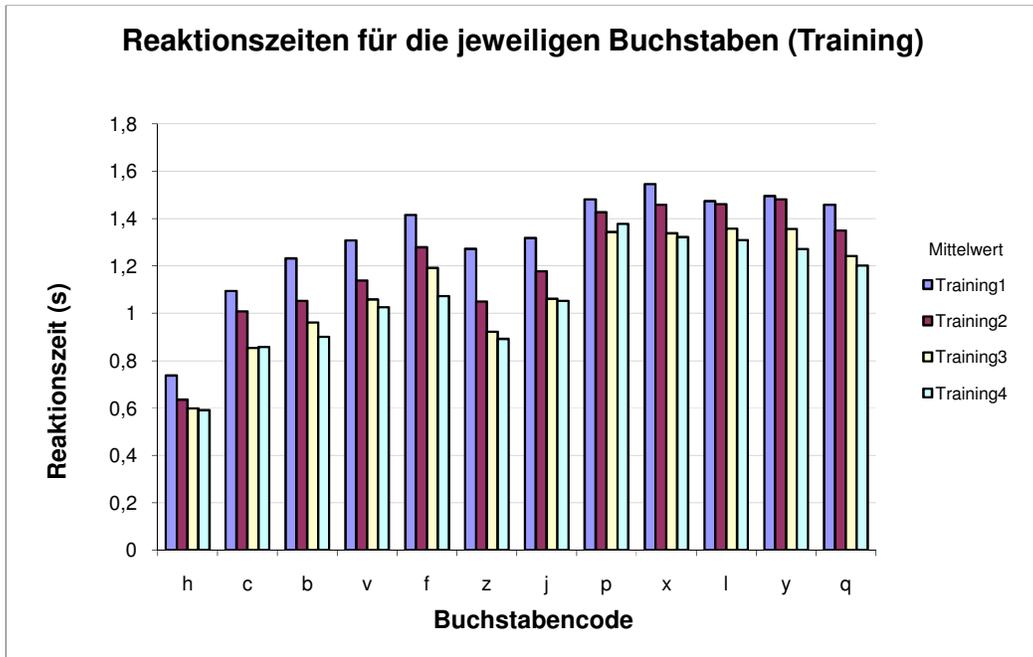


Abb. 12: Die Reaktionszeiten für die einzelnen Codestimuli während der Trainingssitzungen

Die Balken der Test- und Trainingssitzungen zeigen, welche der Buchstabenstimuli besonders leicht zu erkennen waren bzw. bei welchen Buchstaben die Pfeilsequenz in den Testsitzungen zur Erkennung nicht benötigt wurde. Am schnellsten wurde schon in der Prätestsitzung und im ganzen Verlauf der Studie auf den Buchstaben „H“ (entspricht ► ► ► ►), der als einziger homogen aus rechten Stimulationen bestand, geantwortet. Auch die Buchstaben „C“ (◄ ► ◄ ►) und „Z“ (◄ ◄ ► ►), die in unserem Alphabet ein einzigartiges Muster hatten und durch ihre Spiegelbildlichkeit ins Auge stachen, waren vermutlich für die VPs leichter zu erkennen. Buchstaben mit mehreren Richtungswechseln und die mit anderen Buchstaben leichter zu verwechseln waren, wie z.B. „F“ (► ► ◄ ►), „L“ (► ◄ ► ►), „P“ (► ◄ ◄ ►), „X“ (◄ ► ► ◄), „Y“ (◄ ► ◄ ◄) und „Q“ (◄ ◄ ► ◄), waren deutlich schwerer zu erkennen und hatten auch noch in der Posttestsitzung langsamere Reaktionszeiten.

3.2. Die MEG-Daten

Die Veränderungen der kortikalen Aktivität im Verlauf der Studie wurden in zwei Auswertungsschritten untersucht.

Zuerst wurden die frühen Antworten, die das erste Element der Buchstabencodes auslöste, untersucht. Hierbei verglich man die zeitlichen Verläufe der Dipole, die an die Feldverteilung der jeweiligen auditorischen und taktilen Testsitzungsblöcke angepasst wurden, in den Prä- und Posttestsitzungen. Dazu berechnete man die Dipolaktivität der vier Dipolquellen im primären und sekundären auditorischen sowie im primären und sekundären somatosensorischen Kortex (SI und SII) aus den Zeitverläufen der Magnetfeldverteilung.

Die topographischen Aktivitätsveränderungen zwischen dem letzten Reiz und dem Beginn der visuellen Darbietung wurden im zweiten Auswertungsschritt untersucht.

3.2.1. Die frühen Antworten

In der Abbildung 13 sind die Aktivitätsverläufe der 151 Sensorenkanäle der auditorischen und taktilen Sitzungsblöcke anhand der Aufzeichnung einer Versuchsperson übereinander gelegt dargestellt. Die Feldverteilung zum Zeitpunkt der größten Aktivität des taktilen P50m- bzw. des auditorischen N1m-Peaks dieser Sitzungsblöcke ist in den Maps der Abbildung 14 gezeigt.

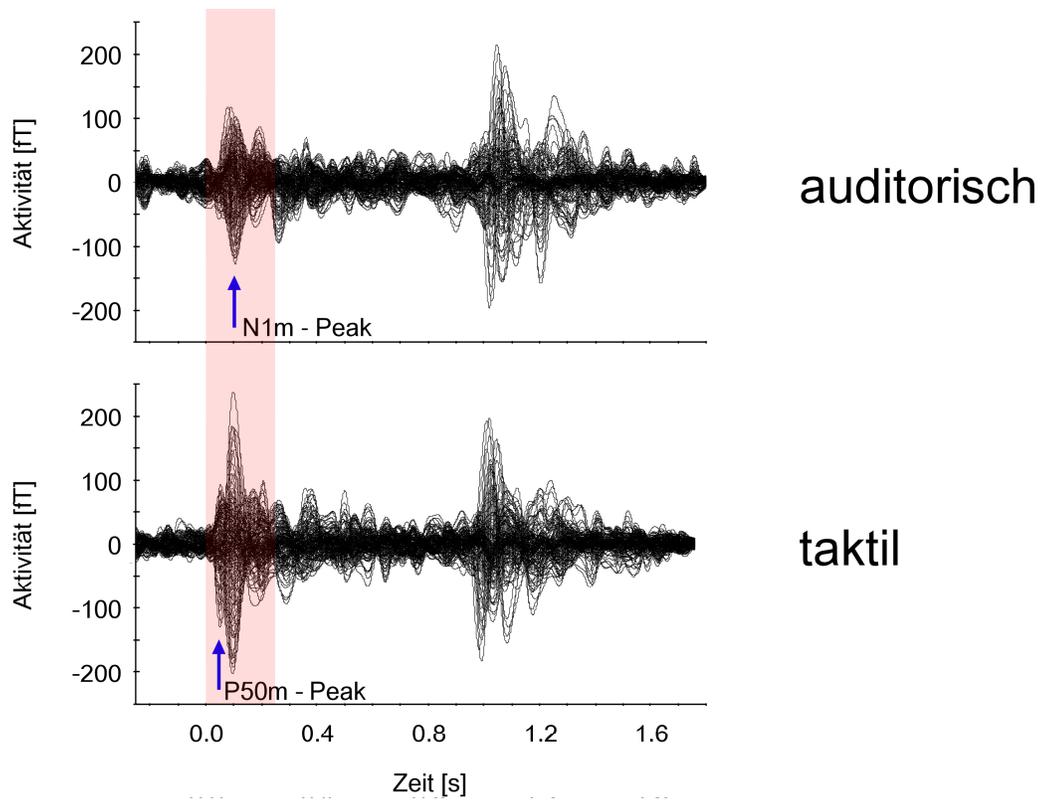


Abb. 13: Darstellung der Aktivitätsverläufe während der auditorischen (oben) und taktilen Aufgabe (unten) einer Einzelperson (VP43). Rot markiert sind die Antworten auf den ersten Stimulus des Codezeichens. Die Pfeile markieren den N1m-Peak in der auditorischen Aufgabe und den P50m-Peak in der taktilen Aufgabe.

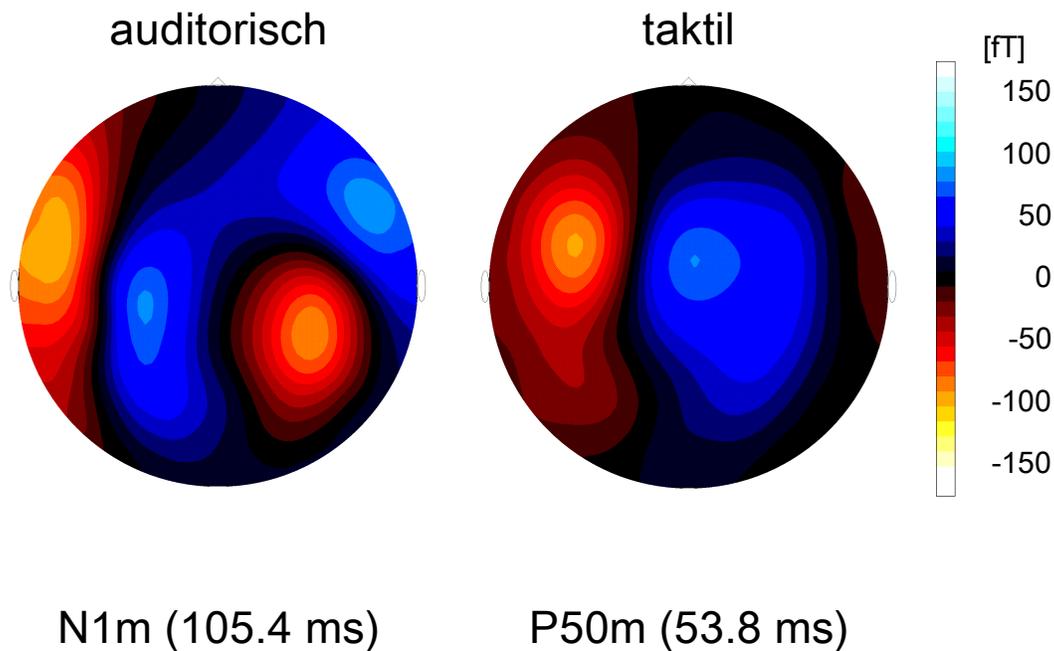


Abb. 14: Darstellung der Feldverteilung zum Zeitpunkt der größten Aktivität der N1m- bzw. P50m-Peaks in der auditorischen und taktilen Aufgabe. Die Eintritte der magnetischen Feldlinien sind durch die roten Bereiche und die Austritte durch die blauen Bereiche angezeigt.

Aus den auditorischen und taktilen Feldverteilungen der Aufgabentestblöcke bestimmte man die Lokalisation und Orientierung der Dipole. Die Dipole wurden jeweils in die ipsi- und kontralaterale Hemisphäre gelegt. Bei der auditorischen Aufgabe legte man die Dipole in den Bereich des primären auditorischen Kortex, bei der taktilen Aufgabe legte man sie in den Bereich des primären somatosensorischen Kortex.

Für die auditorische Aufgabe wählte man die Feldverteilung zum Zeitpunkt der ersten großen Antwort (N1m-Peak) bei einer Latenz im Mittel von 104.33 ms (stdabw = 11.37 ms).

Die Feldverteilung der taktilen Aufgabe wurde auch hier zum Zeitpunkt der ersten großen Antwort (P50m-Peak) im Latenzbereich im Mittel von 84.37 ms gewählt.

Da durch den Stimulationsaufbau der taktilen Aufgabe eine allgemeine Verzögerung von ca. 40 ms entstand, musste die Latenzzeit um diesen Betrag bereinigt werden und betrug somit 44.37 ms (stdabw = 5.75 ms).

In den Abbildungen 15 und 17 sind die Aktivitätsverläufe der auditorischen und taktilen Dipole in der auditorischen bzw. der taktilen Aufgabe abgebildet. Hierbei ist der zeitliche Verlauf sowohl nach Stimulationsseite (rechts oder links) als auch nach den Dipolen (auditorisch bzw. taktil) getrennt für die Prä- und Posttestsituation am Beispiel der linken Hemisphäre dargestellt.

3.2.1.1. Die auditorische Aufgabe

Die Abbildung 15 zeigt die gemittelten Aktivitätsverläufe der Dipole während der auditorischen Aufgabe vor und nach den Trainingssitzungen. Diese Mittelwerte unterscheiden sich zwar in der Größe, nicht aber in den zeitlichen Verläufen oder in den Verhältnissen zueinander.

In der Abbildung ist sowohl bei allen Prä- als auch bei allen Posttestblöcken ein großer negativer Aktivitätsgipfel bei 110 ms (N1m) erkennbar.

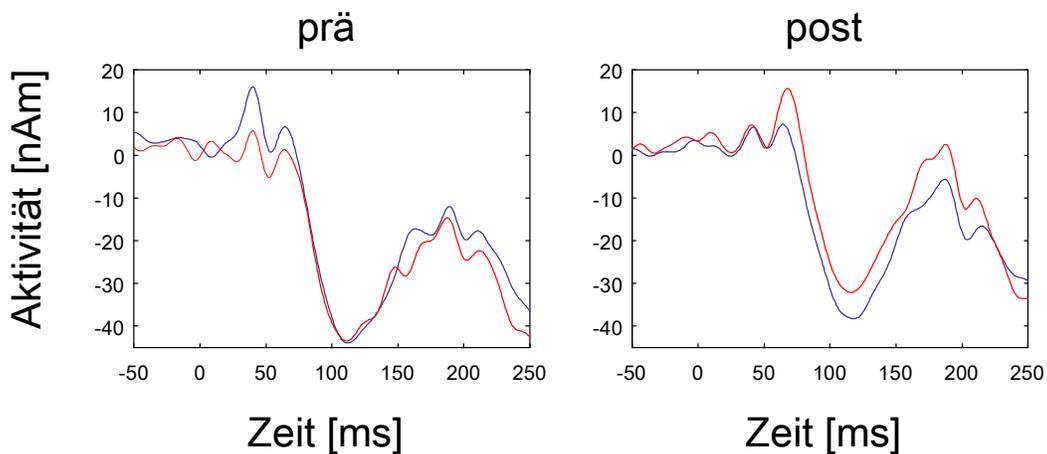


Abb. 15: Die Darstellung der Aktivitätsverläufe der auditorischen Dipole in der auditorischen Aufgabe getrennt nach Stimulationsseite (links = rot, rechts = grün) vor bzw. nach dem Training in der linken Hemisphäre.

Bei der statistischen Auswertung wurde auf beiden Hemisphären der Trainings- und der Seiteneffekt, d.h. ein Unterschied zwischen rechter und linker Stimulation auf einer Hemisphäre, beachtet. Die kortikalen Antworten auf die auditorische Stimulation im primären auditorischen Kortex waren sowohl auf der kontra- als auch auf der ipsilateralen Hemisphäre vertreten.

Im Zeitbereich von 90-110 ms (N1-Peak) war vor den Trainingsitzungen (kontralateral: MW(LH) = -36.6399 nAm; MW(RH) = -39.426 nAm; ipsilateral: MW(LH) = -33.4299 nAm, MW(RH) = -35.6857 nAm) ein signifikanter Seiteneffekt auf beiden Hemisphären (LH: Z = -2.0218; RH: Z = 3.3965) zu erkennen. Die kontralaterale Hemisphäre wies dabei jeweils die höhere Aktivität auf. Im Verlauf der Studie nahm die Aktivität von den Prätestssitzungen (MW(LH) = -35.0349 nAm; MW(RH) = -37.55585 nAm) zur Posttestssitzung (MW(LH) = -24.5002 nAm; MW(RH) = -20.94615 nAm) ab.

Der Trainingseffekt war also mit Z = -3.4851 auf der linken Hemisphäre und Z = -2.8725 auf der rechten Hemisphäre signifikant. Da die Aktivitäten von Prätestssitzung zu Posttestmessung und von kontralateral zu ipsilateral weniger wurden, war die Interaktion von Training und Stimulationsseite nicht signifikant (LH: Z = 0.0675; RH: Z = -1.4775).

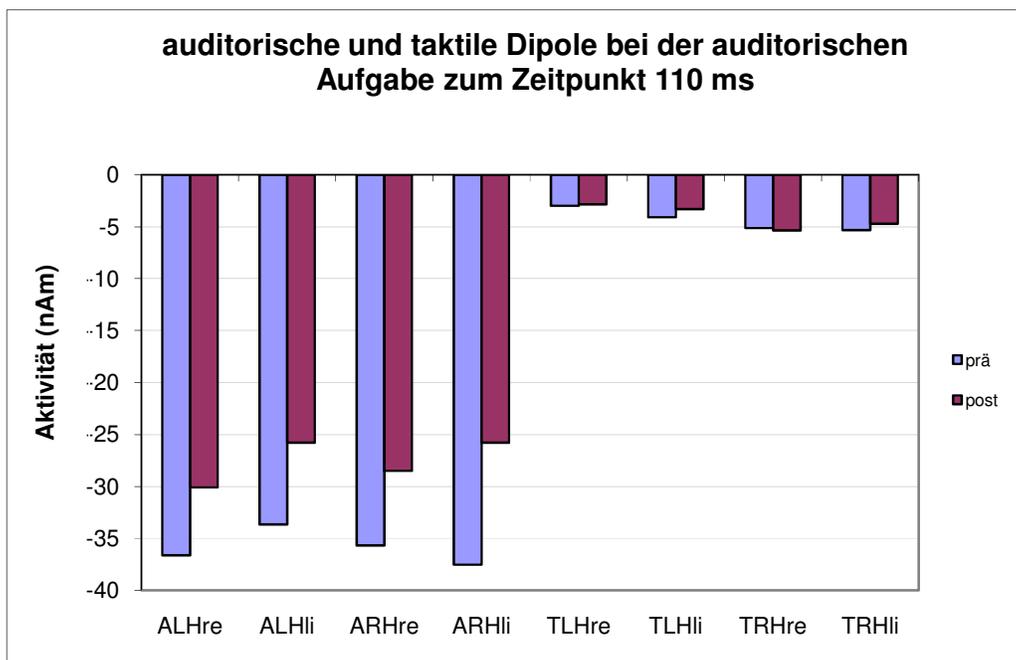


Abb. 16: Die Darstellung der auditorischen und taktilen Dipole zum Zeitpunkt 110 ms (N1) (A: auditorischer Dipol; T: taktiler Dipol; LH: linke Hemisphäre; RH: rechte Hemisphäre; li: linksseitige Stimulation; re: rechtsseitige Stimulation)

3.2.1.2. Die taktile Aufgabe

In der taktilen Aufgabe sind bei der Dipolaktivität ein positiver Peak im Bereich von 50 ms (P50m) und ein negativer Peak im Bereich von 70-90 ms sichtbar. Für die auditori-

schen Dipole ist ein Aktivitätspeak im Bereich von 90 ms erkennbar. Da aus früheren Studien bekannt ist, dass der kontralateralen frühen und mittleren Antwort des primären somatosensorischen Kortex (SI) eine bilaterale späte Antwort des sekundären somatosensorischen Kortex (SII) folgt und dieser sich in unmittelbarer Nähe des primären auditorischen Kortex befindet, vermutete man, dass diese auditorischen Dipole die SII-Antwort repräsentierten.

Die Aktivitätsverläufe der auditorischen und taktilen Dipole in den entsprechend gewählten Zeitbereichen sind in Abbildung 17 anhand der gemittelten Daten der Dipole der linken Hemisphäre dargestellt.

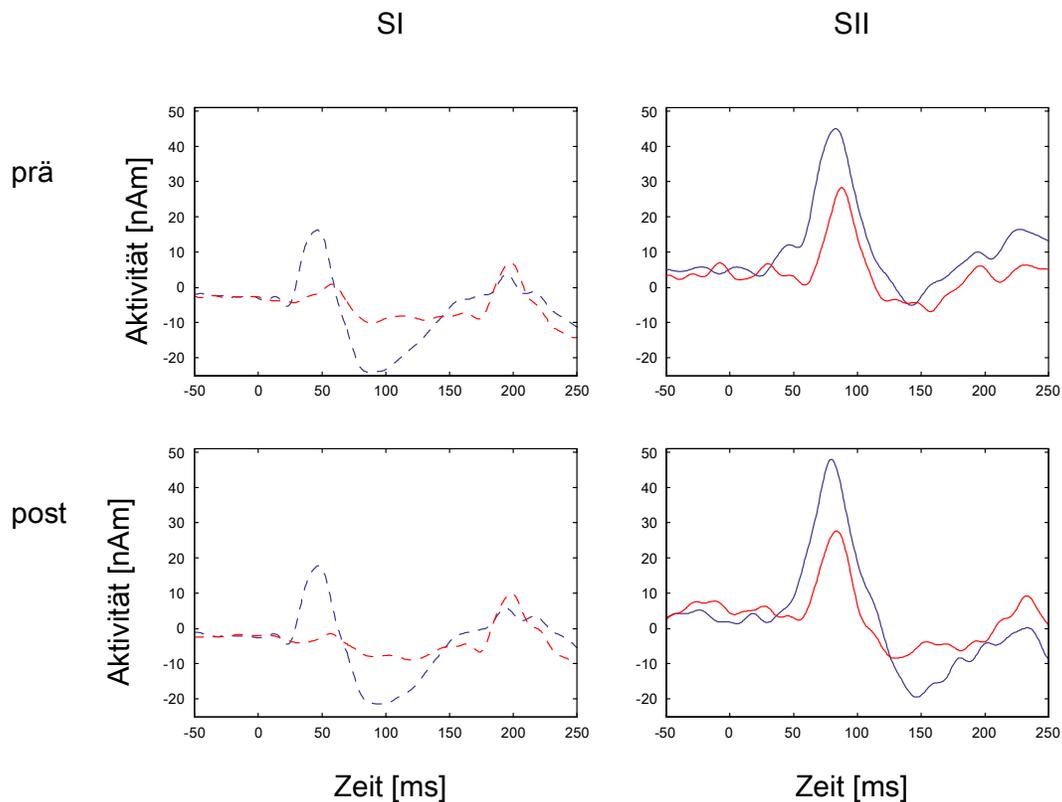


Abb. 17: Darstellung der Aktivitätsverläufe der taktilen (gestrichelte Linien, linke Diagramme) und auditorischen Dipole (durchgezogene Linien, rechte Diagramme) im Zeitbereich von -50 bis 250 ms vor und nach dem Training. Die Daten sind getrennt nach Stimulationsseite des ersten Stimulus: linke Stimulationen sind rot, rechte blau dargestellt. Diese Diagramme stellen beispielhaft den allgemeinen zeitlichen Aktivitätsverlauf anhand der linken Hemisphäre dar.

Im Zeitbereich des P50m-Peaks (50 ms) der taktilen Dipole war ein deutlicher (LH: $Z = 8.7609$; RH: $Z = -10.1459$) Seitenunterschied zwischen der kontralateralen und der ipsilateralen Hemisphäre zu erkennen. Während auf der kontralateralen Hemisphäre ein klarer Peak (LH: MW = 11.3094 nAm; RH: MW = 14.917 nAm) sichtbar war, war auf der ipsilateralen Hemisphäre (LH: MW = -1.3094 nAm; RH: MW = -3.1329 nAm) kaum Aktivität erkennbar.

Nach den Trainingssitzungen blieb der positive Peak der kontralateralen Hemisphäre (LH: MW = 11.1782 nAm; RH: MW = 13.2745 nAm) erhalten und auf der ipsilateralen Hemisphäre (LH: MW = -3.4254 nAm; RH: MW = -1.2434) war weiterhin kaum Aktivität sichtbar, einen deutlichen Trainingseffekt gab es aber nicht (LH: $Z = 0.5170$; RH: $Z = -1.1948$).

Auch der Einfluss der Stimulationsseite (Seiteneffekt) auf die Aktivierungsstärke der taktilen Dipole im Bereich von 70-90 ms war sowohl für die linke Hemisphäre (kontralateral: MW = -21.7533 nAm; ipsilateral: MW = -9.8367 nAm) mit $Z = -6.9059$ als auch für die rechte Hemisphäre (kontralateral: MW = -18.1374 nAm; ipsilateral: MW = -7.3143 nAm) mit $Z = 3.3050$ signifikant. Im Gegensatz zum P50-Peak gab es hier einen auf der linken Hemisphäre mit $Z = -3.6242$ und auf der rechten Hemisphäre mit $Z = 2.1224$ deutlichen Trainingseffekt (Postmessung: linke Hemisphäre: kontralateral: MW = -19.596 nAm; ipsilateral: MW = -6.6359 nAm; rechte Hemisphäre: kontralateral: MW = 12.5816 nAm; ipsilateral: MW = -6.0662 nAm).

Die auditorischen Dipole, die im Bereich von 90ms liegen, scheinen bei der taktilen Aufgabe aufgrund der Topographie und Verläufe eher eine SII-Antwort als eine Aktivierung des primären auditorischen Kortex zu repräsentieren.

Vor den Trainingssitzungen war auf der kontralateralen Hemisphäre eine signifikant (LH: $Z = 8.3857$; RH: $Z = -4.4941$) höhere Antwort (LH: MW = 16.7744 nAm; RH: MW = 19.6395 nAm) als auf der ipsilateralen Hemisphäre (LH: MW = 12.3092 nAm; RH: MW = 14.3998 nAm) sichtbar. Dieser Effekt war auch nach den Trainingssitzungen (kontralateral: LH: MW = 16.0028 nAm; RH: MW = 19.2043 nAm; ipsilateral: LH: MW = 10.2619 nAm; RH: MW = 12,1784 nAm) vorhanden, einen signifikanten Trainingseffekt gab es aber nicht (LH: $Z = 0.6714$; RH: $Z = 1.9294$).

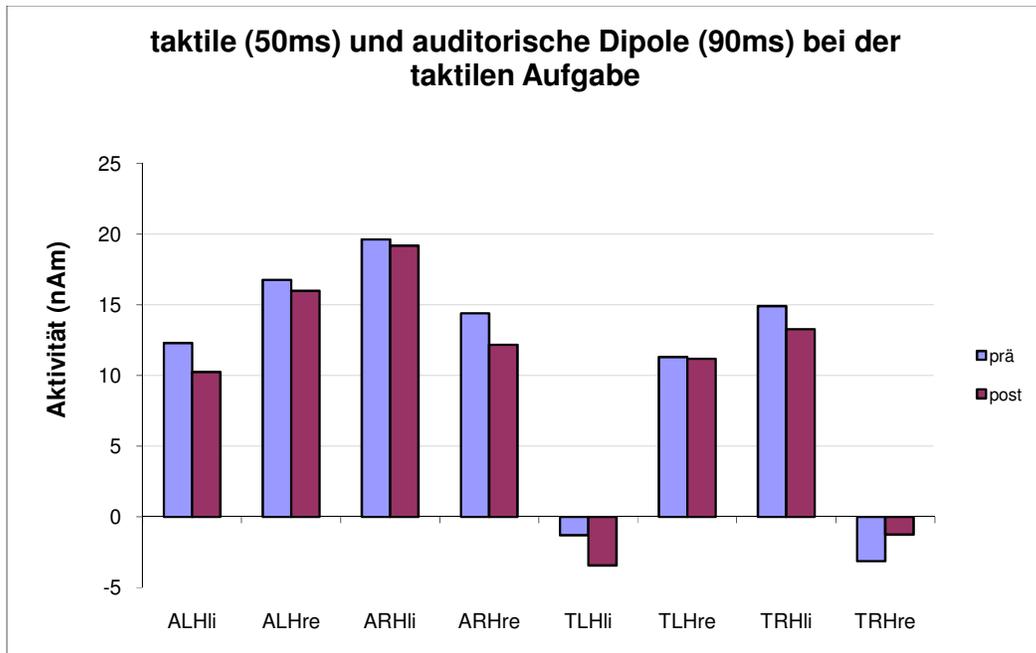


Abb. 18: Die Darstellung der auditorischen (bei 90ms) und der taktilen Dipole (bei 50ms) bei der taktilen Aufgabe (A: auditorischer Dipol; T: taktiler Dipol; LH: linke Hemisphäre; RH: rechte Hemisphäre; li: linksseitige Stimulation; re: rechtsseitige Stimulation)

3.2.2. Die späten Antworten

Im zweiten Untersuchungsschritt sollten die kortikalen Antworten und deren Veränderung im Zeitbereich von 600-900 ms, nach Abschluss der Sequenzdarbietung und bevor die zwei alternativen Antwortmöglichkeiten visuell präsentiert wurden, untersucht werden.

Die Abbildung 19 zeigt die Aktivitätsverläufe der Prä- und Posttestsitzungen. Hierbei wurden die Grand Averages der 151 Sensorkanäle überlagert dargestellt.

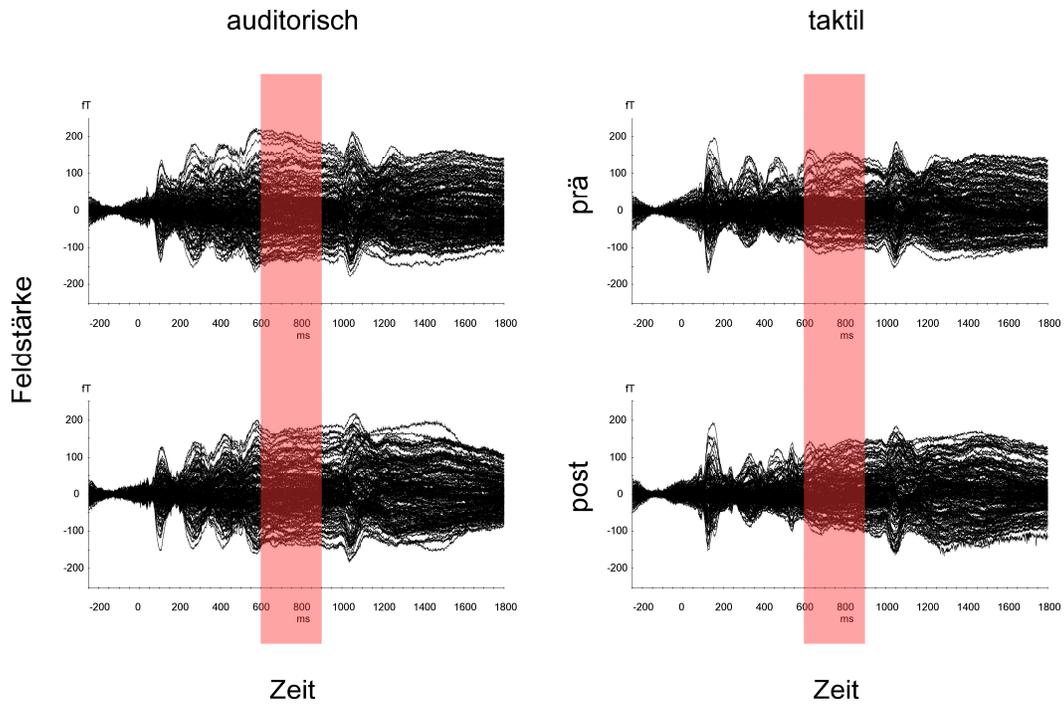


Abb. 19: Die Aktivitätsverläufe der 151 Sensorkanäle

Auf der Abbildung der verschiedenen Prä- und Posttestsitzungen sind deutlich die typischen Peaks, die etwa 1 s nach Stimulus-Onset beginnen, zu erkennen. Diese Peaks sind die Antworten der vier Stimulationen und des Beginns der visuellen Präsentation.

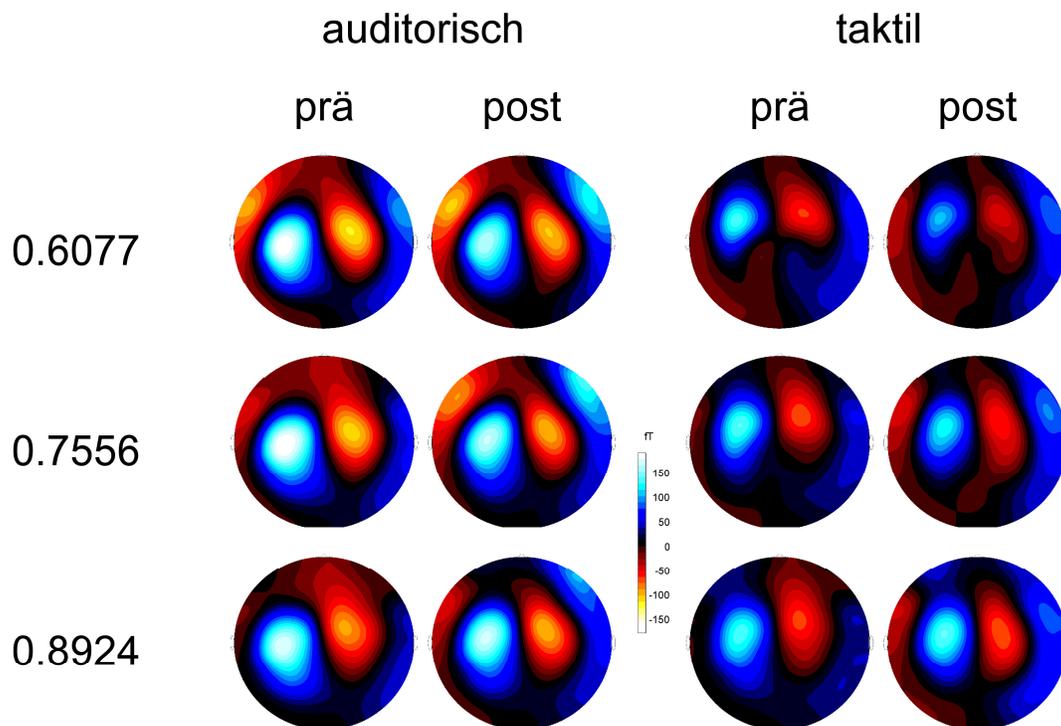


Abb. 20: Darstellung der topographischen Feldverteilung

Die topographischen Feldverteilungen der auditorischen und taktilen Prätestsitzungen haben im Zeitbereich von 600-900 ms pro Hemisphäre ein ziemlich begrenztes Areal, in dem die magnetischen Feldlinien eintreten und ein Areal wo sie austreten. Es besteht jedoch keine Ähnlichkeit zwischen den auditorischen und taktilen Feldverteilungen.

In den Abbildungen der Posttestsitzungen zeigt sich, dass sich die Topographie der auditorischen Feldverteilung kaum verändert hat. Bei der taktilen Aufgabe ist aber eine deutliche Veränderung der kortikalen Areale in Richtung der auditorischen Areale erkennbar.

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse wurde nun anhand einer Mustertopographie, die den Anteil der Topographie der Grand Averages der auditorischen Posttestsitzung darstellt, die Ähnlichkeit der Topographie in den Einzelblöcken ermittelt.

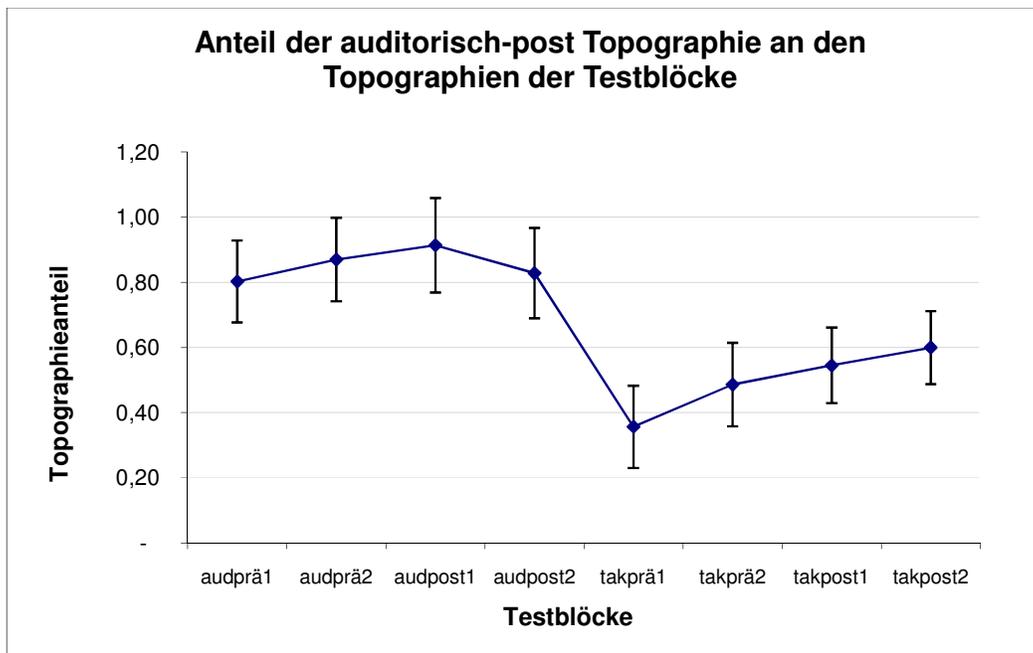


Abb. 21: Darstellung der Daten aus der Berechnung des Topographienanteils des Grand Averages der auditorischen Posttestsitzung in den auditorischen (aud) und taktilen (tak) Einzelmessungen der VPs.

Im Verlauf der Studie war die Mustertopographie in den auditorischen Testblöcken in einem hohen Maß enthalten. Die Mittelwerte lagen in der auditorischen Prätestsitzung bei 0.80 (SD = 0.13) in der ersten Wiederholung und 0.87 (SD = 0.13) in der zweiten Wiederholung. Wie die Abbildung und die statistische Auswertung zeigt, war zu den Werten in der Posttestsitzung mit 0.91 (SD = 0.14) in der ersten Wiederholung und 0.83 (SD = 0.14) in der zweiten Wiederholung kein signifikanter ($p = 0.661$; $F(1,11) = 0.203$) Unterschied erkennbar.

Bei der taktilen Aufgabe war die Mustertopographie der Prätestsitzungen im Mittel weniger stark vorhanden. Von den Prätestblöcken mit Werten von 0.36 (SD = 0.13) in der ersten Wiederholung und 0.49 (SD = 0.13) in der zweiten Wiederholung zu den Posttestblöcken mit Werten von 0.54 (SD = 0.12) und 0.60 (SD = 0.11) in der ersten und zweiten Wiederholung gab es hier einen signifikanten Trainingseffekt ($p = 0.016$; $F(1,11) = 8.134$).

Die Varianzanalyse der beiden Modalitäten auditorisch und taktil ergab einen deutlichen Unterschied ($p < 0.001$; $F(1,11) = 39.449$) zwischen der auditorischen und taktilen Aufgabe. Ein signifikanter Prä-Post-Effekt der beiden Modalitäten war nicht zu erkennen ($p = 0.098$; $F(1,11) = 3.258$). Bei der Interaktion der Modalitäten und des Prä-Post-Effekts,

die Auskunft über einen möglichen Transfer von der einen zur anderen Modalität andeutet, ergab sich keine Signifikanz ($p = 0.192$; $F(1,11) = 1.934$). Das Training führte demnach nicht zu einer spezifischen Änderung der Hirnaktivität in der trainierten auditorischen Modalität.

4. Diskussion

In der vorliegenden Studie wurden die Änderung der kortikalen Aktivität sowie die Veränderung des Verhaltens beim Erlernen eines multimodalen morseähnlichen Sprachcodes, der als Modell für das Erlernen einer einfachen Sprachform diente, untersucht. Der in der Studie verwendete Sprachcode konnte sowohl in der auditorischen als auch in der taktilen und motorischen Modalität genutzt werden.

Hierbei sollte aber nicht nur der Lerneffekt einer Modalität betrachtet werden, sondern es sollte auch die Generalisierung des auditorischen erlernten Sprachcodes auf die taktile Verarbeitung und motorische Reproduktion geprüft werden.

Anhand der Aufzeichnungen der Verhaltensdaten aus den Test- und Trainingssitzungen sowie den magnetencephalographischen Aufzeichnungen der kortikalen Aktivität in den Prä- und Posttestsitzungen konnten folgende Sachverhalte gezeigt werden:

- Das auditorische Training führt zu einer Steigerung der Performance und Verkürzung der Reaktionszeit in der auditorischen Modalität.
- Eine Generalisierung dieser Effekte auf die taktile Kontrollaufgabe findet statt.
- Die kortikale Antwort auf die ersten Reize der Codestimuli der auditorischen und taktilen Aufgabe ist deutlich linkshemisphärisch lokalisiert.
- Die Erkennung des Codes und die gedankliche Verbindung der Codestimuli mit den einzelnen Buchstaben erfolgt nach dem Training in der auditorischen und taktilen Aufgabe in einem ähnlichen Hirnareal, in dem schon in der Prätestsituation die auditorische Verarbeitung erfolgte.

In der Studie von Alcantara et al. (1993) wurde bereits durch ein unimodales Training der auditorischen oder taktilen Modalität mit sprachunterstützenden Hilfen (Tickle Talker) gezeigt, dass sich die Performance unabhängig von der trainierten Modalität positiv auf die auditorische oder taktile Aufgabe auswirkt. Analog dazu wurde auch in der vorliegenden Studie ein Versuchsaufbau mit einer multimodalen Testphase vor und nach dem unimodalen Training gewählt.

Sprachliche Information wie die taktile Worterkennung (Szeto & Chung 1986, Galvin et al. 1999) und das Erlernen einer künstlichen Sprache, als Keki bezeichnet, (Posner & Abdullaev 1999) konnte anhand eines Trainings in einem bestimmten Zeitraum erlernt

werden. Die Trainingsdauer war dabei abhängig von der Art der Stimuli und der Menge des zu Erlernenden (Galvin et al. 1999). Im Verlauf dieser Trainings verkürzte sich die Reaktionszeit (Posner & Abdullaev 1999) und es wurden bessere Ergebnisse erreicht (Szeto & Chung 1986).

In der vorliegenden Studie war es fast allen Versuchspersonen möglich, in einem möglichst kurzen Trainingszeitraum durch vier Sitzungen den morseähnlichen Sprachcode mit 12 Buchstaben zu erlernen. Dies zeigte sich durch die schnelleren Antworten auf die Aufgaben und den deutlichen Anstieg der Prozentzahl der richtigen Antworten. Die Trainingssitzungen in der auditorischen Aufgabe hatten einen deutlichen Effekt auf die auditorische und taktile Aufgabe.

Im Vergleich mit der taktilen und motorischen Aufgabe erlangten die VPs in der auditorischen Aufgabe deutlich schlechtere Ergebnisse. Dies scheint jedoch nicht auf unterschiedliche Verarbeitungsprozesse auf höherer Ebene hinzuweisen, denn auch in der auditorischen Aufgabe war eine deutliche Verbesserung der Anzahl der richtigen Antworten und eine Verkürzung der Reaktionszeit im Verlauf der Studie zu erkennen. Nach der subjektiven Einschätzung der VPs war die Lokalisation der Codeelemente am Ohr in den Testsitzungen, wahrscheinlich aufgrund des technischen Versuchsaufbaus, deutlich schwieriger als in den Trainingssitzungen, da dort normale Kopfhörer benutzt wurden. Dies ist auch anhand der Trainingsdaten zu erkennen, in denen die VPs zum Ende hin deutlich bessere Ergebnisse als in der Posttestsitzung erlangten. Ein zweiter Grund für die schlechteren Ergebnisse könnte eine zu kurz gewählte Abfolge der Stimuli sein, sodass die aufeinander folgenden Stimuli miteinander verarbeitet wurden und dadurch eine unklare Lokalisationswahrnehmung entstand. Trotz allem war in der auditorischen Aufgabe der größte Trainingserfolg zu erkennen. Der Anstieg der Performance und die Verkürzung der Reaktionszeit waren hier am höchsten. Die schnelleren Antworten gingen nicht auf Kosten der Genauigkeit.

Ein Trainingseffekt war auch in der taktilen Aufgabe deutlich erkennbar. Da hier die Lokalisation der Codes besser zu erkennen war, konnten hier absolut gesehen wesentlich bessere Ergebnisse als in der auditorischen Aufgabe erreicht werden.

In der motorischen Aufgabe, die sich von der auditorischen und der taktilen Aufgabe im Aufbau unterschied, stiegen die VPs schon mit einer sehr hohen Performance ein. Da

durch die visuelle Präsentation der Elementsequenzen der Code einfach abgetippt werden konnte, zeigt sich, dass ein Kenntnis des Codes zu einer guten Bewältigung der Aufgabe nicht erforderlich war. Aufgrund der hohen Anfangswerte war in dieser Aufgabe auch kein Lerneffekt nachweisbar.

Fehleranalysen beim Morsecodetraining in der Studie von Clawson et al. (2001) ergaben, dass die Fehler bei der Morsecodeaufnahme meist durch Verwechseln der Codeelemente entstehen. Dies scheint besonders der Fall zu sein, wenn die Codes eine gleiche Länge und eine gleiche Heterogenität besitzen (Shepard 1963).

Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in meiner Studie in den Reaktionszeiten für die einzelnen Buchstaben wider. Am schnellsten wurde schon in der Prätestsitzung und im ganzen Verlauf der Studie auf den Buchstaben „H“ (entspricht ► ► ► ►), der als einziger homogen aus rechten Stimulationen bestand, geantwortet. Auch die Buchstaben „C“ (◄ ► ◄ ►) und „Z“ (◄ ◄ ► ►), die zwar mehrere Richtungswechsel innerhalb des Codes aufzeigten, aber in unserer Alphabet ein einzigartiges Muster hatten und durch ihre Spiegelbildlichkeit ins Auge stachen, waren für die VPs leichter zu erkennen. Buchstaben mit mehreren Richtungswechseln und die aufgrund der ähnlichen Heterogenität mit anderen Buchstaben leichter zu verwechseln waren, wie „F“ (► ► ◄ ►), „L“ (► ◄ ► ►), „P“ (► ◄ ◄ ►), „X“ (◄ ► ► ◄), „Y“ (◄ ► ◄ ◄) und „Q“ (◄ ◄ ► ◄), waren deutlich schwerer zu erkennen und hatten auch noch in der Posttestsitzung langsamere Reaktionszeiten bei der Entscheidung.

Die Lokalisation der kortikalen Antworten konnte durch die magnetischen Felder, die durch die auditorische und taktile Stimulation evoziert wurden, magnetencephalographisch aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Die ersten Verarbeitungsschritte der auditorischen und taktilen Stimuli waren jeweils im primären auditorischen und somatosensorischen Kortex lokalisierbar. Anhand der zeitlichen Aktivitätsverläufe waren die charakteristischen Peaks erkennbar. Auf den auditorischen Stimulus erfolgte nach etwa 50 ms ein positiver Peak (Pm50), dem ein negativer Peak (N1) mit einer Latenz von 100 ms und danach wieder ein positiver Peak (P2) mit einer Latenz von 200 ms folgten (Mathiak et al. 2002). Dem taktilen Stimulus folgte nach 50 ms ein kontralateraler Peak (P50), der die Aktivität des primären somatosensorischen Kortex entspricht (Gallen et al. 1993, Hari et al. 1984, Hämäläinen et al. 1990,

Kakigi et al. 2000, Lounasmaa et al. 1996) und nach 90-100 ms ein weiterer bilateraler Peak, der die Verarbeitung in SII widerspiegelt (Kakigi et al. 2000).

Die Verarbeitung sprachlicher Information zeichnet sich durch eine Lateralisierung der linken Hemisphäre aus (Mathiak et al. 1999, Neville & Bavelier 1998, Saffran 2000, Tallal et al. 1998). Die höhere Aktivität der linken Hemisphäre ist unabhängig von der Modalität der Sprache (Bellugi et al. 1989). In der auditorischen Aufgabe wiesen nur die auditorischen Dipole im Bereich des primären auditorischen Kortex eine deutliche Aktivität auf. Hierbei zeigte sich, dass die Antwort auf einen Stimulus vor den Trainingssitzungen jeweils auf der kontralateralen Hemisphäre am höchsten war. Auf der rechten Hemisphäre war die Aktivität jedoch höher als auf der linken Hemisphäre. Durch das Training nahm die Aktivität auf beiden Hemisphären ab, wobei es wie in den oben genannten Studien zu einer Lateralisierung zur linken Seite kam.

Bei der taktilen Aufgabe waren sowohl die taktilen als auch die auditorischen Dipole aktiv. Die taktilen Dipole bei 50 ms zeigten wieder eine hohe Aktivität auf der kontralateralen Hemisphäre.

Die auditorischen Dipole der taktilen Aufgabe zeigten bei 90 ms die höchste Aktivität. Aufgrund der Lokalisation in der Nähe von SII und den Studien von Hari et al. (1984), Hämäläinen et al. (1996), Kakigi et al. (2000) und Lounasmaa et al. (1996), bei denen zu diesem Zeitpunkt SII aktiv ist, ist anzunehmen, dass es sich hier auch um die Aktivität von SII handelt. Zu diesem Zeitpunkt war sowohl der ipsi- als auch der kontralaterale Kortex aktiv und wie in der Studie von Kaukoranta et al. (1986) beschrieben, war auch hier eine schwächere Antwort mit einer kürzeren Latenz zu finden. Im Gegensatz zu den frühen SI-Antworten gab es bei den späten SII-Antworten einen Trainingseffekt. Die taktilen Dipole, die die Aktivität im primären somatosensorischen Kortex beschreiben, zeigten auch bei 90 ms einen deutlichen negativen Peak. Diese Aktivität war wie die Aktivität in SII auch bilateral vertreten und in der kontralateralen Hemisphäre höher. Es könnte sein, dass hier die Lokalisation der Dipole nicht optimal erfasst war und so auch von den taktilen Dipolen die Aktivität von SII registriert wurde. Da die Aktivität von SII nicht nur von einem Dipol, sondern von zwei Dipolen, die in unterschiedliche

Richtungen zeigen, erfasst wurde, ist so die Aktivität der SII-Antworten verzerrt und damit nicht aussagekräftig.

Im Verlauf der Studie sollten die Versuchspersonen lernen, nach Abschluss des Stimulationscodes die Stimulation als sprachliche Information wahrzunehmen und den Code dem jeweiligen Buchstaben zuzuordnen. Dies sollte ohne die zusätzliche visuelle Präsentation des Pfeilcodes erfolgen. Dieser Prozess der Zusammenführung der einzelnen Stimulationselemente zu einem bedeutungsvollen Muster sollte im Bereich nach der letzten Stimulation des Buchstabencodes und vor der visuellen Präsentation der Buchstabencodes auf der Mattscheibe stattfinden. Verschiedene Studien (Binder et al.1997, Calandra-Buonaura et al. 2002, Mathiak et al. 1999, Saffran 2000, Tallal et al.1998) berichten von einer linkshemisphärischen Dominanz bei der Verarbeitung sprachlicher Information. Die höhere Aktivität der linken Hemisphäre im Verlauf der Studie, vor allem in der auditorischen Modalität, scheint hierbei die Tatsache widerzuspiegeln, dass die Stimulationselemente im Verlauf als sprachliche Information gewertet wurden und somit eine höhere Aktivität der sprachdominanten Hemisphäre erfolgte. Die Studie von Kujala et al. (2003) bestätigt diese Hypothese. Hier wurde auch ein Morsecodetraining durchgeführt. Anfangs wurde die Aktivität auf der nicht sprachdominanten Hemisphäre gemessen und nach dem Training kam es aufgrund der Erkennung des Codes als sprachliche Information zur Lateralisierung zur linkshemisphärischen sprachdominanten Seite. Kujala et al. (2003) folgerten daraus, dass es eine große Ähnlichkeit zwischen der neuronalen Repräsentation von Morsecodemustern und Phonemen geben muss.

Betrachtet man die topographischen Feldverteilungen im Verlauf der Studie, erkennt man, dass die Topographie in der auditorischen Aufgabe weitgehend gleich blieb. Bei der taktilen Aufgabe veränderte sich die Topographie in Richtung der auditorischen Topographie, was vor allem in den Topographien der Posttestsitzungen deutlich wurde. Es ist möglich, dass bei gesunden Menschen die Wahrnehmung der sprachlichen Information primär über das auditorische System und angrenzende Areale erfolgt. In den Prätestsitzungen konnte die Buchstabenstimulation in der auditorischen Aufgabe zwar als auditorische Information erkannt, jedoch nicht unbedingt als sprachliche Information interpretiert werden. So zeigte sich aber die typische Topographie der Feldverteilung bei der Sprachverarbeitung. Bei der Verarbeitung der taktilen Aufgabe besteht zunächst

kein Zusammenhang zu Arealen sprachlicher Informationsverarbeitung. Im Verlauf der Trainingssitzungen lernten die Versuchspersonen die Stimulation zu interpretieren und als Buchstaben zu erkennen. Da die Buchstabencodes jetzt bekannt waren, ist anzunehmen, dass die Versuchspersonen die taktile Stimulation auch als sprachliche Information erkannten und so auch die taktilen Aufgaben die auditorische Topographie, die die typische Topographie bei Spracherkennung darstellt, aufwiesen.

Im Widerspruch zu dieser Hypothese stehen jedoch die langen Reaktionszeiten bei der Ausführung der auditorischen Aufgabe. Nach der Studie von Clawson et al. (2001) ist die Morsecodenaufnahme in zwei Verarbeitungsschritte unterteilt, erst die Erkennung der Elemente und dann die Verknüpfung der Elemente zu Buchstaben. Der erste Schritt dieser Verarbeitung scheint in meiner Studie bei der auditorischen Aufgabe durch den technischen Aufbau oder die zu schnelle Stimulationsabfolge erschwert zu sein, wodurch sich die längeren Reaktionszeiten und die schlechtere Performance im Gegensatz zur taktilen Aufgabe ableiten lassen.

Sowohl die Verhaltensdaten als auch die MEG-Daten der frühen und späten Antworten weisen einige Parallelen zu den bisherigen Erkenntnissen der Sprachforschung auf:

- Die Verarbeitung sprachlicher Elemente findet auf der linken Hemisphäre statt (Binder et al. 1997, Calandra-Buonaura et al. 2002, Mathiak et al. 1999, Saffran 2000, Tallal et al. 1998). Dieser Effekt spiegelt sich vor allem nach den Trainingssitzungen in der auditorischen Modalität wider.
- Ein unimodales Training wirkt sich positiv auf andere Modalitäten aus (Alcantara et al. 1993). Betrachtet man die Verhaltensdaten, erkennt man deutlich, dass sich die auditorischen Trainingssitzungen positiv auf die taktile Modalität auswirken.
- Im Verlauf des Lernens kommt es zu einer kortikalen Reorganisation und Veränderung der Aktivität (Godde et al. 2003, Neville & Bavelier 1998). Die Veränderungen der kortikalen Aktivität sind vor allem in den frühen Antworten der MEG-Daten wieder zu finden. Die topographischen Veränderungen der Feldverteilungen könnten die kortikale Reorganisation widerspiegeln.
- Die Organisation bei Verarbeitung von Sprache scheint gewissen Zwängen unabhängig von der Modalität unterworfen zu sein (Bellugi et al. 1989, Neville et al. 1997). Die ähnlichen topographischen Feldverteilungen in den Posttestsit-

zungen zeigen, dass die Verarbeitung in den verschiedenen Modalitäten nach einem ähnlichen Muster erfolgt.

In dieser Studie konnte gezeigt werden, wie sich das Verhalten und die kortikale Aktivität beim Erlernen eines morseähnlichen Codes, als Modell einer einfachen Sprachform, verändert und wie eine unimodal erlernte Information auf andere Modalitäten übertragbar ist. In zwei weiteren parallelen Studien wurde das Training in der taktilen und motorischen Modalität durchgeführt. Der Vergleich der drei Gruppen und eine gemeinsame Analyse der Daten könnte noch weitere Aufschlüsse über die Verarbeitung des Sprachcodes sowie der Effektivität der einzelnen Trainingsmethoden und deren Transfermöglichkeiten auf die anderen Modalitäten liefern.

5. Zusammenfassung

Das Erlernen und die Aufnahme von sprachlicher Information sind Prozesse, die vor allem in der linken Hemisphäre stattfinden und aus einem komplexen Netzwerk kortikaler Regionen bestehen. Sprachliche Information kann jedoch außer über das audiovisuelle System auch über alternative Sinnesmodalitäten wie das somatosensorische Sinnessystem bei der Braille-Schrift der Blinden oder das visuelle System bei der Gebärdensprache aufgenommen werden. Eine Reihe von Studien, in denen die alternativen Sprachsysteme untersucht wurden, deuten darauf hin, dass die Verarbeitung unabhängig von der jeweiligen Modalität in den linkshemisphärischen Sprachregionen stattfindet. In meiner Dissertationsarbeit sollte das Erlernen eines neuen Sprachcodes, die dabei auftretenden Veränderungen der kortikalen Aktivität sowie die Modalitätsunabhängigkeit des kortikalen Sprachsystems untersucht werden.

Im Laufe der Studie erlernten die Probanden einen multimodalen Morsecode-ähnlichen Sprachcode, der aus zwölf abgewandelten Buchstaben des Morsecodesystems bestand. Die Buchstaben wurden mit einer Kombination aus Stimulationen der rechten bzw. linken Körperhälfte entweder akustisch oder taktil dargeboten. In beiden Aufgaben mussten sie nach der Präsentation des Sprachcodes entscheiden, welcher der beiden anschließend visuell dargebotenen Buchstaben durch die auditorische bzw. taktile Stimulation dargestellt worden war. In der motorischen Aufgabe musste ein visuell präsentierter Buchstabe in den Sprachcode übersetzt werden und durch Tastendrücken mit der rechten und linken Hand reproduziert werden. In den Testsitzungen im naiven und trainierten Zustand wurden den Versuchspersonen der Sprachcode in allen drei Modalitäten präsentiert. Zwischen den Testsitzungen sollten die Versuchspersonen in einem unimodalen auditorischen Training lernen, den Sprachcode zu erkennen und ihn mit den repräsentierten Buchstaben in Verbindung zu setzen. Während der Testsitzung wurde die kortikale Verarbeitung der Reize mit der Magnetencephalographie (MEG) untersucht. Sowohl in Trainings- als auch in Testsitzungen wurden die Performance und die Reaktionszeiten aufgezeichnet.

Anhand der physiologischen Daten sollte untersucht werden, inwieweit sich die Lokalisation der zerebralen Verarbeitung im Verlauf verändert und ob die Lokalisation ande-

rer Sprachmodalitäten mit der Lokalisation audiovisueller Sprachverarbeitung assoziiert ist. Es wurde dabei angenommen, dass das unimodale auditorische Training nicht nur einen Effekt auf die trainierte Aufgabe, sondern auch auf die anderen Modalitäten (taktile und motorisch) hat und dass die kortikale Aktivität nach dem Training überwiegend auf der linken sprachdominanten Hemisphäre lokalisiert ist.

Im Verlauf der Studie konnten die Versuchspersonen alle Aufgaben deutlich schneller und mit einem signifikant höheren Prozentsatz korrekter Antworten ausführen. Bei der kortikalen Aktivität wurden die frühen Antworten, die die Antwort auf den ersten Reiz repräsentierten und die späten Antworten, die nach Präsentation aller Codestimuli erfolgten und das Zusammenführen der einzelnen Stimuli zu einem Buchstaben darstellten, untersucht.

Bei den frühen Antworten kam es vor allem in der auditorischen Aufgabe zu einer deutlichen Lateralisierung zur linken Hemisphäre nach dem Training. Die Topographie im Zeitfenster der späten Antworten veränderte sich in der auditorischen Aufgabe durch das Training kaum. Bei der taktilen Aufgabe war jedoch eine deutliche Topographieveränderung in Richtung der auditorischen Topographie im Zeitbereich der späten Antworten zu erkennen. Es scheint also, dass das Zusammenführen der Codestimuli in beiden Modalitäten in den gleichen kortikalen Regionen, die für die Sprachverarbeitung typisch sind, stattfindet.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen nicht nur, dass das Erlernen eines unimodalen Sprachcodes sich positiv auf andere Modalitäten auswirkt, sondern auch, dass es kortikale Regionen gibt, die spezifisch für die Verarbeitung sprachlicher Informationen sind. Diese Areale werden nicht nur von den typischen audiovisuellen Sprachmodalitäten genutzt, sondern ebenfalls von anderen Sinnesmodalitäten, wenn über diese sprachliche Information übermittelt wird.

6. Literaturverzeichnis

- Ackermann H., Lutzenberger W., Hertrich I.: Hemispheric lateralisation of the neural encoding of temporal speech features: a whole-head magnetoencephalography study. *Brain Res Cogn Brain Res* (1999), 7(4): 511-518
- Ackermann H., Mathiak K.: Symptomatologie, neuroanatomical correlates and pathomechanism of central hearing disorders (pure word deafness, verbal/nonverbal auditory agnosia, cortical deafness). *Fortschr Neurol Psychiat* (1999), 67: 509-523
- Alcantara J.I., Blamey P.J., Clark G.M.: Tactile-auditory speech perception by unimodally and bimodally trained normal-hearing subjects. *J Am Acad Audiol* (1993), 4(2): 98-108
- Ardila A.: Aphasia for Morse code: a comment on Wyler and Ray (1986). *Brain Lang* (1987), 30(2): 363-366
- Bellugi U., Poizner H., Klima E.S.: Language, modality and the brain. *Trends Neurosci* (1989), 12(10): 380-388
- Benaisch A.A., Thomas J.J., Choudhury N., Leppanen P.H.: The importance of rapid auditory processing abilities to early language development: evidence from converging methodologies. *Dev Psychobiol* (2002), 40(3): 278-292
- Binder J.R., Frost J.A., Hammeke T.A., Cox R.W., Rao S.M., Prieto T.: Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci* (1997), 17(1): 353-362
- Calandra-Bounaura G., Basso G., Gorno-Tempini M.L., Serafini M., Pagnoni G., Baraldi P., Porro C.A., Nichelli P.: Human brain language processing areas identified by functional magnetic resonance imaging using lexical decision task. *Funct Neurol* (2002), 17(4): 183-191
- Clawson D.M., Healy A.F., Ericsson K.A., Bourne Jr. L.E.: Retention and transfer of Morse code reception skill by novices: part-whole training. *J Exp Psychol Appl* (2001), 7(2): 129-142
- Fiez J.A., Raichle M.E., Balota D.A., Tallal P., Petersen S.E.: PET activation of posterior temporal regions during auditory word presentation and verb generation. *Cereb Cortex* (1996), 6(1): 1-10
- Forss N., Narici L., Hari R.: Sustained activation of human SII cortices by stimulus trains. *Neuroimage* (2001), 13(3): 497-501

- Foxe J.J., Wylie G.R., Martinez A., Schroeder C.E., Javitt D.C., Guilfoyle D., Ritter W., Murray M.M.: Auditory-somatosensory multisensory processing in auditory association cortex: an fMRI study. *J Neurophysiol* (2002), 88(1): 540-543
- Friederici A.D., Opitz B., von Cramon D.Y.: Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: an fMRI investigation of different word types. *Cereb Cortex* (2000), 10(7): 698-705
- Friederici A., Schoenle P.: Computational dissociation of two vocabulary types: evidence from aphasia. *Neuropsychologia* (1980), 18: 11-20
- Friederici A.D., Steinhauer K., Pfeifer E.: Brain signatures of artificial language processing: evidence challenging the critical period hypothesis. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2002), 99(1): 529-534
- Fu K.M., Johnston T.A., Shah A.S., Arnold L., Smiley J., Hackett T.A., Garraghty P.E., Schroeder C.E.: Auditory cortical neurons respond to somatosensory stimulation. *J Neurosci* (2003), 23(20): 7510-7515
- Gallen C.C., Sobel D.F., Lewine J.D., Sanders J.A., Hart B.L., Davis L.E., Orrison Jr. W.W.: Neuromagnetic mapping of brain function. *Radiology* (1993), 187(3): 863-867
- Galvin K.L., Blamey P.J., Oerlemans M., Cowan R.S., Clark G.M.: Acquisition of a tactile-alone vocabulary by normally hearing users of the Tickle Talker. *J Acoust Soc Am* (1999), 106(2): 1084-1089
- Godde B., Ehrhardt J., Braun C.: Behavioral significance of input-dependent plasticity of human somatosensory cortex. *Neuroreport* (2003), 14(4): 543-546
- Hämäläinen H., Kekoni J., Sams M., Reinikainen K., Näätänen R.: Human somatosensory evoked potentials to mechanical pulses and vibration: contributions of SI and SII somatosensory cortices to P50 and P100 components. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* (1990), 75(2): 13-21
- Hari R.: Activation of the human auditory cortex by speech sounds. *Acta Otolaryngol* (1991), 491: 132-138
- Hari R., Hämäläinen M., Kaukoranta E., Reinikainen K., Teszner D.: Neuromagnetic responses from the second somatosensory cortex in man. *Acta Neurol Scand* (1983), 68(4): 207-212
- Hari R., Reinikainen K., Kaukoranta E., Hämäläinen M., Ilmoniemi R., Penttinen A., Salminen J., Teszner D.: Somatosensory evoked cerebral magnetic fields from SI and SII in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* (1984), 57(3): 254-263

- Kakigi R., Hoshiyama M., Shimojo M., Naka D., Yamasaki H., Watanabe S., Xiang J., Maeda K., Lam K., Itomi K., Nakamura A.: The somatosensory evoked magnetic fields. *Prog Neurobiol* (2000), 61(5): 495-523
- Kanno A., Nakasato N., Hatanaka K., Yoshimoto T.: Ipsilateral area 3b responses to median nerve somatosensory stimulation. *Neuroimage* (2003), 18: 169-177
- Karhu J., Tesche C.D.: Simultaneous early processing of sensory input in human primary (SI) and secondary (SII) somatosensory cortices. *J Neurophysiol* (1999), 81(5): 2017-2025
- Kaukoranta E., Hari R., Hämäläinen M., Huttunen J.: Cerebral magnetic fields evoked by peroneal nerve stimulation. *Somatosens Res* (1986), 3(4): 309-321
- Kujala A., Huotilainen M., Uther M., Shtyrov Y., Monto S., Ilmoniemi R.J., Näätänen R.: Plastic cortical changes induced by learning to communicate with non-speech sounds. *Neuroreport* (2003), 14(13): 1683-1687
- Lang M., Lang W., Uhl F., Kornhuber A., Deecke L., Kornhuber H.H.: Slow negative potential shifts indicating verbal cognitive learning in a concept formation task. *Human Neurobiol* (1987), 6:183-190
- Lounasmaa O.V., Hämäläinen M., Hari R., Salmelin R.: Information processing in the human brain: magnetoencephalographic approach. *Proc Natl Acad Sci U S A* (1996), 93: 8809-8815
- Lütkenhöner B., Lammertmann C., Simones C., Hari R.: Magnetoencephalographic correlates of audiotactile interaction. *Neuroimage* (2002), 15(3): 509-522
- Mathiak K., Hertrich I., Lutzenberger W., Ackermann H.: Preattentive processing of consonant vowel syllables at the level of the supratemporal plane: a whole-head magnetencephalography study. *Brain Res Cogn Brain Res* (1999), 8: 251-257
- Mathiak K., Hertrich I., Grodd W., Ackermann H.: Cerebellum and speech perception: a functional magnetic resonance imaging study. *J Cogn Neurosci* (2002), 14(6): 902-912
- Mathiak K., Hertrich I., Lutzenberger W., Ackermann H.: Functional cerebral asymmetries of pitch processing during dichotic stimulus application: a whole-head magnetoencephalography study. *Neuropsychologia* (2002), 40: 585-593
- Merzenich M.M., Jenkins W.M., Johnston P., Schreiner C., Miller S.L., Tallal P.: Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science* (1996), 271(5245): 77-81
- Mills D.L., Neville H.J.: Electrophysiological studies of language and language impairment. *Semin Pediatr Neurol* (1997), 4(2): 125-134

- Mintz T.H.: Category induction from distributional cues in an artificial language. *Mem Cognit* (2002), 30(5): 678-686
- Montnemery P., Almqvist B., Harris S.: Recognition of telegraphy disturbed by noise at different S/N-ratios and different telegraphy speeds. A comparison to short-tone audiometrie. *Scand Audiol* (1991), 20(1): 33-39
- Montnemery P., Almqvist B., Harris S.: Recognition of telegraphy signs at different listening levels and frequencies. *Scand Audiol* (1992), 21(4): 255-260
- Näätänen R., Lethokoski A., Lennes M., Cheour M., Huotilainen M., Iivonen A., Vainio M., Alku P., Ilmoniemi R.J., Luuk A., Allik J., Sinkkonen J., Alho K.: Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature* (1997), 385(6615): 432-434
- Nagarajan S., Mahncke H., Salz T., Tallal P., Roberts T., Merzenich M.M.: Cortical auditory signal processing in poor readers. *Proc Natl Acad U S A* (1999), 96(11): 6483-6488
- Neville H.J., Bavelier D.: Neural organization and plasticity of language. *Curr Opin Neurobiol* (1998), 8(2): 254-258
- Neville H.J., Coffey S.A., Lawson D.S., Fischer A., Emmorey K., Bellugi U.: Neural Systems mediating American sign language: effects of sensory experience and age of acquisition. *Brain Lang* (1997), 57(3): 285-308
- Neville H.J., Mills D.L., Lawson D.S.: Fractionating language: different neural subsystems with different sensitive periods. *Cereb Cortex* (1992), 2(3): 244-258
- Opitz B., Friederici A.D.: Interactions of hippocampal system and the prefrontal cortex in learning language-like rules. *Neuroimage* (2003), 19(4): 1730-1737
- Papçun G., Krashen S., Terbeek D., Remington R., Harshman R.: Is the left hemisphere specialized for speech, language and/or something else? *J Acoust Soc Am* (1974), 55(2): 319-327
- Poeppel D., Phillips C., Yellin E., Rowley H.A., Roberts T.P., Marantz A.: Processing of vowels in supratemporal auditory cortex. *Neurosci Lett* (1997), 221(2-3): 145-148
- Posner M.I., Abdullaev Y.G.: Neuroanatomy, circuitry and plasticity of word reading. *Neuroreport* (1999), 10(3): R12-23
- Renvall H., Hari R.: Auditory cortical responses to speech-like stimuli in dyslexic adults. *J Cogn Neurosci* (2002), 14(5): 757-768

- 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
- Sadato N., Pascal-Leone A., Grafman J., Deiber M.P., Ibanez V., Hallett M.: Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain* (1998), 121: 1213-1229
- Saffran E.M.: Aphasia and the relationship of language and brain. *Semin Neurol* (2000), 20(4): 409-418
- Schnitzler A., Salmelin R., Salenius S., Jousmaki V., Hari R.: Tactile information from the human hand reaches the ipsilateral primary somatosensory cortex. *Neurosci Lett* (1995), 200(1): 25-28
- Schroeder C.E., Lindsley R.W., Specht C., Marcovici A., Smiley J.F., Javitt D.C.: Somatosensory input to auditory association cortex in the macaque monkey. *J Neurophysiol* (2001), 85(3): 1322-1327
- Shepard R.N.: Analysis of proximities as a technique for the study of information processing in man. *Hum Factors* (1963), 5: 33-48
- Simones C., Hari R.: Relationship between responses to contra- and ipsilateral stimuli in the human second somatosensory cortex SII. *Neuroimage* (1999), 10(4): 408-416
- Szeto A.Y., Chung Y.M.: Effects of training on human tracking of electrocutaneous signals. *Ann Biomed Eng* (1986), 14(4):369-381
- Tallal P., Merzenich M.M., Miller S., Jenkins W.: Language learning impairments: integrating basic science, technology, and remediation. *Exp Brain Res* (1998), 123: 210-219

7. Abkürzungsverzeichnis

Abb.: Abbildung

ANOVA: analysis of variance; Varianzanalyse

bzw: beziehungsweise

et al.: und andere

F: F-Wert (Statistische Prüfgröße bei der Varianzanalyse)

Hz: Hertz

ISI: Interstimulationsintervall

ITI: Intertrialintervall (Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Reizdurchgängen)

LH: linke Hemisphäre

li: linke Stimulation

min: Minute

mm: Millimeter

ms: Millisekunde

MW: Mittelwert

nAm: Nanoamperemeter

Ncll.: Nuclei

p: p-Wert (Irrtumswahrscheinlichkeit)

pT: Pikotesla

pt: points (Punkte)

re: rechte Stimulation

RH: rechte Hemisphäre

s: Sekunde

SD: Standardfehler

stdabw: Standardabweichung

SQUID-Magnetometer: Superconducting quantum interference devices

SI: primärer somatosensorischer Kortex

SII: sekundärer somatosensorischer Kortex

VP: Versuchsperson

Z: Z-Wert (Statistische Prüfgröße)

z.B.: zum Beispiel

€: Euro

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mir bei der Erstellung meiner Arbeit geholfen und mich unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt:

Herrn **P.D. Dr. Christoph Braun** für die freundliche, fachkundige, hilfreiche und geduldige Betreuung, auf die ich mich immer verlassen konnte.

Herrn **Dr. Klaus Mathiak** für die Unterstützung und fachliche Beratung bei der Auswertung meiner Daten.

Frau **Dipl. biol. Anja Wühle**, die immer ein offenes Ohr und einen Rat bei Schwierigkeiten bei der Anfertigung der Arbeit hatte.

Meinen Eltern, **Dr. Martina Melcop-Pitsch** und **Dr. Benedikt Pitsch** die mir das Studium ermöglicht haben und mich immer in jeglicher Hinsicht unterstützt haben.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sarah Pitsch
Geburtstag: 29.06.1980
Geburtsort: Freiburg im Breisgau

Schule

08.1987 – 09.1993 Besuch der Freien Waldorfschule Wiehre in Freiburg
10.1993 – 07.2000 Besuch der Rudolf-Steiner-Schule Villingen-Schwenningen:
Abitur
09.2000 – 02.2001 Besuch der Modeschule Esmod Berlin

Studium

seit 04.2001 Medizinstudium an der Eberhardt-Karls-Universität Tübingen
04.2003 Physikum
01.06.2007 Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung